

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION

ESCUELA DE POSGRADO

DINAMICA PRODUCTIVA DE SISTEMAS SILVOPASTORILES CON
***Acacia mangium* Y *Eucalyptus deglupta* EN EL TROPICO HUMEDO**

POR

HERNAN JAIR ANDRADE CASTAÑEDA

CATIE

Turrialba, Costa Rica
1999

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

RECIBIDO

DINÁMICA PRODUCTIVA DE SISTEMAS SILVOPASTORILES CON *Acacia mangium* Y *Eucalyptus deglupta* EN EL TRÓPICO HÚMEDO

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, como requisito parcial para optar por el grado de:

Magister Scientiae

Por

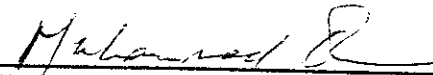
✓
HERNAN JAIR ANDRADE CASTAÑEDA

Turrialba, Costa Rica
1999


Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Dirección de la Escuela de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE


FIRMANTES:



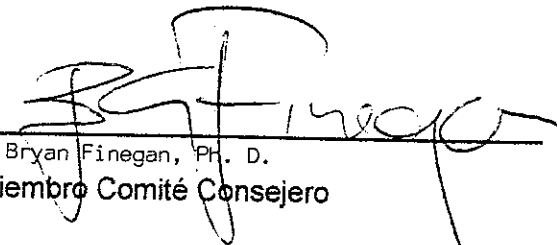
Muhammad Ibrahim, Ph. D.
Consejero Principal



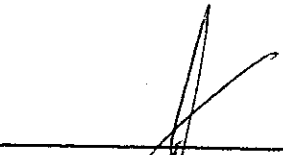
Francisco Jiménez, Ph. D.
Miembro Comité Consejero




Donald Kass, Ph. D.
Miembro Comité Consejero



Bryan Finegan, Ph. D.
Miembro Comité Consejero



Gilberto Páez, Ph. D.
Director y Decano de la Escuela de Posgrado



Hernán Jair Andrade Gastañeda
Candidato

DEDICATORIA

A mis padres, ejemplo y guía de mi vida, gracias a su gran esfuerzo soy lo que soy y todo lo que seré.

A mis hermanos, que sigan por el camino que van, así lograremos cosas grandes.

A Jéssica, única sobrina y ahijada, quien ha llenado de amor a toda la familia.

A Milena, por darme todo el amor y comprensión que siempre he buscado.

A todos mis compatriotas en CATIE.

A mi patria, Colombia, país de enormes riquezas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, todopoderoso, por darme la fuerza para continuar en la vida.

Al Dr. Muhammad Ibrahim, porque además de ser excelente consejero, es muy buen amigo. Gracias por la acertada dirección en la presente investigación.

A los Drs. Francisco Jiménez, Bryan Finegan y Donald Kass, miembros de comité, por su asesoría y grandes contribuciones para el mejoramiento del documento. Especialmente a Francisco, quien fue un excelente asesor y siempre mostró gran cordialidad.

A los Drs. Markku Kanninen y Eduardo Somarriba y al MSc. Alberto Camero, quienes aunque no participaron directamente en la investigación, sí me ofrecieron gran apoyo para culminar mis estudios de maestría.

Al Dr. Juan Antonio Aguirre, quien en su calidad de jefe de posgrado apoyó a los estudiantes con problemas de financiamiento.

A Frank López, quien con gentileza me ofreció valiosa ayuda con los análisis de laboratorio.

A Johnny Pérez, por su asesoría en el análisis estadístico de los datos.

A Paulo Dittel, Simón Soliz y José Luís Araya, por su apoyo en las labores de campo y laboratorio.

A todas aquellas personas que participaron de una u otra forma en alcanzar esta meta.

ANDRADE, H.J. 1999. Dinámica productiva de Sistemas Silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 70 p.

Palabras claves: *Brachiaria brizantha*, *B. decumbens*, *Panicum maximum*, materia seca, radiación fotosintéticamente activa (RAFA), eficiencia de uso de radiación (EUR), relación hoja/tallo, digestibilidad *in vitro* de materia seca (DIVMS), fibra detergente ácido (FDA), proteína cruda (PC), energía metabolizable, almacenamiento de carbono.

RESUMEN

Se estudiaron mezclas de árboles (*Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta*) con gramíneas mejoradas (*Brachiaria brizantha*, *B. decumbens* y *Panicum maximum*) para identificar la mejor combinación en Sistemas Silvopastoriles (SSP). El estudio se realizó en una finca privada en Guápiles, Costa Rica (125 msnm, precipitación anual promedio de 4560 mm, temperatura promedio de 24.6 °C y humedad relativa media de 87%). Se evaluó el SSP de árboles en línea (9 x 3 m) en pasturas. Las variables estudiadas fueron: la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) incidente, productividad y calidad nutricional de la pastura, producción de biomasa y almacenamiento de carbono en los SSP. Las parcelas se pastorearon por tres días, con una carga animal de 2 UA ha⁻¹, y 24 días de descanso.

Las especies arbóreas no influyeron en la RAFA incidente, ni la productividad de la pastura. Las distancias respecto a los árboles sí afectaron dichas variables, presentándose tres zonas de acuerdo al porcentaje de transmisión: alta sombra (20%), sombra intermedia (63%) y pleno sol (98%). Las pasturas redujeron su producción en sitios sombreados, *B. decumbens* presentó la menor reducción (24%), seguido de *P. maximum* (26%) y *B. brizantha* (37%). La producción anual de materia seca y de hojas de *P. maximum* superó la de *B. brizantha* y *B. decumbens* (34.8 vs. 19.2 vs. 14.0 t ha⁻¹año⁻¹ y 4.0 vs. 2.8 vs. 2.0 t ha⁻¹ciclo⁻¹, respectivamente). La EUR bajo sombra fue mayor a la encontrada a pleno sol; *P. maximum* fue la gramínea más eficiente, superando en 94 y 149% a *B. brizantha* y

B. decumbens (3.6 vs. 1.8 vs. 1.4 g MS MJ⁻¹, respectivamente). La mayor producción de las pasturas bajo sombra, comparada con monocultivos de gramíneas, demuestra la alta productividad de estos Sistemas Silvopastoriles.

Las gramíneas asociadas a *E. deglupta* presentaron la mejor calidad nutritiva, respecto a las establecidas con *A. mangium*: DIVMS (54.1 vs. 50.2%), FDA (42.2 vs. 45.1%) y PC (10.2 vs. 8.4%). En las áreas con sombra intermedia se produjo el forraje de mejor calidad nutritiva, en comparación con zonas a pleno sol y alta sombra. *B. decumbens* y *B. brizantha* fueron las gramíneas de mejor calidad nutricional, superando a *P. maximum*: DIVMS (55.8 vs. 54.6 vs. 46.1%), FDA (39.8 vs. 41.4 vs. 49.8%) y PC (10.2 vs. 10.4 vs. 7.1%). No obstante, *P. maximum* mostró las mayores producciones de EM y PC, en comparación con *B. brizantha* y *B. decumbens*: EM (12.2 vs. 5.9 vs. 4.0 Gcal ha⁻¹ ciclo⁻¹), PC (532.9 vs. 297.7 vs. 200.7 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹). *P. maximum* fue la gramínea de mejor comportamiento, esta especie se puede asociar con *A. mangium* o *E. deglupta* para establecer Sistemas Silvopastoriles altamente productivos y de buena calidad forrajera.

El contenido de carbono en la biomasa no varió con la especie arbórea, ni con la parte del árbol, siendo en promedio 46.5 % para *A. mangium* y 46.0 % para *E. deglupta*. La biomasa no fue afectada por los componentes del sistema, encontrándose desde 7.3 hasta 8.0 t MS ha⁻¹ de biomasa arbórea, y de 8.0 a 10.1 t MS ha⁻¹ en biomasa total. El almacenamiento y fijación de carbono presentó el mismo comportamiento que la biomasa, presentándose de 3.7 a 4.7 tC ha⁻¹ y de 1.8 a 2.3 tC ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Si el servicio de fijación de carbono en SSP se comercializara, se aumentarían los ingresos de los productores, lo que haría más atractivos estos sistemas de producción.

ANDRADE, H.J. 1999. Production dynamics of Silvopastoral Systems with *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* in the humid tropic. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 70 p.

Palabras claves: *Brachiaria brizantha*, *B. decumbens*, *Panicum maximum*, dry matter, photosynthetically active radiation (PAR), radiation use efficiency (RUE), leaf stem ratio, *in vitro* dry matter digestibility (IVDMD), acid detergent fiber (ADF), crude protein (CP), metabolizable energy (ME), carbon sequestration.

ABSTRACT

Mixtures of trees (*Acacia mangium* and *Eucalyptus deglupta*) with improved grasses (*Brachiaria brizantha*, *B. decumbens* and *Panicum maximum*) were studied to identify the best combination in Silvopastoral Systems (SPS). The study was carried out in a private farm located in Guápiles, Costa Rica (125 masl, annual average precipitation 4560 mm, average temperature 24.6 °C and relative humidity of 87%). The SPS evaluated consisted of a line of trees (9x 3 m) in pastures. The variables studied were: photosynthetically active radiation (PAR), productivity and nutritional quality of the grasses, production of biomass and storage of carbon in the SPS. All the plots were grazed for three days, with a stocking rate of 2 AU ha⁻¹, and a resting period of 24 days.

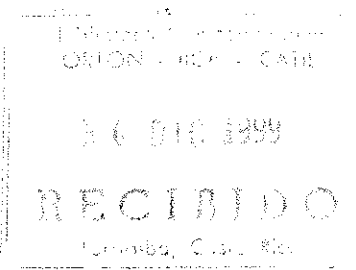
The tree species did not influence the incident PAR, nor the productivity of the pasture. However, distance from the trees had an effect on these variables. Three light transmission (percentage) zones were detected between the tree lines: high shade (20%), intermediate shade (63%) and full sun (98%). The production of the grasses was reduced in high shade zones, where *B. decumbens* showed the smallest reduction (24%), followed by *P. maximum* (26%) and *B. brizantha* (37%). The annual production of total dry matter and leaf dry matter of *P. maximum* was higher than of *B. brizantha* and *B. decumbens* (34.8 vs. 19.2 vs. 14.0 t ha⁻¹ year⁻¹ and 4.0 vs. 2.8 vs. 2.0 t ha⁻¹ cycle⁻¹, respectively). The RUE in shade was greater than in full sun; *P. maximum* was the most efficient species, exceeding by 94 and 149%, respectively the RUE of *B. brizantha* and *B. decumbens* (3.6 vs. 1.8 vs. 1.4

g DM MJ⁻¹). The greater production of the pasture species under shade conditions, in comparison with monoculture of native grasses, show the productivity of these SPS.

The grass species associated with *E. deglupta* showed better nutritional quality than when associated with *A. mangium*: IVDMD (54.1 vs. 50.2%), ADF (42.2 vs. 45.1%) and CP (10.2 vs. 8.4%). The forage produced in intermediate shade zones was of better nutritional quality, in comparison to full sun and high shades. *B. decumbens* and *B. brizantha* were the grasses of better nutritional quality, exceeding *P. maximum*: IVDMD (55.8 vs. 54.6 vs. 46.1%), ADF (39.8 vs. 41.4 vs. 49.8%) and CP (10.2 vs. 10.4 vs. 7.1%). Nevertheless, *P. maximum* showed the greatest production of ME and CP, exceeding *B. brizantha* and *B. decumbens*, respectively: ME (12.2 vs. 5.9 vs. 4.0 Gcal ha⁻¹ cycle⁻¹), CP (532.9 vs. 297.7 vs. 200.7 kg ha⁻¹ cycle⁻¹). *P. maximum* was the best grass species, which can be associated with either *A. mangium* or *E. deglupta* for the establishment of SPS of high productivity and nutritional quality.

The contents of carbon in the biomass did not vary with the tree species, nor with the part of the tree, being on the average 46.5% for *A. mangium* and 46.0% for *E. deglupta*. The biomass was not affected by the components of the systems, with values of 7.3 to 8.0 t DM ha⁻¹ in tree biomass, and of 8.0 to 10.1 t DM ha⁻¹ in total biomass. The storage and fixation of carbon showed the same trends as with the biomass, with values of 3.7 to 4.7 tC ha⁻¹ and of 1.8 to 2.3 tC ha⁻¹ year⁻¹, respectively. If the carbon fixation service of the SPS was marketed, the revenues of the producers would be increased, making these production systems more attractive.

CONTENIDO



DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
CONTENIDO	ix
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GENERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. HIPÓTESIS	5
4. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1. SISTEMAS SILVOPASTORILES	6
4.2. INTERACCIONES EN SISTEMAS SILVOPASTORILES	6
4.2.1. Alteración de la radiación incidente por los árboles	6
4.2.2. Efecto de las leñosas perennes sobre la productividad de la pastura	8
4.2.3. Efecto de las leñosas perennes sobre la calidad nutricional de la pastura	8
4.3. ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN POR LAS PLANTAS	9
4.4. LA RADIACIÓN SOLAR EN PASTURAS	10
4.5. ESPECIES DE PASTURAS PARA AMBIENTES SOMBREADOS	10
4.6. FIJACIÓN DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES	11
4.6.1. Calentamiento global	11
4.6.2. Actividades para mitigar el efecto invernadero	12
4.7. DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO	14
4.7.1. <i>Acacia mangium</i>	14
4.7.2. <i>Eucalyptus deglupta</i>	14
4.7.3. <i>Brachiaria brizantha</i>	15
4.7.4. <i>Brachiaria decumbens</i>	16
4.7.5. <i>Panicum maximum</i>	16
5. MATERIALES Y MÉTODOS	18
5.1. ÁREA DE ESTUDIO	18
5.1.1. Localización	18
5.1.2. Clima	18

5.1.3.	Radiación solar	18
5.1.4.	Suelos	19
5.2.	<i>ESTABLECIMIENTO DEL ENSAYO</i>	19
5.3.	<i>DISEÑO EXPERIMENTAL</i>	20
5.3.1.	Radiación fotosintéticamente activa y producción de materia seca	20
5.3.2.	Calidad nutricional de las pasturas	21
5.3.3.	Producción de biomasa y almacenamiento de carbono	21
5.4.	<i>VARIABLES EVALUADAS</i>	22
5.4.1.	Radiación fotosintéticamente activa (RAFA) incidente	22
5.4.2.	Producción de materia seca (MS)	23
5.4.3.	Producción de hojas	24
5.4.4.	Eficiencia de uso de radiación (EUR)	24
5.4.5.	Relación hoja/tallo	25
5.4.6.	Calidad nutricional	26
5.4.7.	Producción de proteína cruda y energía metabolizable	26
5.4.8.	Fracción de carbono	27
5.4.9.	Biomasa aérea de los árboles	28
5.4.10.	Biomasa residual de la pastura	28
5.4.11.	Carbono almacenado arriba del suelo	29
5.5.	<i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</i>	29
6.	RESULTADOS	31
6.1.	<i>RAFA INCIDENTE</i>	31
6.2.	<i>PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA</i>	32
6.3.	<i>PRODUCCIÓN DE HOJAS</i>	35
6.4.	<i>RELACIÓN ENTRE RAFA INCIDENTE Y PRODUCTIVIDAD DE LA PASTURA</i>	35
6.5.	<i>EFICIENCIA DE USO DE RADIACIÓN (EUR)</i>	36
6.6.	<i>RELACIÓN HOJA/TALLO</i>	38
6.7.	<i>DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE MATERIA SECA (DIVMS)</i>	39
6.8.	<i>FIBRA DETERGENTE ÁCIDO (FDA)</i>	40
6.9.	<i>PROTEÍNA CRUDA (PC)</i>	41
6.10.	<i>PRODUCCIÓN DE ENERGÍA METABOLIZABLE (EM) Y DE PROTEÍNA CRUDA (PC)</i>	41
6.11.	<i>FRACCIÓN DE CARBONO EN LA MADERA DE LAS ESPECIES ARBÓREAS</i>	43
6.12.	<i>ALTURA TOTAL Y DAP DE LAS ESPECIES ARBÓREAS</i>	44
6.13.	<i>BIOMASA ARBÓREA</i>	45
6.14.	<i>BIOMASA TOTAL</i>	45
6.15.	<i>CARBONO ALMACENADO</i>	46
7.	DISCUSIÓN	48
7.1.	<i>RAFA INCIDENTE</i>	48
7.2.	<i>PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA</i>	48
7.3.	<i>PRODUCCIÓN DE HOJAS</i>	49

7.4.	<i>RELACIÓN ENTRE RAFA INCIDENTE Y PRODUCTIVIDAD DE LA PASTURA</i>	49
7.5.	<i>EFICIENCIA DE USO DE RADIACIÓN (EUR)</i>	50
7.6.	<i>RELACIÓN HOJA/TALLO</i>	51
7.7.	<i>DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE MATERIA SECA (DIVMS)</i>	51
7.8.	<i>FIBRA DETERGENTE ÁCIDO (FDA)</i>	52
7.9.	<i>PROTEÍNA CRUDA (PC)</i>	53
7.10.	<i>PRODUCCIÓN DE ENERGÍA METABOLIZABLE (EM) Y DE PROTEÍNA CRUDA</i>	53
7.11.	<i>FRACCIÓN DE CARBONO EN LA MADERA DE LAS ESPECIES ARBÓREAS</i>	54
7.12.	<i>ALTURA TOTAL Y DAP DE LAS ESPECIES ARBÓREAS</i>	54
7.13.	<i>BIOMASA ARBÓREA</i>	54
7.14.	<i>BIOMASA TOTAL Y CARBONO ALMACENADO</i>	55
8.	CONCLUSIONES	56
9.	RECOMENDACIONES	58
10.	REFERENCIAS	59
	ANEXOS	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Grado de tolerancia a la sombra de algunas especies de gramíneas y leguminosas.	11
Cuadro 2.	Sistemas Agroforestales en Centroamérica como sumideros de carbono en su biomasa aérea.	13
Cuadro 3.	Correlación entre producción de MS y RAFA incidente para tres pasturas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	37
Cuadro 4.	Ecuaciones que relacionan la producción de MS con la RAFA, para tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	38
Cuadro 5.	Contenido de carbono para biomasa de dos especies arbóreas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	44
Cuadro 6.	Modelos de regresión para estimar la biomasa aérea con base en su altura y dap en dos especies arbóreas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	45

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1.	Promedios mensuales de precipitación y radiación global, Estación Experimental "Los Diamantes", Guápiles, Costa Rica.	19
Figura 2.	Plano descriptivo de la parcela principal.	21
Figura 3.	Efecto de la posición y la época sobre la RAFA incidente en la pastura en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	32
Figura 4.	Producción comparada de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	33
Figura 5.	Dinámica productiva de a) <i>B. brizantha</i> , b) <i>B. decumbens</i> y c) <i>P. maximum</i> en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	34
Figura 6.	Efecto de la posición sobre la producción de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	35
Figura 7.	Efecto de la posición respecto a la línea de árboles sobre la producción de hojas de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	36
Figura 8.	Efecto de la RAFA incidente sobre la producción de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	37
Figura 9.	Eficiencia de uso de radiación (EUR) para tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	38
Figura 10.	Relación hoja/tallo para tres gramíneas en SSP con <i>A. mangium</i> y <i>E. deglupta</i> , Guápiles, Costa Rica, 1999.	39
Figura 11.	Efecto de a) Árboles, b) Gramíneas y c) Posición sobre la calidad nutritiva de gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	40
Figura 12.	Efecto de especies arbóreas, gramíneas y posición respecto a árboles sobre el contenido de PC de gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	42
Figura 13.	Producción de MS y EM de gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	42
Figura 14.	Producción de MS y PC de gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	43
Figura 15.	DAP y Altura de árboles de <i>A. mangium</i> y <i>E. deglupta</i> en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	44
Figura 16.	Producción de biomasa aérea en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	46
Figura 17.	Almacenamiento de carbono en biomasa aérea en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.	47

1. INTRODUCCIÓN

La producción ganadera es una actividad importante a nivel mundial, Brewbaker (1986) afirma que las áreas en pastos comprenden más de tres billones de hectáreas. Los incentivos y el alto precio de la carne de ganado bovino impulsaron una acelerada deforestación en busca de nuevas áreas para esta actividad. Según Ciesla (1996), se deforestó en la década de 1981-1990 a una tasa de 15.4 millones de hectáreas. Posteriormente, al terminarse los incentivos y bajar el precio de la carne, los ganaderos han visto reducidos sus ingresos, esto ha generado una sobreexplotación y degradación de los recursos. Se ha estimado que en el trópico húmedo, el 50% de las pasturas sembradas se encuentran en avanzado estado de degradación (Serrão 1988).

Los Sistemas Silvopastoriles son una opción productiva y desaceleradora del proceso de degradación observado en áreas ganaderas. En estos sistemas se presentan relaciones de interferencia y facilitación entre componentes (Pezo e Ibrahim 1998), una de las más importantes es la alteración de la radiación incidente a la pastura (Wilson *et al.* 1990; Cannell y Grace 1993; Tournebize y Sinoquet 1995; McIntyre *et al.* 1996). Las consecuencias del sombreado dependen de la especie herbácea, de la especie arbórea y de la densidad de árboles. En general, el mayor rendimiento de una pastura se alcanza en la zona intermedia del dosel, es decir, con densidades arbóreas intermedias (Molden 1987).

La intensidad de radiación solar que reciben las pasturas modifica la composición química del forraje (Eriksen y Whitney 1981); se han encontrado incrementos en el contenido de proteína cruda y disminución en el de carbohidratos no estructurales, conforme se disminuye la transmisión de luz (Wilson 1982; Bustamante 1991; Belsky *et al.* 1993; Carvalho *et al.* 1994; Zelada 1996). En cuanto al efecto de la sombra sobre la digestibilidad *in vitro* de materia seca (DIVMS), algunos autores afirman que la disminución de la radiación reduce la DIVMS (Deinum y Dirven

1974, citados por Pezo e Ibrahim 1998; Wilson 1982; Belsky *et al.* 1993), mientras que otros afirman lo contrario (Bustamante 1991; Kephart y Buxton 1993; Zelada 1996).

Uno de los problemas medioambientales más discutidos actualmente es la probabilidad de un cambio climático global y de sus posibles efectos. Los datos mundiales de clima indican que la temperatura media global a aumentado en aproximadamente 0.45°C desde mediados de siglo pasado (Ciesla 1996). Una de las causas de este fenómeno es la producción de CO₂ y otros gases como el metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonados por la actividad industrial y agrícola, el uso de combustibles fósiles y la deforestación (Detwiler y Hall 1988). La ganadería ha sido culpada de aportar grandes cantidades de metano a la atmósfera, ya que los bovinos y otros rumiantes producen este gas (Ciesla 1996); también la degradación de pasturas contribuye considerablemente al aumento del CO₂ atmosférico (Abarca 1996).

Por medio de la fotosíntesis, las plantas actúan como sumideros al absorber el CO₂, liberar oxígeno y retener el carbono en su biomasa, principalmente en la madera (FWPRDC 1996). Los bosques y Sistemas Agroforestales son sumideros importantes de carbono. Igualmente, las pasturas mejoradas podrían estar secuestrando en el suelo cantidades similares (Fisher *et al.* 1994). En tal sentido, los Sistemas Silvopastoriles son una forma de uso de la tierra, que brinda este tipo de servicios ambientales, trayendo consecuencias positivas para el clima mundial y para el productor, en caso de comercializar dicho servicio.

Acacia mangium y *Eucalyptus deglupta* son dos árboles de uso múltiple, bien adaptados a regiones tropicales húmedas y contrastantes en cuanto a la estructura de sus doseles. *A. mangium* es un árbol de copa más cerrada y que puede contribuir al mejoramiento de la fertilidad del suelo (Velasco *et al.* 1999). *E. deglupta* posee un dosel más abierto, de menor número y tamaño de hojas,

aspectos que permiten mayor transmisión de luz al estrato herbáceo (CATIE 1992; CATIE 1994).

Las gramíneas B. brizantha y B. decumbens están ampliamente distribuidas en el trópico (FAO 1992). Son especies fundamentalmente de los trópicos húmedos, pero poseen buena tolerancia a la sequía, adaptada a una estación seca de cuatro a cinco meses y a suelos ácidos; y poseen mediana tolerancia a la sombra (Shelton *et al.* 1987). *P. maximum* es una gramínea frecuentemente utilizada en sistemas ganaderos en el trópico húmedo (Flores 1985). Durante los últimos años, el CIAT ha evaluado diferentes accesiones de *P. maximum* y brachiarias para seleccionar especies más productivas, que se adapten a estas condiciones ecológicas y en el caso de brachiarias que sean tolerantes a salivazo (Vallejos 1988).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la dinámica productiva de Sistemas Silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1. Estimar el efecto de *A. mangium* y *E. deglupta* sobre la radiación fotosintéticamente activa incidente, la producción de materia seca y la eficiencia de uso de radiación de *Brachiaria brizantha*, *B. decumbens* y *Panicum maximum*.
- 2.2.2. Estudiar el comportamiento nutricional de *B. brizantha*, *B. decumbens* y *P. maximum* en Sistemas Silvopastoriles con *A. mangium* y *E. deglupta*.
- 2.2.3. Determinar la fracción de carbono en la madera de *A. mangium* y *E. deglupta* y cuantificar el secuestro de carbono en biomasa aérea en Sistemas Silvopastoriles con *B. brizantha*, *B. decumbens* y *P. maximum* en el trópico húmedo.

3. HIPÓTESIS

- 3.1. Las especies arbóreas (*A. mangium* y *E. deglupta*) afectan diferencialmente la radiación fotosintéticamente activa incidente, la producción de materia seca y la eficiencia de uso de radiación de *B. brizantha*, *B. decumbens* y *P. maximum*.
- 3.2. La calidad nutricional de *B. brizantha*, *B. decumbens* y *P. maximum* se ve afectada por la especie arbórea (*A. mangium* y *E. deglupta*) a la cual está asociada.
- 3.3. La fracción de carbono en la madera de *A. mangium* y *E. deglupta* y el secuestro de carbono en biomasa aérea de los Sistemas Silvopastoriles se ven influenciados por los componentes del mismo.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. SISTEMAS SILVOPASTORILES

Un Sistema Silvopastoril es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de leñosas perennes (árboles o arbustos), e interactúa con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales), todos ellos bajo un sistema de manejo integral (Somarriba 1992; Pezo e Ibrahim 1996).

Dentro de este tipo de sistemas de producción se puede incluir las cercas vivas, los bancos forrajeros de leñosas perennes, leñosas perennes en callejones ("Alley Farming"), árboles y arbustos dispersos en potreros, pastoreo en plantaciones de árboles maderables o frutales, leñosas perennes sembradas como barreras vivas y cortinas rompevientos (Nair 1993; Pezo e Ibrahim 1998).

4.2. INTERACCIONES EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

En los sistemas de producción silvopastoriles se presentan relaciones de interferencia y de facilitación. La competencia por radiación lumínica, por agua y por nutrientes, así como las posibles relaciones alelopáticas entre componentes, son manifestaciones de interferencia. En cambio, la fijación y transferencia de nutrientes, conservación de suelos, y el efecto de protección contra el viento que pueden ejercer las leñosas perennes, son ejemplos de facilitación (Ong 1996; Pezo e Ibrahim 1998).

4.2.1. Alteración de la radiación incidente por los árboles

Según Jackson y Palmer (1987) el área de terreno de producción del cultivo (pastura), que puede estar sombreado en algún grado por los árboles es considerado como la interfase árbol-cultivo. La ecuación que define la proporción de luz transmitida (T) al cultivo es:

$$T = T_f + F_{max} e^{-KL'}$$

Donde

T_f	Fracción de la luz disponible que podría alcanzar los cultivos si los árboles fueran totalmente no transmisores (ej. sólido y opaco)
F_{max}	Es la fracción de la luz disponible que podría ser interceptada por los árboles si ellos fueron no transmisores
L'	Es el índice de área foliar del árbol dividido en F_{max}
K	Coefficiente de extinción del dosel del árbol

Esta ecuación puede ser aplicada a un sistema agroforestal de cualquier nivel de complejidad. Esta es usada con relación a tres distintos tipos de sistema, los dos primeros estando definidos en sus formas extremas:

- Sistemas multiestrato: En los cuales los árboles forman un dosel cerrado a través del cual la luz penetra el cultivo bajero. La separación entre árbol y cultivo es primariamente en dimensión vertical. El término T_f de la ecuación es cero, F_{max} es 1 y la transmisión de luz al cultivo será controlada por la sumatoria vertical del índice de área foliar del árbol y su coeficiente de extinción K .
- Sistemas en líneas y callejones: Donde hileras o setos de árboles muy densos que permite crecimiento de cultivo bajo ellos, están separados por un callejón libre en el cual los cultivos pueden estar creciendo. En este caso $T = T_f$, debido a que efectivamente no hay transmisión a través de los árboles. La energía lumínica disponible a los cultivos es una función del patrón de sombra proyectado por los setos o hileras de árboles, el cual a su turno es dependiente de la altura de los árboles, orientación de las hileras y tiempo (día y época).
- Sistemas intermedios: En los cuales la transmisión al cultivo es por la luz que pasa por los árboles juntos (T_f) y la luz que pasa a través del dosel (T_c). Es calculada como $F_{max} e^{-KL'}$.

4.2.2. Efecto de las leñosas perennes sobre la productividad de la pastura

El factor más limitante en la producción de las pasturas en Sistemas Silvopastoriles es la intensidad de sombra proporcionada por el componente arbóreo (Shelton *et al.* 1987). La magnitud del sombreado depende de la especie herbácea, de la especie arbórea y de la densidad de árboles. Se observa en general, que el mayor rendimiento de una pastura se alcanza en la zona media del dosel (sombra parcial), es decir, teniendo árboles a densidades intermedias dentro de pasturas se aumenta la productividad de éstas (Molden 1987). La respuesta de las gramíneas a cambios en la intensidad de radiación difiere entre especies.

En ausencia de otros tipos de estrés ambiental, tanto las leguminosas como las gramíneas parecen ser igualmente sensibles a la sombra (Ludlow *et al.* 1980). Sin embargo, a niveles bajos o moderados de nitrógeno, algunas gramíneas parecen ser menos susceptibles que las leguminosas; al parecer la baja intensidad de luz estimula la captación de nitrógeno y el crecimiento de las gramíneas, mientras que reduce el crecimiento de las leguminosas, debido a que se suprime la fijación de nitrógeno (Wong y Wilson 1980).

4.2.3. Efecto de las leñosas perennes sobre la calidad nutricional de la pastura

El sombreado también afecta la calidad nutritiva de los forrajes, pero en algunos casos esos efectos pueden estar mediados por cambios anatómicos o morfológicos que sufren las plantas (p.e. engrosamiento de la epidermis, elongación de tallos) (Pezo e Ibrahim 1998).

Shelton *et al.* (1987), mencionan que existen algunas evidencias que indican que la calidad se puede afectar negativamente por reducciones en la intensidad

lumínica, pero advierte que la mayor parte de estas experiencias se realizaron en laboratorios.

La intensidad de luz que reciben las pasturas modifica la composición química del forraje (Eriksen y Whitney 1981); diversos autores han encontrado incrementos en el contenido de proteína cruda y disminución en el de carbohidratos no estructurales, conforme se disminuye la transmisión de luz (Wilson 1982; Bustamante 1991; Belsky 1992; Carvalho *et al.* 1994; Zelada 1996). No hay consistencia en los resultados encontrados sobre el efecto de la sombra en la digestibilidad *in vitro* de materia seca (DIVMS), algunos autores afirman que la disminución de la radiación reduce la DIVMS (Deinum y Dirven 1974, citado por Pezo e Ibrahim 1998; Wilson 1982; Belsky 1992); otros afirman lo contrario (Bustamante 1991; Kephart y Buxton 1993; Zelada 1996).

Las respuestas de las gramíneas a cambios en la radiación se deben en parte a que no todas las especies responden de igual forma a la sombra. Bustamante (1991) estudió el efecto del asocio de *E. poeppigiana* sobre el comportamiento de ocho gramíneas tropicales, encontrando aumentos de la proteína cruda desde un 11.5% en *Pennisetum purpureum*, hasta un 32% en *Brachiaria brizantha* CIAT 664.

4.3. ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN POR LAS PLANTAS

De la radiación que incide sobre las hojas, una gran parte es absorbida: la mayor parte de la luz ultravioleta es retenida por la epidermis; solamente un 2 a 5% de esta radiación penetra a las capas más profundas de la hoja. La absorción de radiación fotosintéticamente activa es determinada por los pigmentos de los cloroplastos, clorofila a y b y los carotenos. Cerca del 70% de esta radiación que entra al mesófilo es absorbida por los cloroplastos (Larcher 1975).

Las clorofilas a y b presentan la absorción máxima en la región azul-violeta, con picos aproximados en los 429 y 453 nm, respectivamente, y con picos de menor importancia en 410 y 430 nm. La absorción máxima de estos importantes pigmentos fotosintéticos da idea de la calidad de luz más efectiva en el proceso fotosintético (Monteith 1965).

4.4. LA RADIACIÓN SOLAR EN PASTURAS

La mayoría de las especies forrajeras tropicales son plantas de "sol" y el sistema fotosintético de las gramíneas C_4 no se satura ni con la máxima radiación solar. Sin embargo, tanto las gramíneas como las leguminosas tropicales pueden adaptarse a niveles bajos de luz. *Panicum maximum*, por ejemplo, puede comportarse como planta de sombra (Ludlow y Wilson 1970). Las plantas que crecen en sombra sufren cambios morfológicos como mecanismos de adaptación a la baja disponibilidad de luz; esta adaptación incluye aumento en el índice de área foliar, mejor distribución del área foliar en altura, coeficientes de extinción de luz más bajos y reducción en la tasa de respiración (Wong y Wilson 1980).

4.5. ESPECIES DE PASTURAS PARA AMBIENTES SOMBREADOS

Shelton *et al.* (1987), resaltan que las principales aproximaciones en la identificación de nuevas especies tienen que tener en cuenta la posterior puesta a la venta del producto comercial y la evaluación de su tolerancia ante situaciones de sombra fortuitas (Cuadro 1).

En los Sistemas Silvopastoriles, la producción de la pastura se ve fuertemente influenciada por el tipo de especie arbórea a la que se asocia. Una pastura de *Cynodon plectostachyus* asociada a *Erythrina poeppigiana* obtuvo un 76% más de rendimiento que en monocultivo, y un 105% más que asociada a *Cordia alliodora*; con la introducción de *C. alliodora* en la pastura se redujo el rendimiento del pasto

en un 14%, pero esto es compensado por la producción de madera (Bronstein 1984).

Cuadro 1. Grado de tolerancia a la sombra de algunas especies de gramíneas y leguminosas.

Tolerancia a la sombra	Especies gramíneas	Especies leguminosas
Alta	<i>Axonopus compressus</i> <i>Brachiaria milliformis</i> <i>Ischaemum aristatum</i> <i>Ischaemum timorense</i> <i>Ottochloa nodosum</i> <i>Paspalum conjugatum</i> <i>Stenotaphrum secundatum</i>	<i>Calopogonium caeruleum</i> <i>Desmodium heterophyllum</i> <i>Desmodium intortum</i> <i>Desmodium ovalifolium</i> <i>Flemingia congesta</i> <i>Mimosa pudica</i>
Media	<i>Brachiaria brizantha</i> <i>Brachiaria decumbens</i> <i>Brachiaria humidicola</i> <i>Imperata cylindrica</i> <i>Panicum maximum</i>	<i>Centrosema pubescens</i> <i>Desmodium canum</i> <i>Leucaena leucocephala</i> <i>Macroptilium axillare</i> <i>Neonotonia wightii</i> <i>Pueraria phaseoloides</i> <i>Vigna luteola</i>
Baja	<i>Brachiaria mutica</i> <i>Digitaria decumbens</i>	<i>Calopogonium mucunoides</i> <i>Macroptilium atropurpureum</i> <i>Stylosanthes guianensis</i>

Fuente: Shelton *et al.* 1987

4.6. FIJACIÓN DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

4.6.1. Calentamiento global

Los datos climáticos mundiales, en las dos últimas décadas, indican que la temperatura del aire de la superficie terrestre ha superado los valores máximos de 1930. Esta oleada de calor se extendió en los hemisferios septentrional y meridional y ha resultado en un aumento de la temperatura media global de aproximadamente 0.45°C desde mediados de siglo pasado (Ciesla 1996).

Este aumento de la temperatura mundial se debe, en gran parte, a los efectos de los gases radioactivos o a los gases de efecto de invernadero. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se incrementó aproximadamente de 280 partes por millón (ppm) en 1750 a 345 ppm en 1984. Una de las causas de este fenómeno es la producción de CO₂ y otros gases como el metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonados por la actividad industrial y agrícola, el uso de combustibles fósiles y la deforestación (Detwiler y Hall 1988). La ganadería ha sido culpada de aportar grandes cantidades de metano a la atmósfera, ya que los bovinos y otros rumiantes producen este gas (Ciesla 1996); igualmente, las pasturas degradadas emiten cantidades considerables de CO₂ a la atmósfera (Abarca 1996).

4.6.2. Actividades para mitigar el efecto invernadero

Por medio de la fotosíntesis, las plantas actúan como sumideros al absorber el CO₂, liberar oxígeno y retener el carbono en su biomasa, principalmente en la madera (FWPRDC 1996). Cuando los árboles mueren el carbono se desprende, parte de éste se integra a la materia orgánica del suelo, lo restante es liberado a la atmósfera en forma de CO₂, pero también como metano y otros gases de efecto de invernadero, por tal motivo los bosques pueden ser sumideros y fuentes de carbono (Chaturveni 1994; Ciesla 1996).

La capacidad promedio de secuestro de carbono en el trópico americano es de 60 tC ha⁻¹ (Houghton *et al.* 1991), y para agroforestería de 95 tC ha⁻¹ (Winjum *et al.* 1992). Igualmente, las pasturas mejoradas podrían estar secuestrando cantidades que varían de 100 a 507 Mt C año⁻¹, la mayor parte del cual se ubica en las capas más profundas del perfil del suelo, más allá de la capa arable. *Brachiaria humidicola* y *Andropogum gayanus* contribuyen con mucho más carbono al contenido del suelo que los pastos nativos, especialmente al asociarse a alguna leguminosa (Fisher *et al.* 1994). En tal sentido, los Sistemas Silvopastoriles son una forma de uso de la tierra, que ofrece este tipo de servicios ambientales,

trayendo consecuencias positivas para el clima mundial y el productor, en caso de comercializar dicho servicio.

Los Sistemas Agroforestales no sólo actúan como sumideros de carbono, sino que también evitan el agotamiento de los sumideros ya existentes, al reducir la presión sobre los bosques. Al convertir la madera en muebles o usarla en construcción, ésta actúa como depósito de carbono hasta su descomposición completa, que puede ser muchos años (Dixon 1995). En algunos Sistemas Agroforestales en Centroamérica se han estimado tasas de fijación de carbono que varían desde 0.1 a 3.6 tC ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 2). La fijación de carbono está en función directa del crecimiento en biomasa de una plantación, ya que es aceptado que un 50% de la biomasa está constituido por este elemento (Brown y Lugo 1984; IPCC 1996).

Cuadro 2. Sistemas Agroforestales en Centroamérica como sumideros de carbono en su biomasa aérea.

Sistema Agroforestal Especie	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Rotación (años)	Producción leña (t ha ⁻¹)	Tasa fijación (tC ha ⁻¹ año ⁻¹)	Fijación (tC ha ⁻¹)
Arboles de sombra					
<i>Gliricidia sepium</i>	330	30	101.4	0.7	51.6
<i>Inga densiflora</i>	400	20	42.8	0.5	24.3
<i>Mimosa scabrella</i>	650	2	18.3	2.0	24.9
Plantaciones para leña					
<i>Leucaena leucocephala</i>	3800	5	46.2	2.0	28.9
<i>Eucalyptus saligna</i>	1378	2.5	41.3	3.6	27.0
Bosque secundario					
<i>Miconia lonchophylla</i>	3400	8	54.0	1.4	31.0
<i>Lonchocarpus spp.</i>	7300	3	27.8	2.0	17.9
<i>Lonchocarpus spp.</i>	3400	3	10.6	0.8	7.6
<i>Cassia grandis</i>	1700	3	21.2	1.6	12.3
<i>Guazuma ulmifolia</i>	28250	4	5.2	0.3	5.8
Arboles en potreros					
<i>Alnus acuminata</i>	35	30	18.3	0.1	25.0

Fuente: Kursten y Burschel 1993.

4.7. DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO

4.7.1. *Acacia mangium*

Acacia mangium es conocido en América Central como "mangium" o "acacia", perteneciente a la familia de las Leguminosae (CATIE 1992). Esta especie es originaria del noreste de Australia en la pequeña área de Queensland, de una porción del suroeste de Nueva Guinea y las Islas Molucas al este de Indonesia. Hoy en día es cultivada en Sabah y Malasia, en donde se han sembrado 200 mil ha principalmente con esta especie (Cannon 1994).

El fuste de este árbol es recto y libre de ramas hasta las dos terceras partes de su altura total. Presenta filodios simples y de borde entero. Las flores se presentan en espigas, son pequeñas, blancas o de color crema. Los frutos son vainas angostas y de 10 cm de largo, retorcidas; las semillas de color negro, de 3 a 5 mm de longitud y de testa dura (CATIE 1992).

La especie *A. mangium* es un árbol de zonas bajas, cálidas, en sus orígenes (Queensland, Australia) no se encuentra por encima de los 750 msnm; y crece con temperaturas desde 12°C hasta los 34°C y precipitaciones de 1500 a 4500 mm año⁻¹ (Cannon 1994). En América Central fue introducida desde 1979, a nivel de investigación y a nivel mayor, sólo a partir de 1984, en Costa Rica, Panamá y Honduras (CATIE 1992).

4.7.2. *Eucalyptus deglupta*

Eucalyptus deglupta en América Central es llamado comúnmente eucalipto deglupta, eucalipto o deglupta y pertenece a la familia Myrtaceae (Luján *et al.* 1996).

El tronco de esta especie es generalmente recto y cilíndrico, libre de ramas muertas; las gambas son frecuentes. La corteza es delgada y su caída ocurre por sectores longitudinales. La copa es moderadamente abierta, posee hojas horizontales, que facilita una mejor captación de luz. Las hojas son pecioladas, opuestas, pero cuando maduran son alternas, de un color verde pálido, ovadas, lanceoladas hasta acuminadas. Las pequeñas y numerosas flores son blancas presentándose en umbelas que forman panículas terminales y axiales. El fruto es una cápsula pedicelada, ovoide o globosa. Se ha observado que es una especie que florece y fructifica a una edad muy temprana (Grijpma 1969). El sistema radical de este eucalipto varía según las condiciones edáficas y de competencia del sitio (Davidson 1973, citado por Luján *et al.* 1996).

Este árbol es una especie de climas húmedos, ya que es originaria de Papúa Nueva Guinea, parte de Indonesia y Filipinas, en donde la precipitación varía de 2000 a 5000 mm año⁻¹ y las temperaturas de 24 a 32 °C. Para su desarrollo óptimo requiere por lo menos de 100 mm de precipitación en el mes más seco (FAO 1981). En Costa Rica crece en forma satisfactoria desde el nivel del mar hasta los 1500 msnm en los alrededores del Valle Central (Luján *et al.* 1996). En sitios donde el viento es muy fuerte, este árbol tiene un crecimiento menor y una forma asimétrica (CATIE 1994).

4.7.3. *Brachiaria brizantha*

Esta especie de gramínea conocida como "Saint Lucia grass" (Queensland), estrella de Africa, pasto alambre (América Latina); es nativa de Africa tropical, pero actualmente introducida en la mayor parte de los países tropicales. Es una planta perenne hasta los 120 cm de alto, con gruesas cañas erectas y limbos foliares ampliamente lanceolados. Posee de 2 a 8 racimos de hasta 15 cm de largo con dos hileras de superposición casi sésil; en la parte inferior, espiguillas redondeadas de 4 a 6 mm de largo (FAO 1992).

B. brizantha crece bien desde el nivel del mar hasta los 3000 m de altitud, requiere precipitaciones superiores a los 500 mm año⁻¹ y es bastante tolerante a la sequía. Su temperatura óptima de crecimiento está entre 30 y 35°C, y sobrevive a las heladas (FAO 1992).

En un experimento para la evaluación de ecotipos forrajeros en la Zona Atlántica de Costa Rica (bht), se evaluaron 190 accesiones de brachiaria, donde *B. brizantha* cv. Marandú presentó 4315 Kg MS ha⁻¹, relación hoja/tallo de 1.35 g g⁻¹, PC en hojas igual al 13% y DIVMS de hojas de 59.5%, resultados provenientes de un total de seis cortes con intervalos de 42 días (CIAT 1988).

4.7.4. *Brachiaria decumbens*

La gramínea *Brachiaria decumbens* es conocida como "Signal grass" (Australia), "Suriname grass" (Jamaica) es oriunda de Africa y hoy ampliamente difundida en los trópicos y subtrópicos. Es una planta perenne rastrera de 30 a 60 cm de alto, con limbos foliares muy lanceolados de 8 a 10 cm de ancho. Posee de 2 a 5 racimos, con una longitud de 2 a 5 cm; raquis de cilios anchos y espiguillas de 4 mm de largo. Los tallos erectos surgen de una larga base estolonífera y se enraízan en los nódulos inferiores, lo que crea un pasto denso (FAO 1992).

Esta especie es fundamentalmente de los trópicos húmedos, pero posee buena tolerancia a la sequía, adaptada a una estación seca de cuatro a cinco meses, prefiere 1500 mm año⁻¹ de lluvia o más. Crece hasta los 1750 msnm. Su temperatura óptima de crecimiento está entre 30 a 35°C (FAO 1992).

4.7.5. *Panicum maximum*

Esta especie gramínea es conocida en Australia y Estados Unidos como "Guinea grass", en Perú como "Pasto Guinea", es originaria de Africa tropical. Es una planta perenne que forma macollas, a menudo con rizoma poco rastrero, altura

variable de 60 a 200 cm, limbos foliares de hasta 35 mm de ancho que van reduciéndose para terminar en puntas finas. Las inflorescencias son panículas de 12 a 40 cm de altura; con espiguillas abiertas de 3 a 3.5 mm de longitud, obtusas, en su mayoría rojo púrpuras; glumas desiguales, la inferior de un tercio a un cuarto del tamaño de la espiguilla; flósculo inferior a menudo masculino; flósculo superior con arrugas transversales muy definidas (FAO 1992).

Panicum maximum crece bien desde el nivel del mar hasta los 2500 msnm. Requiere precipitaciones con frecuencia superiores a los 1000 mm año⁻¹, y no tolera sequías intensas, ni inundaciones. La temperatura promedio óptima para su crecimiento está entre 19.1 y 22.9 °C (FAO 1992). Crece bien en suelos secos de cualquier textura, incluso en suelos arenosos o ácidos que no sean pantanosos, aunque para producir buen forraje requiere de suelos fértiles. Rinde de 50 a 80 toneladas de hierba fresca cortándose cada 4 a 8 semanas en temporada lluviosa. Resiste el pastoreo y es muy apetecida por el ganado; conteniendo de 5 a 8% de proteína cruda (Flores 1985).

Este pasto puede comportarse como una planta de sombra, es decir, adaptarse a niveles bajos de luz (Veenendaal *et al.* 1993). En combinación con *Casuarina equisetifolia*, se han encontrado buenos niveles de crecimiento y productividad de esta pastura (Mathew *et al.* 1992). A pesar de la disminución en la producción de materia seca, esta pastura sostiene altos niveles bajo condiciones de sombra moderada (Zelada 1996).

Algunos ecotipos de *P. maximum* se caracterizan por su alta producción de materia seca, como el ecotipo CIAT 16061 con 57 t ha⁻¹ año⁻¹ y el CIAT 16051 con 46.8 t ha⁻¹ año⁻¹ (Veiga y Serrao 1987).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. ÁREA DE ESTUDIO

5.1.1. Localización

El experimento se realizó en la finca "Las Delicias", propiedad del Sr. Federico Rojas, localizada en Guápiles, Zona Atlántica de Costa Rica (10°09' Lat. N.; 83°38' Long. O.; 125 msnm). La zona se clasifica como bosque tropical lluvioso (Cockrane 1982).

5.1.2. Clima

La temperatura media anual es de 24.6 °C, con promedios anuales de máxima y mínima de 26.9 °C y 17.8 °C, respectivamente. La humedad relativa tiene un promedio de 87%, con una variación mensual de $\pm 3\%$. La precipitación media anual es de 4560 mm, donde el 70% cae en los meses de junio a diciembre; y en febrero y marzo (período menos lluvioso) llueven 431 mm aproximadamente (Figura 1). El brillo solar promedio es 4 h día⁻¹, la nubosidad durante los meses de invierno lo reduce a 3.5 horas y se aumenta a 4.5 en los meses de diciembre a mayo (Zelada 1996).

5.1.3. Radiación solar

La radiación solar global varía a lo largo del año entre 13 y 17 MJ m⁻² día⁻¹. La mayor radiación ocurre entre febrero y mayo y septiembre (16.7 MJ m⁻² día⁻¹) que corresponden a meses de baja precipitación. En los meses más lluviosos se registra una radiación entre 13 y 14 MJ m⁻² día⁻¹ (Zelada 1996) (Figura 1).

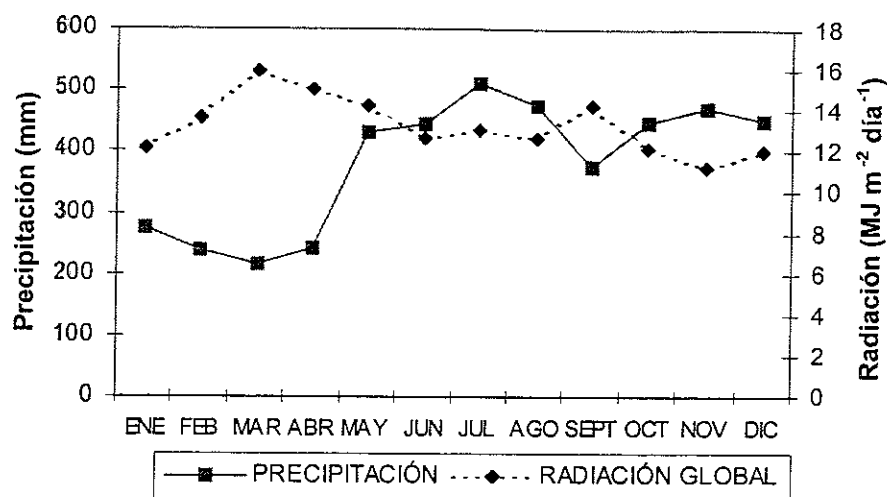


Figura 1. Promedios mensuales de precipitación y radiación global. Estación Experimental "Los Diamantes", Guápiles, Costa Rica.

5.1.4. Suelos

Los suelos de esta zona se clasifican como Typic Dystropept, correspondiente a la asociación Germania. Se localizan en terrenos ligeramente ondulados a ondulados. Son suelos moderadamente profundos a profundos; con textura moderadamente fina a fina, de color pardo oscuro a pardo amarillento oscuro y pardo amarillento en el subsuelo. El suelo es de permeabilidad moderada y fertilidad baja a media (MAG 1991).

5.2. ESTABLECIMIENTO DEL ENSAYO

Se preparó con maquinaria un terreno de 3 ha, para establecer el ensayo. Los árboles fueron sembrados en septiembre de 1997, con plántulas provenientes de bolsas y aplicando aproximadamente 70 g de fertilizante 10-30-10 al hoyo. El distanciamiento de las especies arbóreas fue de 9 x 3 m. En cada parcela se establecieron seis hileras de árboles con una longitud de 33 m, con dirección 40° ES, quedando cada unidad experimental con cinco callejones; alrededor de cada

parcela se dejó como borde 3 m, hasta el próximo árbol. Las gramíneas fueron sembradas con semilla sexual entre junio y septiembre de 1998. En total se establecieron 18 unidades experimentales, las cuales fueron sometidas a pastoreo durante tres días, con una carga animal de 2 UA ha⁻¹, y un período de descanso de 24 días.

5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

5.3.1. Radiación fotosintéticamente activa y producción de materia seca

Se realizaron dos experimentos; en el primero se estudió el efecto de la especie arbórea y de la posición respecto a la línea de árboles sobre la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) incidente en la pastura. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas subdivididas en franjas, con tres repeticiones. Las parcelas principales son las especies arbóreas (*A. mangium* y *E. deglupta*), las subparcelas corresponden a distancias desde la línea de árboles (A, B, C, D, E, F) y las subsubparcelas son las épocas de evaluación (marzo, mayo y julio) (Figura 2).

En el segundo experimento se estudió el efecto de los árboles y la posición respecto a ellos sobre la producción de forraje de gramíneas. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas subdivididas en franjas, con tres repeticiones. Las parcelas principales están formadas por un arreglo factorial de los dos árboles con tres gramíneas (*B. brizantha* CIAT 6780, *B. decumbens* cv. Pasto peludo y *P. maximum* CIAT 6177), las subparcelas son posiciones respecto a la línea de árboles, y las sub-subparcelas son los ciclos de pastoreo (abril, mayo, junio, julio y agosto) (Figura 2).

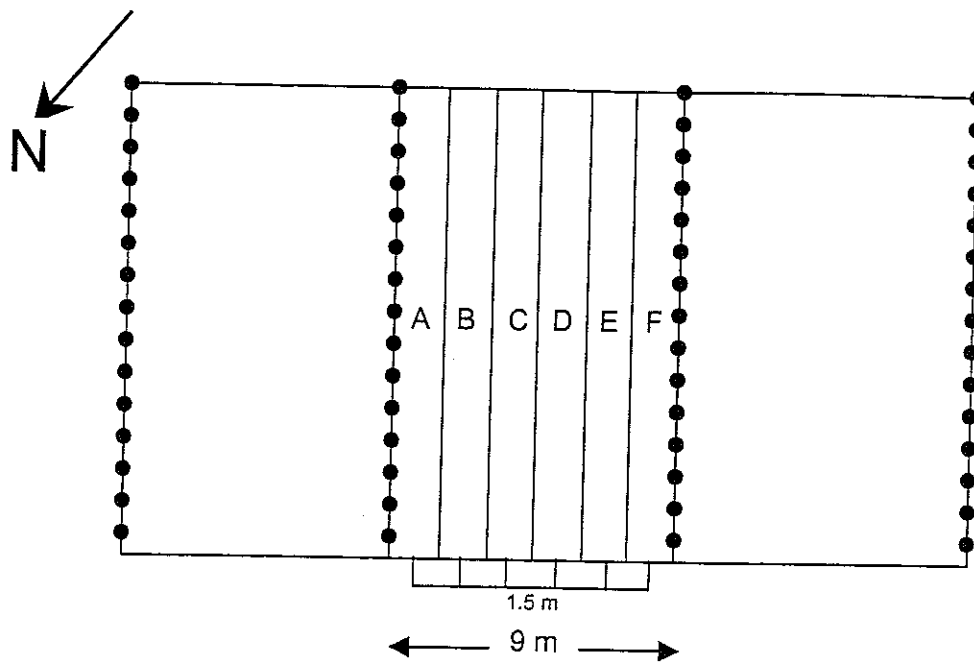


Figura 2. Plano descriptivo de la parcela principal, en el cual se detallan las subparcelas. Las líneas con círculos negros corresponden a las hileras de árboles.

5.3.2. Calidad nutricional de las pasturas

Se estudió el efecto de la especie arbórea y de la posición respecto a la línea de árboles sobre la calidad de la pastura (relación hoja/tallo, DIVMS, FDA y PC). Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas en franjas, con tres repeticiones. Las parcelas principales están formadas por un arreglo factorial de dos especies arbóreas por tres gramíneas y las subparcelas corresponden a distancias desde la línea de árboles (Figura 2). Para estudiar la relación hoja/tallo se consideraron todas las subparcelas, mientras que en el estudio de la DIVMS, FDA y PC se consideraron tres subparcelas, es decir, se tomaron muestras compuestas: AB (alta sombra), CD (pleno sol) y EF (sombra intermedia).

5.3.3. Producción de biomasa y almacenamiento de carbono

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial, con tres repeticiones. Los tratamientos están formados por la combinación de dos especies arbóreas con tres gramíneas mejoradas.

5.4. VARIABLES EVALUADAS

5.4.1. Radiación fotosintéticamente activa (RAFA) incidente

Se realizaron mediciones de radiación fotosintéticamente activa (RAFA) incidente sobre la pastura, con un ceptómetro (Decagon Devices Inc., Pullman, Wa, EE.UU.), haciendo 60 lecturas instantáneas en cada subparcela, entre las 11:00 a.m. y 1:00 p.m., en las tres épocas mencionadas: marzo (seca), mayo (transición) y julio (lluviosa). Este ceptómetro mide la RAFA en términos de densidad de flujo fotosintético de fotones (PPFD).

Se estimó la declinación solar para cada una de las fechas de medición, mediante la siguiente ecuación (Lahti y Leskinen 1983, citados por Nygren 1990):

$$\tau d = \frac{2\pi(J-1)}{365}$$

$$\delta_i = 0.00618 - 0.399912 \text{Cos } \tau d + 0.070257 \text{Sen } \tau d - 0.006758 \text{Cos } 2\tau d \\ + 0.000907 \text{Sen } 2\tau d - 0.002697 \text{Cos } 3\tau d + 0.00148 \text{Sen } 3\tau d$$

Donde:

δ_i : Declinación solar (Radianes)
J: Día juliano

La transmisión de RAFA se estimó considerando el mayor valor de RAFA para cada parcela, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\%Tr = \frac{RAFA_{sp}}{RAFA_{mayor}} \times 100$$

Donde:

%Tr: Porcentaje de transmisión de RAFA

RAFA_{sp}: RAFA de la subparcela ($\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

RAFA_{mayor}: RAFA mayor de la parcela ($\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

5.4.2. Producción de materia seca (MS)

Se realizaron muestreos de producción de materia seca, antes de cada pastoreo; para esto se cortaron dos muestras por subparcela, utilizando marcos de 50 x 50 cm. Se cortó el material vegetal dentro de cada marco a una altura aproximada de 10 cm para *B. brizantha* y *B. decumbens* y 20 cm para *P. maximum*, se pesó en campo, para obtener peso fresco, tomando una submuestra de alrededor de 200 g de material fresco de cada muestra, y se secó en horno a 65 °C, hasta peso constante. Para calcular la producción anual de MS se utilizó una eficiencia de utilización de forraje de 0.6 para *B. brizantha* y *B. decumbens* y 0.5 para *P. maximum*; esta eficiencia se estimó realizando un muestreo de producción antes y después de un pastoreo, mediante el siguiente cálculo:

$$EUF = \frac{PMS - Bres}{PMS} \times 100$$

Donde:

EUF : Eficiencia de utilización de forraje (%)

PMS : Producción de materia seca ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$)

Bres : Biomasa residual después de pastoreo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$)

5.4.3. Producción de hojas

La producción de hojas se estimó para el mes de mayo, con base en la producción de MS y la relación hoja/tallo. Cada submuestra seca extraída de la estufa, se separó en sus componentes (hojas y tallos) y se pesó cada componente, para luego calcular la relación hoja/tallo.

$$HT = \frac{PH}{PT}$$

Donde:

HT : Relación hoja/tallo (adimensional)
PH : Peso seco de hojas (g)
PT : Peso seco de tallos (g)

$$PH = PMS \times \left(\frac{HT}{HT + 1} \right)$$

Donde:

PH : Producción de hojas (kg MS ha⁻¹ ciclo⁻¹)
PMS : Producción de materia seca (kg MS ha⁻¹ ciclo⁻¹)
HT : Relación hoja/tallo (adimensional)

5.4.4. Eficiencia de uso de radiación (EUR)

La eficiencia de utilización de radiación (EUR) se calculó con base en la cantidad de MS producida y la intensidad de RAFA incidente durante el mismo período. Este último término se estimó mediante el promedio de radiación global de la zona, para un período de 16 años, y el porcentaje de RAFA transmitida hacia cada

subparcela, la cual se asume que no varía considerablemente a lo largo del día (Zelada 1996).

$$EUR = \frac{PMS}{RAFAinc}$$

Donde:

- EUR : Eficiencia de uso de radiación (g MS MJ⁻¹)
PMS : Producción de materia seca (g MS m⁻² período⁻¹)
RAFAinc : Radiación fotosintéticamente activa incidente en la subparcela, para el período en estudio (MJ m⁻² período⁻¹)

$$RAFAinc = \frac{Rg \times 0.5 \times \%Tr}{100}$$

Donde:

- RAFAinc : Radiación fotosintéticamente activa incidente en la subparcela, para el período en estudio (MJ m⁻² período⁻¹).
Rg : Radiación global para el área (MJ m⁻² período⁻¹)
%Tr : Porcentaje de RAFA transmitida hacia la subparcela

5.4.5. Relación hoja/tallo

En el mes de mayo, se realizó un muestreo para estimar la relación hoja/tallo, para esto se colectó una muestra por subparcela, utilizando marcos de 50 x 50 cm y una altura de corte aproximada de 10 cm para *B. brizantha* y *B. decumbens* y 20 cm para *P. maximum*. De esta muestra, se tomó una submuestra de plantas enteras, de alrededor de 200 g de material fresco, y se secó en horno a 65 °C, hasta peso constante; posteriormente se separó en sus componentes (tallos y hojas) y se pesó por separado cada uno de ellos.

$$R(H / T) = \frac{PH}{PT}$$

Donde:

R (H/T) : Relación hoja/tallo
 PH : Peso seco de hojas (g)
 PT : Peso seco de tallos (g)

5.4.6. Calidad nutricional

En el muestreo de producción de biomasa realizado en julio, se tomaron las submuestras secas de planta entera y se mezclaron (A y B, C y D, E y F) con el fin de reducir a la mitad el número de muestras a analizar en laboratorio. Posteriormente, dichas muestras fueron molidas en un molino Milley, utilizando una criba de 1 mm. A estas muestras se les determinó la digestibilidad *in vitro* de materia seca (DIVMS) según la técnica de Tilley y Terry (1963), fibra detergente ácido (FDA) por el método descrito por Van Soest y Robertson (1985) y proteína cruda (PC) por Micro-Kjeldahl, descritos por Bateman (1970). Los análisis de calidad nutricional se realizaron en el laboratorio de nutrición animal del CATIE.

5.4.7. Producción de proteína cruda y energía metabolizable

La producción total de PC y de energía metabolizable (EM) se estimaron con base en la producción de materia seca por ciclo (julio), el contenido de PC y la DIVMS encontrada en los forrajes.

$$PPC = \frac{PMS \times PC\%}{100}$$

Donde:

PPC : Producción de proteína cruda (kg ha⁻¹ ciclo⁻¹)
 PMS : Producción de materia seca (kg ha⁻¹ ciclo⁻¹)
 PC% : Contenido de proteína cruda (%)

$$EM = \frac{DIVMS \% \times 3.615}{100}$$

Donde:

EM : Energía metabolizable (Mcal kg⁻¹ MS)
 DIVMS% : Digestibilidad *in vitro* de materia seca (%)

$$PEM = PMS \times EM$$

Donde:

PEM : Producción de energía metabolizable (Mcal ha⁻¹ ciclo⁻¹)
 PMS : Producción de materia seca (kg ha⁻¹ ciclo⁻¹)
 EM : Energía metabolizable (Mcal kg⁻¹ MS)

5.4.8. Fracción de carbono

Se tomaron muestras de fuste y ramas de las dos especies arbóreas para determinar la fracción de carbono en la madera. Los análisis se realizaron en el laboratorio de nutrición animal de la Universidad Nacional, utilizando el método de calorimetría (Eduarte y Segura 1999), con el uso de una bomba calorimétrica, la cual es comúnmente empleada para estimar energía total en materiales orgánicos sólidos.

Una vez determinado el calor producido en la bomba calorimétrica se realizaron los siguientes cálculos:

1. Las calorías producidas se convierten a julios (J) multiplicando por 4.1868 J.
2. Los julios por gramos son transformados a moles de Carbono dividiendo por 4.8 X 10⁵ J.
3. Utilizando la fórmula de moles se obtiene los gramos de carbono:
 Mol = gramos / Peso Molecular

4. Luego se divide entre el peso de la muestra inicial para obtener la fracción de carbono fijada.

Fuente: Segura (1997).

En gramíneas se utilizó una fracción de carbono de 0.5, la cual se toma por defecto cuando no existen datos (Brown y Lugo 1984; IPCC 1996).

5.4.9. Biomasa aérea de los árboles

Se cortaron seis individuos por especie, para determinar su biomasa total, además, se midió su diámetro a la altura del pecho (dap) y altura total. Se pesó por separado cada componente (fuste, ramas, hojas), para cada muestra se llevó una submuestra a laboratorio para determinar contenido de materia seca a 65 °C, y luego estimar la biomasa seca por individuo.

Con base en los resultados de biomasa seca, altura y dap, se probaron 11 modelos de regresión para cada especie arbórea y se escogió el modelo de mejor ajuste. Posteriormente, se realizó una medición de dap y alturas de los 14 individuos centrales de cada unidad experimental, y con base en los modelos elegidos se estimó la biomasa arbórea por individuo y luego por parcela.

5.4.10. Biomasa residual de la pastura

La biomasa residual de las pasturas se estimó con base en los resultados de producción de biomasa y eficiencia de utilización de forraje, para cada especie: *B. brizantha* y *B. decumbens* (0.6), y *P. maximum* (0.5).

$$Bres = PMS \times (1 - EUF)$$

Donde:

Bres : Biomasa residual en la pastura (kg MS ha⁻¹)
PMS : Producción de materia seca (kg MS ha⁻¹ciclo⁻¹)
EUF : Eficiencia de utilización del forraje

5.4.11. Carbono almacenado arriba del suelo

La cantidad de carbono almacenado en la biomasa arbórea se determinó con base en la biomasa y en la fracción de carbono para cada una de las especies. El carbono secuestrado en la pastura se estimó mediante la cantidad de biomasa residual y el porcentaje de carbono almacenado en dicha biomasa (literatura). El carbono total almacenado es la resultante de la suma de los valores encontrados en los componentes arbóreo y herbáceo.

$$Calm = B \times Fc$$

Donde:

Calm : Carbono almacenado en la biomasa (tC ha⁻¹)
B : Biomasa "Stock" (t MS ha⁻¹)
Fc : Fracción de carbono en la biomasa (adimensional)

5.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizaron pruebas de normalidad a los residuos de las variables por medio del PROC UNIVARIATE. En los experimentos se realizaron análisis de variancia en SAS, mediante el procedimiento PROC GLM (SAS 1985).

En la búsqueda de modelos para predecir la productividad de la pastura en función de la RAFA incidente, y la biomasa arbórea en función del dap y altura, se realizó un análisis de correlación entre las variables, mediante el PROC CORR. Posteriormente se efectuaron análisis de regresión por medio del PROC REG. Las interacciones se analizaron mediante el procedimiento LSMEANS y las comparaciones de medias entre tratamientos mediante la prueba de Duncan, con el comando MEANS (SAS 1985).

6. RESULTADOS

6.1. RAFA INCIDENTE

La declinación solar en las épocas de muestreo fue la siguiente:

- Marzo 9: 5° S.
- Mayo 17: 20° N.
- Julio 9: 22° N.

El análisis de variancia detectó diferencias significativas ($P < 0.05$) de RAFA incidente entre posiciones respecto a la línea de árboles y entre épocas; además, se presentó interacción entre posición y época, indicando que al menos una de las posiciones se comportó diferente entre épocas. La especie arbórea no tuvo efecto ($P > 0.05$) sobre la transmisión de luz a la pastura (Anexo 1).

La mayor RAFA se encontró en la posición D para el mes de marzo ($1871 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$), mientras que la menor se presentó durante el mes de mayo en la posición A ($246 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 3).

Las posiciones C y D presentaron las mayores ($P < 0.05$) transmisiones de RAFA incidente (100 y 96%), E y B fueron intermedios (74 y 52%) y las menores se presentaron en A y F (18 y 23%). En los meses de mayo y julio (meses de menor radiación) se redujo la RAFA incidente en las parcelas, sin embargo, las posiciones C y D (pleno sol) se mantuvieron con las mayores radiaciones comparada con las demás (Figura 3). En marzo (período seco) se presentó simetría entre posiciones equidistantes ($A=F$, $B=E$ y $C=D$), entretanto, en mayo y julio algunas posiciones igualmente distanciadas a los árboles difieren ($P < 0.05$) en la RAFA incidente ($A \neq F$, $B < E$ y $C \neq D$) (Figura 3).

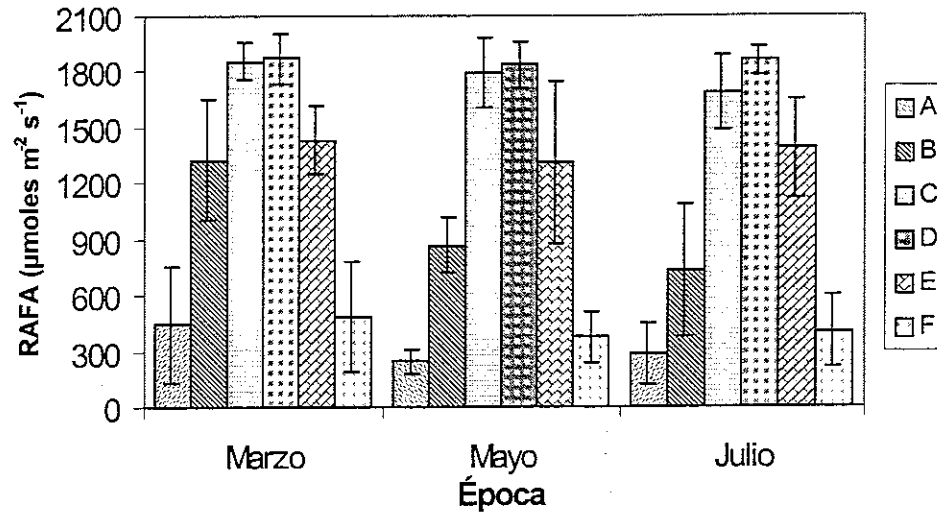


Figura 3. Efecto de la posición y la época sobre la RAFA incidente en la pastura en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

6.2. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA

La especie de gramínea, la posición y la época afectaron significativamente ($P < 0.05$) la producción de materia seca de la pastura. Se presentó interacción ($P < 0.05$) entre gramínea, posición y época. No se presentaron diferencias estadísticas entre árboles ($P > 0.05$) (Anexo 2).

En promedio, la producción de materia seca por ciclo de *P. maximum* superó la de *B. brizantha* en 117% y la de *B. decumbens* en 200%, siendo estas diferencias significativas ($P < 0.01$). El análisis estadístico detectó una interacción significativa ($P < 0.01$) entre especies por época. Todas las especies mostraron una reducción marcada en la producción de MS durante los meses de abril, junio y agosto (Figura 4); sin embargo, *P. maximum* mantuvo mayor producción de MS durante todos los meses, comparada con *B. brizantha* y *B. decumbens* (Figura 4). En

mayo y julio, la producción de *P. maximum* superó a la de *B. brizantha* y *B. decumbens* por más del 100%.

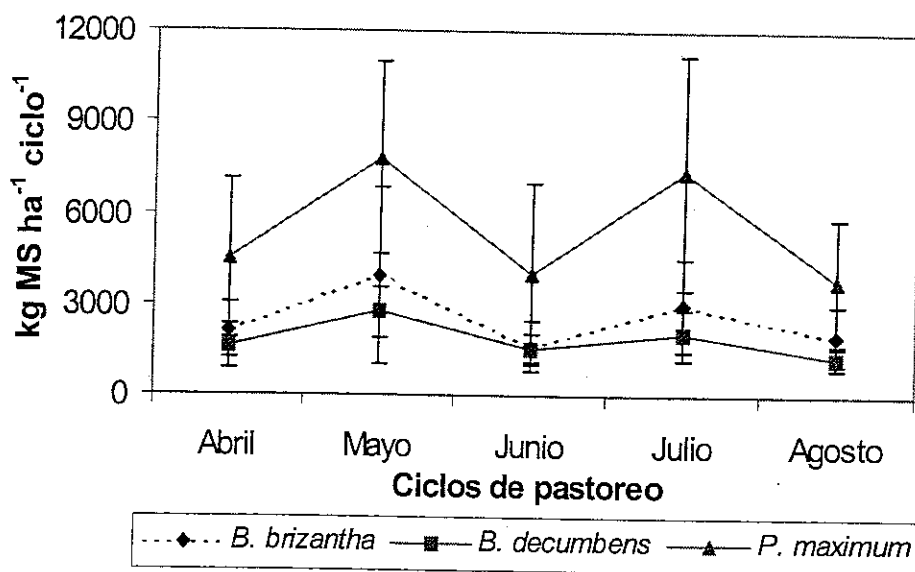


Figura 4. Producción comparada de tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

La interacción gramínea x posición x época fue significativa ($P < 0.05$). En todas las gramíneas y posiciones se presentó una disminución notable de la producción de MS en los meses de abril, junio y agosto (Figura 5); pese a esto, las posiciones a pleno sol (C y D) mantuvieron un nivel productivo superior a las demás ($P < 0.05$).

En *B. brizantha* y *B. decumbens* la producción en la posición A se redujo en 39 y 23%, respecto a la C; mientras que para *P. maximum* la posición D alcanzó mayor producción, y en A se encontró la mayor reducción (30%) (Figura 5), de esta forma, *B. decumbens* fue la especie que mostró menor reducción en rendimiento.

La producción anual estimada de materia seca fue mayor en *P. maximum*, superando a la alcanzada por *B. brizantha* y *B. decumbens* en 81 y 149% (4.8, 19.2, 14.0 t MS ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) (Figura 6).

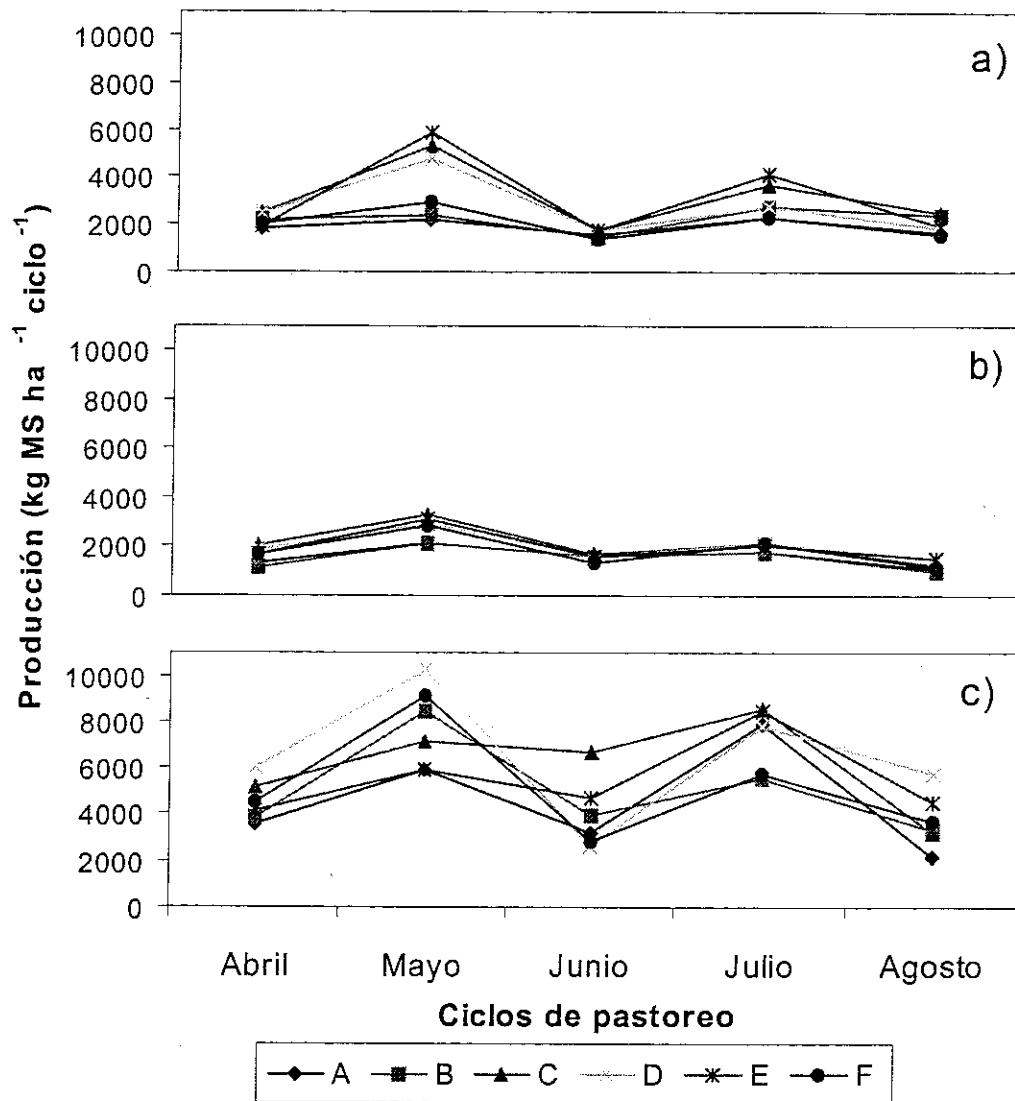


Figura 5. Dinámica productiva de a) *B. brizantha*, b) *B. decumbens* y c) *P. maximum* en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

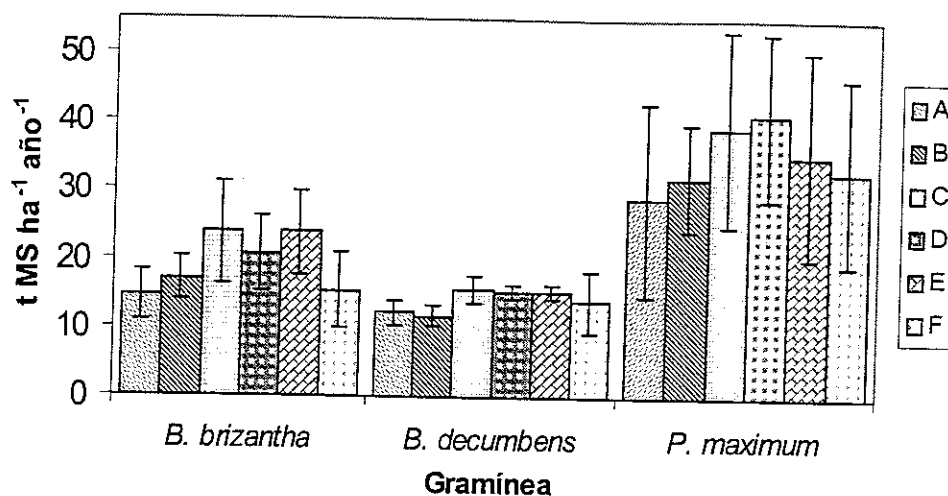


Figura 6. Efecto de la posición respecto a la línea de árboles sobre la producción de tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

6.3. PRODUCCIÓN DE HOJAS

En promedio, la producción de hojas por ciclo de *P. maximum* fue siempre la mayor, superando la de *B. brizantha* en 41% y la de *B. decumbens* en 102%, siendo esto una diferencia significativa ($P < 0.05$). Al igual que en la producción de materia seca, el análisis de variancia detectó significancia en la interacción gramínea x posición ($P < 0.01$) (Anexo 3). Para todas las especies, la menor producción de hojas se encontró en la posición A, y la mayor varió para cada gramínea, siendo la E para *B. brizantha*, la C para *B. decumbens* y la D para *P. maximum* (Figura 7).

6.4. RELACIÓN ENTRE RAFA INCIDENTE Y PRODUCTIVIDAD DE LA PASTURA

El análisis estadístico detectó en *B. brizantha* y *B. decumbens* una correlación significativa ($P < 0.01$) entre producción de MS y la RAFA incidente, a pesar de obtener coeficientes menores a 0.6. De otra parte, no se encontró una correlación

significativa ($P>0.05$) en *P. maximum*, presentando un coeficiente de 0.3 (Cuadro 3). No se encontraron modelos aceptables ($P>0.05$) para relacionar la producción de MS con la RAFA incidente, así mismo, los valores de R^2 fueron muy bajos (Cuadro 4). *P. maximum* se muestra como la especie más plástica en cuanto a utilización de luz, ya que a diferentes niveles de RAFA, la producción de materia seca muestra gran variación, además, a baja radiación esta especie produjo más que *B. brizantha* y *B. decumbens* (Figura 8).

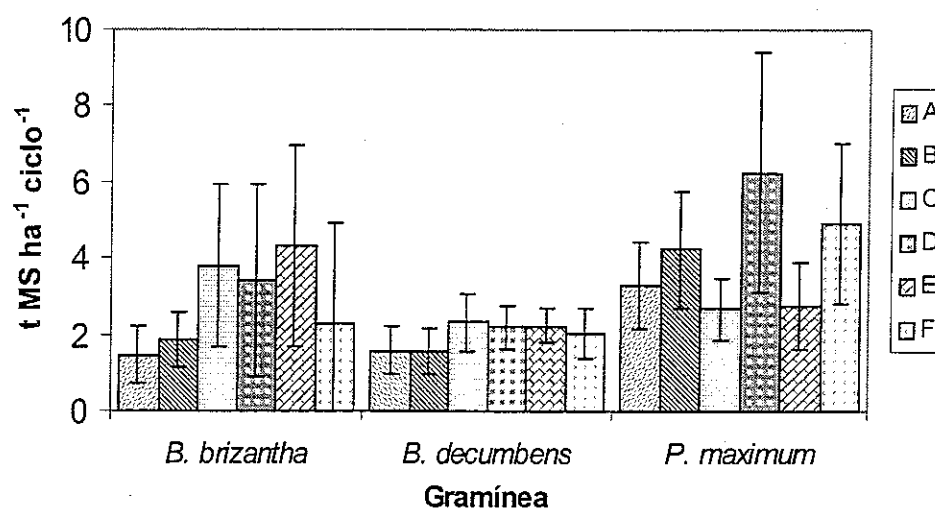


Figura 7. Efecto de la posición respecto a la línea de árboles sobre la producción de hojas de tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

6.5. EFICIENCIA DE USO DE RADIACIÓN (EUR)

La eficiencia de uso de radiación promedio de *P. maximum* fue la mayor, superando en 94% la de *B. brizantha* y en 149% la de *B. decumbens* (Figura 8). Estas diferencias resultaron ser significativas ($P<0.01$).

El análisis de variancia detectó significancia ($P<0.05$) en la interacción gramínea por posición (Anexo 4); las tres gramíneas mostraron la mayor EUR en las

posiciones A y F, siendo éstas estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) a las otras posiciones, mientras que no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre el resto de las posiciones (Figura 9). En todas las gramíneas, la EUR encontrada en las parcelas ubicadas a pleno sol (C y D) se redujo considerablemente respecto a los sitios sombreados (A y F). Sin embargo, *P. maximum* mostró siempre la mayor EUR para cada una de las posiciones (Figura 9).

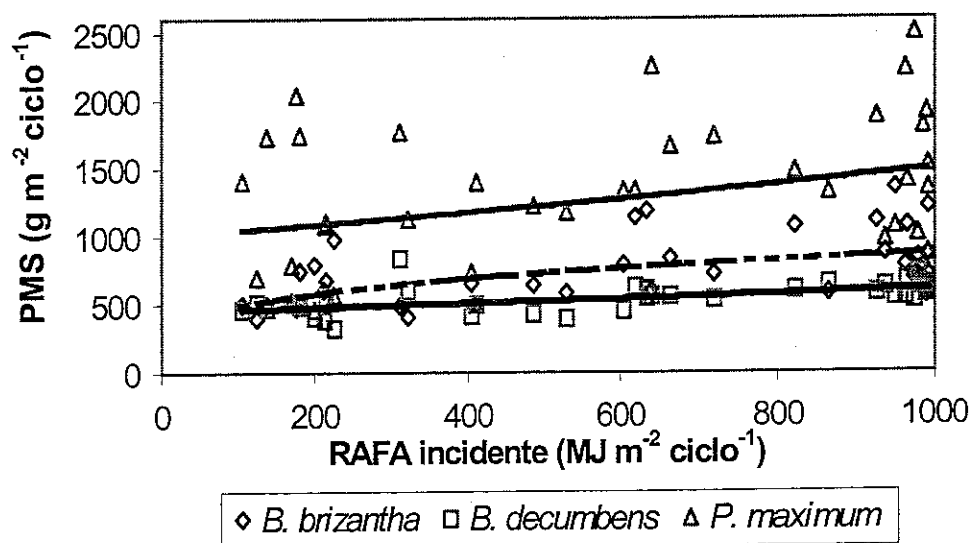


Figura 8. Efecto de la RAFA incidente sobre la producción de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

Cuadro 3. Correlación entre producción de MS y RAFA incidente, para tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

GRAMÍNEA	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (PEARSON)	Pr > F
<i>B. brizantha</i>	0.54	0.0007**
<i>B. decumbens</i>	0.50	0.0018**
<i>P. maximum</i>	0.30	0.0714 ^{NS}

Cuadro 4. Ecuaciones que relacionan la materia seca con la RAFA, para tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

GRAMÍNEA	MODELO	R ²
<i>B. brizantha</i>	$B = 151.18 \times (\text{RAFA})^{0.2532}$	0.34
<i>B. decumbens</i>	$B = 450.02 \times e^{0.0003(\text{RAFA})}$	0.28
<i>P. maximum</i>	$B = 1004.2 \times e^{0.0004(\text{RAFA})}$	0.10

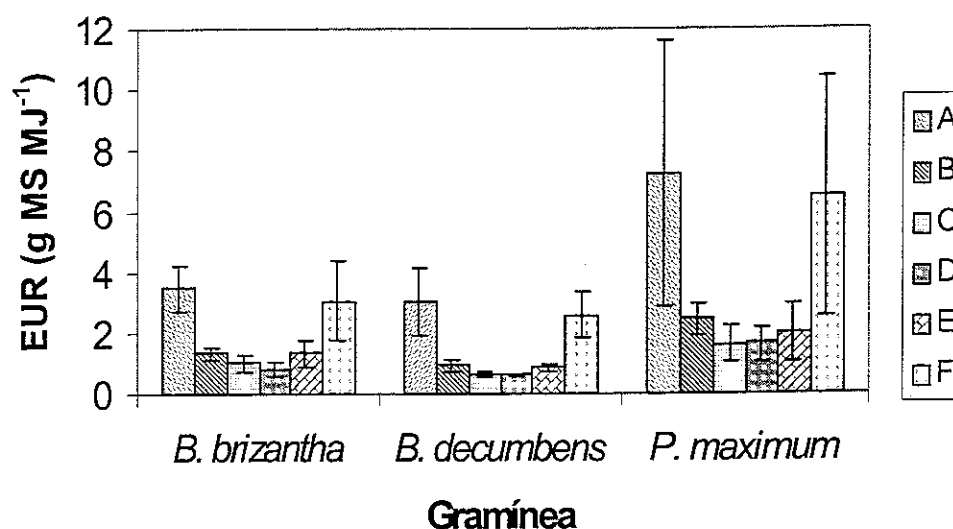


Figura 9. Eficiencia de uso de radiación (EUR) para tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

6.6. RELACIÓN HOJA/TALLO

El análisis de variancia no detectó diferencias significativas ($P > 0.05$) en la relación hoja/tallo entre especies arbóreas, ni entre posiciones respecto a la línea de arboles. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre especies gramíneas (Anexo 5). Las especies *B. brizantha* y *B. decumbens*

presentaron las mayores relaciones hoja/tallo, superando en 130 y 127%, respectivamente, a la encontrada en *P. maximum* (Figura 10).

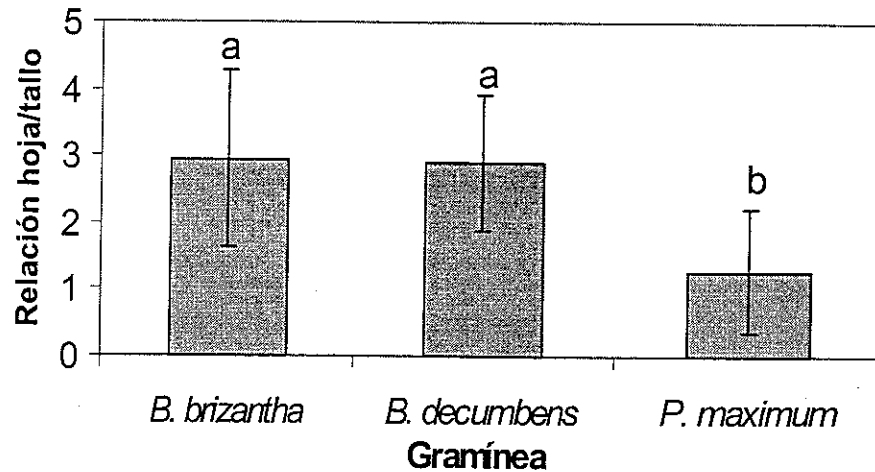


Figura 10. Relación hoja/tallo para tres gramíneas en SSP con *A. mangium* y *E. deglupta*, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar, columnas con letras iguales no difieren estadísticamente ($P>0.05$).

6.7. DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE MATERIA SECA (DIVMS)

La digestibilidad *in vitro* de materia seca de las pasturas varió significativamente ($P<0.05$) por efecto de las especies arbóreas, gramíneas y posición respecto a árboles, no se detectó interacción entre estas variables ($P>0.05$) (Anexo 6). En promedio, las gramíneas asociadas a *E. deglupta* presentaron una DIVMS mayor, superando en 7% a las establecidas con *A. mangium*. Las gramíneas *B. brizantha* y *B. decumbens* presentaron la mayor DIVMS superando en 18 y 21 % a *P. maximum*, respectivamente. La mayor DIVMS se encontró en las áreas con sombra intermedia (EF), superando en 8% a la encontrada en alta sombra (AB) y en 11% a la hallada a pleno sol (CD) (Figuras 11a, 11b y 11c).

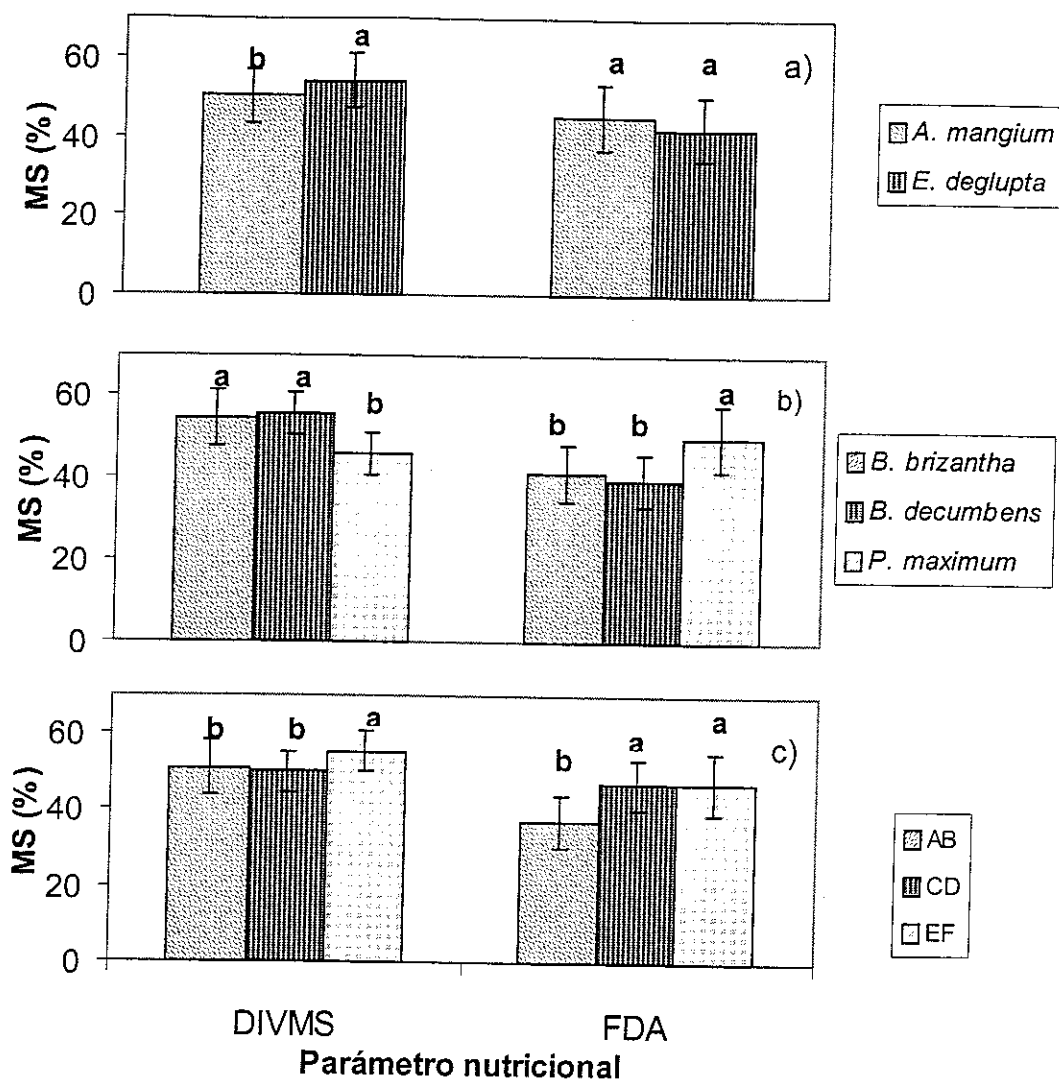


Figura 11. Efecto de a) Árboles, b) Gramíneas y c) Posición sobre la DIVMS y FDA de gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Barras de error corresponden a la desviación estándar, columnas con letras iguales para el mismo parámetro no difieren estadísticamente ($P > 0.05$).

6.8. FIBRA DETERGENTE ÁCIDO (FDA)

La fibra detergente ácido de las gramíneas presenta variaciones significativas ($P < 0.05$) por efecto de las especies arbóreas, gramíneas y posición respecto a las hileras de árboles, sin embargo, no se detectó interacción entre estas variables ($P > 0.05$) (Anexo 6). Las gramíneas en asocio con *A. mangium* presentaron una

FDA 7% superior a la encontrada con *E. deglupta*. En promedio, *P. maximum* presentó los mayores valores de FDA, siendo 20 y 25% superior a *B. brizantha* y *B. decumbens*, respectivamente. En las áreas con sombra intermedia (EF) y a pleno sol (CD) se encontraron las mayores FDA, siendo 27 y 26% mayores a la encontrada bajo alta sombra (AB) (Figuras 11a, 11b y 11c).

6.9. PROTEÍNA CRUDA (PC)

Las especies arbóreas y las gramíneas afectaron significativamente ($P < 0.05$) la proteína cruda de los forrajes, mientras que la posición respecto a la línea de árboles y la interacción no fue significativa ($P > 0.05$) (Anexo 6). La mayor PC se encontró en las gramíneas asociadas a *E. deglupta*, siendo ésta superior en un 21% a la obtenida bajo *A. mangium*. Las pasturas más ricas en PC resultaron ser *B. decumbens* y *B. brizantha*, manifestándose un incremento del 46 y 44% respecto a *P. maximum*. Aunque no se presentaron diferencias estadísticas de PC entre posiciones, se encontró con mayores valores en sombra intermedia, siendo superior en 14 y 23% respecto a sombra y pleno sol (Figura 12).

6.10. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA METABOLIZABLE (EM) Y DE PROTEÍNA CRUDA (PC)

Las especies arbóreas y las posiciones respecto a los árboles no afectaron significativamente ($P > 0.05$) la producción de energía metabolizable de los forrajes, mientras que las especies gramíneas influyeron sobre este parámetro ($P < 0.05$). La interacción entre los factores no fue significativa ($P > 0.05$) (Anexo 7). En promedio, *P. maximum* presentó la mayor producción de EM, superando en 79 y 166% a la producida por *B. brizantha* y *B. decumbens*, respectivamente (Figura 13). Todas las diferencias se presentaron con una $P < 0.05$.

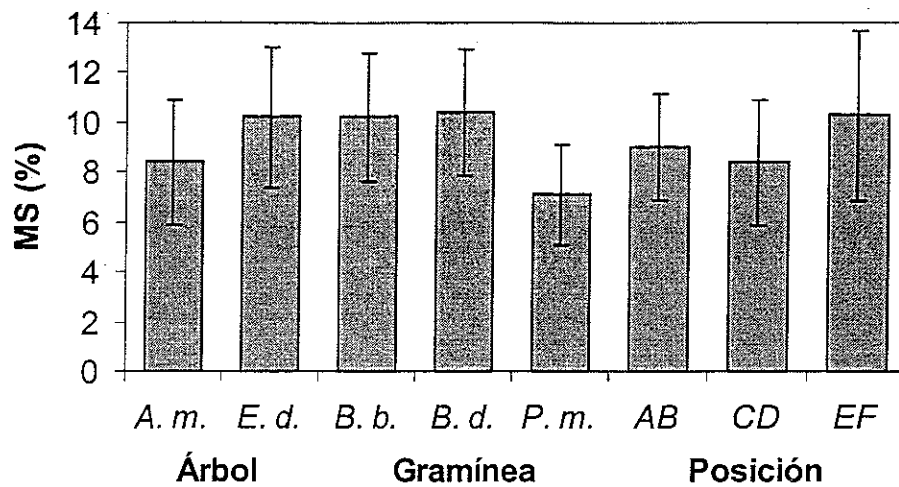


Figura 12. Efecto de especies arbóreas, gramíneas y posición sobre el contenido de PC de gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Barras de error corresponden a la desviación estándar. (A.m.: *A. mangium*, E. d.: *E. deglupta*, B.b.: *B. brizantha*, B.d.: *B. decumbens*, P.m.: *P. maximum*).

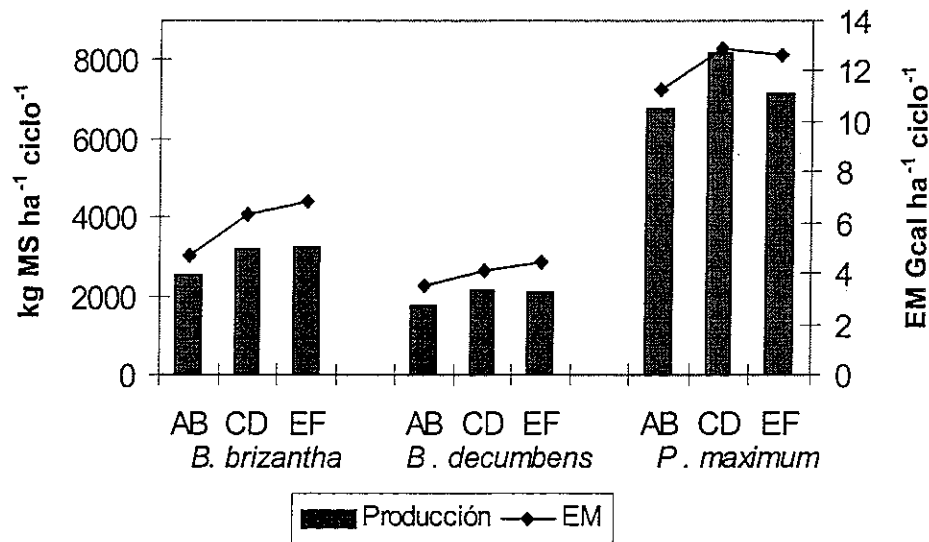


Figura 13. Producción de materia seca (MS) y energía metabolizable (EM) de tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

La producción de proteína cruda no fue afectada por las especies arbóreas y las posiciones respecto a las líneas de árboles ($P>0.05$); en tanto que, la especie de gramínea influyó sobre esta producción ($P<0.05$). La interacción entre los factores no fue significativa (Anexo 7). La producción promedio de PC en *P. maximum* fue superior a la encontrada para *B. brizantha* y *B. decumbens*, siendo 107 y 205% más alta, respectivamente (Figura 14).

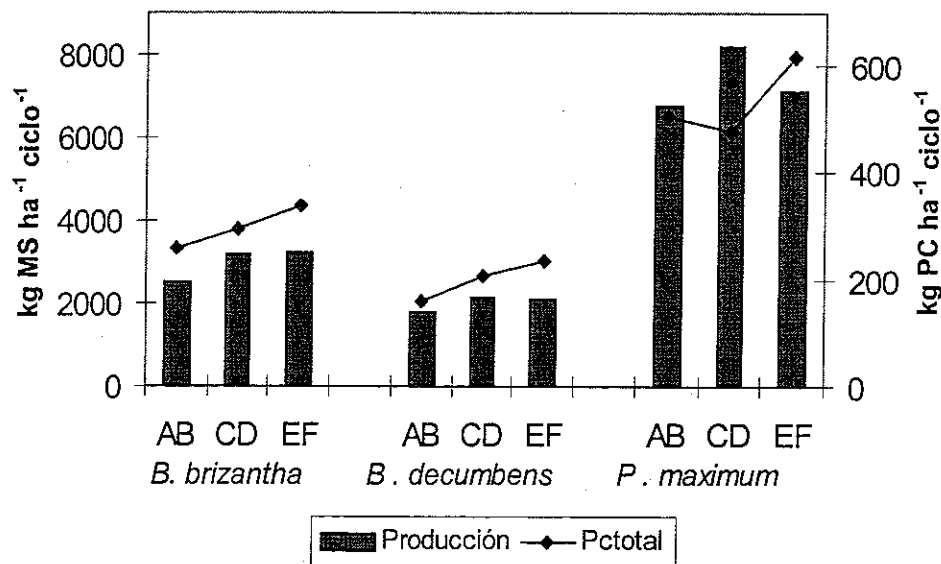


Figura 14. Producción de materia seca (MS) y proteína cruda (PC) de tres gramíneas mejoradas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

6.11. FRACCIÓN DE CARBONO EN LA MADERA DE LAS ESPECIES ARBÓREAS

Se encontró que el porcentaje de carbono presente en la biomasa aérea arbórea fue igual estadísticamente ($P>0.05$) para las dos especies; igualmente, no se presentaron diferencias ($P>0.05$) entre partes del árbol para cada especie. En promedio, el contenido de carbono en la biomasa fue de 46.5 y 46.0% para *A. mangium* y *E. deglupta*, respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Contenido de carbono en la biomasa de dos especies arbóreas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

ESPECIE ARBOREA	FUSTE (%)	RAMAS (%)
<i>Acacia mangium</i>	47 (1.0)	46 (2.0)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	46 (0.3)	46 (1.8)

Valores en paréntesis corresponden a la desviación estandar.

6.12. ALTURA TOTAL Y DAP DE LAS ESPECIES ARBÓREAS

No se detectaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre especies arbóreas, ni entre gramíneas para las variables de dap y altura de árboles (Anexo 8). Sin embargo, el menor DAP se encontró en los árboles asociados a *B. brizantha*, sin que fueran diferentes estadísticamente ($P > 0.05$) (Figura 15).

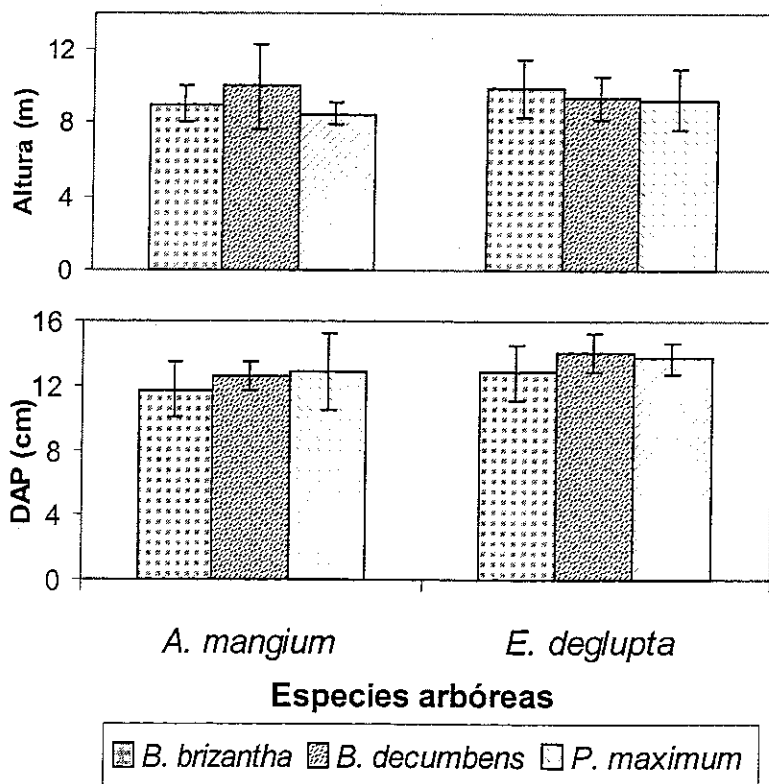


Figura 15. Dap y Altura de árboles de *A. mangium* y *E. deglupta* en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Los modelos de regresión encontrados para *A. mangium* y *E. deglupta*, determinan la biomasa aérea con base en el dap al cuadrado y la altura (Anexo 9). Dichos modelos presentan muy buenos ajustes ($R^2=0.99$, $P<0.001$) (Cuadro 6).

6.13. BIOMASA ARBÓREA

El análisis de variancia mostró que la especies arbóreas y las gramíneas no tuvieron efecto ($P>0.05$) en la biomasa arbórea aérea (Anexo 10). Los valores encontrados variaron desde 7.3 hasta 8.0 t ha⁻¹ (Figura 16), siendo estadísticamente igual ($P>0.05$) para las combinaciones silvopastoriles estudiadas.

Cuadro 6. Modelos de regresión para estimar la biomasa aérea con base en su altura y dap en dos especies arbóreas, en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

ESPECIE	MODELO	R ²	C.V.(%)	P>F
<i>A. mangium</i>	$B = 3.44^{**} + 0.064^{**} \text{dap}^2 + 1.03^{**} H$	0.99	0.22	0.001
<i>E. deglupta</i>	$B = 4.24^{**} + 0.052^{**} \text{dap}^2 + 1.05^{**} H$	0.99	0.43	0.001

B : Biomasa aérea (kg MS árbol⁻¹); dap: Diámetro a la altura del pecho (cm) y H: Altura total (m).

** Parametro significativo ($P<0.01$).

6.14. BIOMASA TOTAL

La biomasa total (árboles más gramíneas) de los Sistemas Silvopastoriles no se vió afectada ($P>0.05$) por las especies componentes del sistema (Anexo 10); todas las combinaciones presentaron estadísticamente la misma producción de materia seca. La biomasa varió de 8.0 a 10.1 t ha⁻¹; de esta cantidad, la parte arbórea constituye entre el 78 y 95% del total del sistema (Figura 16).

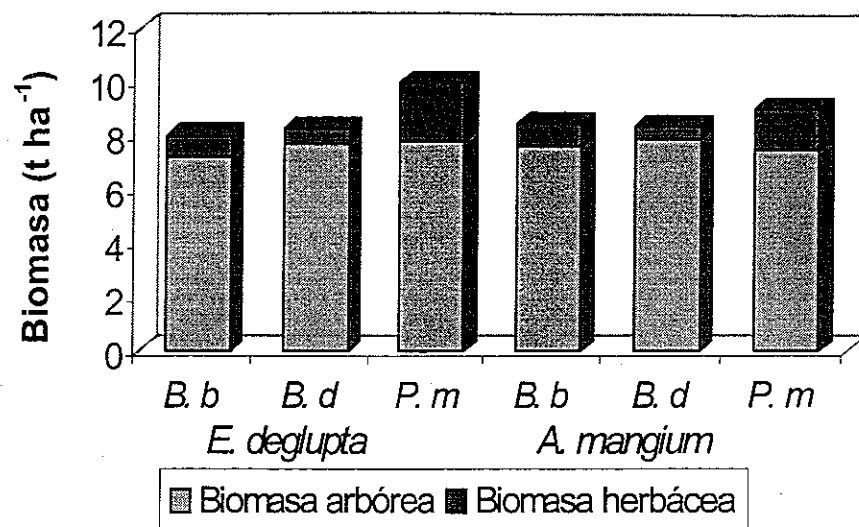


Figura 16. Producción de biomasa aérea en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. (B.b.: *Brachiaria brizantha*, B.d.: *B. decumbens*, P.m.: *Panicum maximum*).

6.15. CARBONO ALMACENADO

No se encontraron diferencias ($P > 0.05$) entre árboles y gramíneas en cuanto al carbono almacenado (Anexo 10). La cantidad de carbono varió entre 3.7 y 4.7 t ha⁻¹, de la cual, una gran parte es encontrada en la biomasa arbórea, correspondiendo entre 76 y 94% del total; las pasturas aportan la cantidad restante (Figura 17). Así mismo, la tasa de fijación varió entre 1.8 y 2.3 t ha⁻¹ año⁻¹. El aporte de las especies arbóreas es de 3.5 y 3.6 t ha⁻¹, para *A. mangium* y *E. deglupta*, respectivamente.

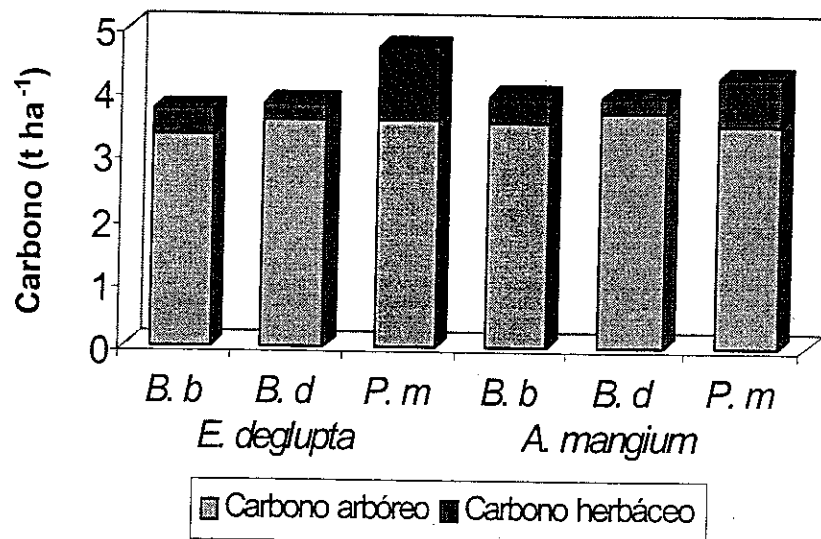


Figura 17. Almacenamiento de carbono en biomasa aérea en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999. (B.b.: *B. brizantha*, B.d.: *B. decumbens*, P.m.: *P. maximum*).

7. DISCUSIÓN

7.1. RAFA INCIDENTE

Aunque la arquitectura del dosel de las dos especies arbóreas es diferente, la transmisión de RAFA fue similar en ambas especies, esto debido posiblemente a que los espaciamientos entre individuos son cortos (3 m), de tal forma que hay traslape de doseles y se forman franjas de alta densidad arbórea y baja radiación; de esta forma se pierden las características individuales de copa de cada árbol. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Acciaresi *et al.* (1994), quienes afirman que en *Populus deltoides* con densidades entre 312 y 625 árboles ha⁻¹, no se encontraron diferencias de RAFA incidente al estrato herbáceo.

Se pueden definir tres zonas con diferencias en la transmisión de radiación incidente: sombra alta (cerca de los árboles), sombra intermedia (distancia media) y pleno sol (lejos de los árboles), con transmisiones de RAFA del 20, 63 y 98%, respectivamente. Es decir, a medida que se aleja de los árboles se aumenta la transmisión, estos resultados coinciden con los obtenidos por Bolivar (1998) quien encontró menor RAFA en SSP respecto a monocultivo, y ésta aumenta a medida que se aleja de la hilera de árboles. Las diferencias encontradas entre épocas son inherentes a la declinación solar, iguales resultados encontraron Wilson y Ludlow 1991; Tournebize y Sinoquet 1995; McIntyre *et al.* 1996; Jackson y Palmer 1987; Yunusa *et al.* 1995.

7.2. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA

La especie arbórea no influyó en la productividad de las pasturas; esto se debe básicamente a que las dos especies sembradas en hileras a alta densidad se comportan igual en cuanto a transmisión de radiación. Se presentó una fuerte variación en el rendimiento de las pasturas entre épocas; siendo mayo y junio los meses picos de mayor y menor producción, respectivamente. Lo anterior es

debido, posiblemente, a cambios en las condiciones climáticas (precipitación y radiación), ya que junio presentó la menor radiación global. Resultados similares obtuvo Bolívar (1998) en un estudio de SSP de *B. humidicola* con *A. mangium*, donde encontró diferencias en producción de la pastura entre ciclos de pastoreo. Así mismo, Acciaresi *et al.* (1994), afirman que la productividad de una pastura en mezcla en SSP con *P. deltoides* varía en función de la época. Otros autores (Acciaresi *et al.* 1993; Wong y Stür 1996; Yunusa *et al.* 1995) reportan resultados concordantes con los del presente estudio.

La producción de materia seca anual de *P. maximum* superó la de *B. brizantha* en 81% y la de *B. decumbens* en 149% (19.2, 14.0 y 34.8 t MS ha⁻¹año⁻¹, respectivamente). Zelada (1996), encontró resultados similares, donde la producción de *P. maximum* fue siempre superior a la de *B. brizantha*. Bustamante *et al.* (1998), encontraron en un estudio de productividad de pasturas en SSP con *E. poeppigiana*, que *P. maximum* produjo más que otras seis especies de gramíneas. Por tal razón, es posible afirmar que estas diferencias en producciones son debidas a las características fenotípicas de dichas especies.

7.3. PRODUCCIÓN DE HOJAS

La mayor producción de hojas la obtuvo *P. maximum*, siendo 41 y 102% superior a la de *B. brizantha* y *B. decumbens*, respectivamente. Este resultado se debe a la gran producción de MS de *P. maximum*; este aspecto es importante ya que permite hacer comparaciones de producción de forraje comestible entre especies de gramíneas.

7.4. RELACIÓN ENTRE RAFA INCIDENTE Y PRODUCTIVIDAD DE LA PASTURA

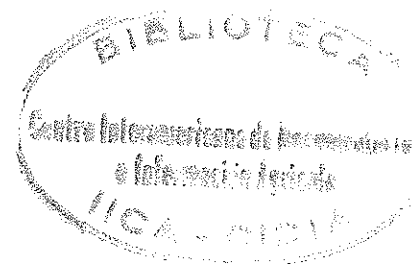
La RAFA incidente en la pastura no puede explicar completamente la producción de materia seca, esto es debido a que en áreas con menor RAFA se presentan

cambios morfológicos en las plantas, que las hace más eficientes en el uso de la radiación, esto es un mecanismo de compensación de las especies. Los modelos probados no tienen suficiente validez a la hora de estimar la producción con base en la RAFA incidente en las tres pasturas, ya que los R^2 son muy bajos (0.10 a 0.34). Concordando con estos resultados, Bolivar (1998) no obtuvo correlación entre la intensidad de RAFA y la producción de *B. humidicola*; mientras que Zelada (1996) encontró modelos para relacionar la variables, pero al reducir la radiación artificialmente.

7.5. EFICIENCIA DE USO DE RADIACIÓN (EUR)

La gramínea más eficiente en utilización de radiación, tanto en la sombra como a pleno sol, fue *P. maximum*, es decir, este pasto puede comportarse como planta de "sol" y de sombra (Veenendaal *et al.* 1993). En todas las gramíneas, la mayor EUR se encontró en la zona de mayor sombra, y la menor a pleno sol; en *B. brizantha* fue 338% superior (3.0 vs. 0.8 g MS MJ⁻¹); en *B. decumbens* el incremento fue de 400% (3.0 vs. 0.6 g MS MJ⁻¹) y en *P. maximum* fue 356% más alto (7.3 vs. 1.6 g MS MJ⁻¹). Zelada (1996), encontró valores de EUR menores para *P. maximum* (6.4 g MS MJ⁻¹) y un poco mayores para *B. brizantha* (4.5 g MS MJ⁻¹) al reducir a un 25% la luz artificialmente. Wilson y Ludlow (1991) encontraron valores similares a este último estudio. Este aumento de EUR en ambientes sombreados se explica por los cambios morfológicos de las plantas para compensar la baja fotosíntesis, tales como un incremento en el área foliar específica (Wong y Wilson 1980; Shelton *et al.* 1987).

Estos resultados tienen gran aplicabilidad práctica en el diseño de Sistemas Silvopastoriles en el trópico húmedo, ya que permiten determinar la densidad arbórea a utilizar y las especies de gramíneas apropiadas a dichos niveles de radiación.



7.6. RELACIÓN HOJA/TALLO

La relación hoja/tallo no se vió afectada por las especies arbóreas, ni por las posiciones respecto a los árboles (nivel de sombra). Resultados similares encontró Bolívar (1998) en *B. humidicola* bajo *A. mangium*, quien afirma que la presencia de los árboles, ni la distancia respecto a ellos afectaron la relación hoja/tallo. Contrario a estos resultados, *P. maximum* y *B. brizantha* en suelos más fértiles, aumentaron levemente este parámetro cuando la radiación se redujo artificialmente en un 50% (Zelada 1996). Otros autores (Wong y Wilson 1980; Eriksen y Whitney 1981; Mesquita *et al.* 1994) reportan iguales resultados cuando las gramíneas crecen bajo doseles arbóreos o con sombra artificial moderada. Estos resultados se deben, probablemente, a comportamientos adaptativos propios de cada especie.

Los valores de relación hoja/tallo para *B. brizantha* y *B. decumbens* en esta investigación son muy superiores a los reportados por Vallejos (1988), quien encontró valores de 1.4 y 1.1, al evaluar 52 y 26 accesiones, respectivamente. Esto es debido, posiblemente, a que los genotipos evaluados en esta investigación son accesiones mejoradas, mientras en el otro estudio se evaluó un número considerable de accesiones. En *P. maximum*, los resultados coinciden totalmente con los reportados por el mismo autor (1.3). Los valores de la relación hoja/tallo tienen gran importancia, ya que determinan el consumo animal, al afectar la densidad de hojas en la pastura.

7.7. DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE MATERIA SECA (DIVMS)

La mayor digestibilidad *in vitro* de materia seca la presentó *B. brizantha*, seguido de *B. decumbens* y *P. maximum*; concordando con estos resultados, Vallejos (1988) reportó el mismo orden en un suelo más fértil, aunque los valores fueron un poco superiores (63.7, 65.4 y 61.7%, respectivamente). De esta forma, se indica que las diferencias en DIVMS son características intrínsecas de cada especie. Las

variaciones de los resultados entre estudios, se deben posiblemente a diferencias en la fertilidad de los suelos y a que en el presente estudio las gramíneas se encuentran en asociación (compartiendo recursos). Los resultados de DIVMS concuerdan con los de proteína cruda, de esta forma, al ser mayor el contenido de PC en *B. brizantha* y *B. decumbens*, se mejora la digestibilidad ruminal y por consiguiente la DIVMS de estos forrajes.

La posición respecto a los árboles afectó la DIVMS de los forrajes, entre más cerca se estuviera de los árboles (incremento en sombra), mayor resultó la DIVMS. Esta respuesta se debe a un aumento en los carbohidratos solubles en áreas sombreadas, Bolivar (1998) encontró resultados similares para *B. humidicola* con *A. mangium*; mientras que East y Felker (1993), detectaron una respuesta diferente de *P. maximum*; Zelada (1996), encontró resultados contrarios en *B. brizantha* y *P. maximum*, ya que al reducir la luz artificialmente, se disminuyó la DIVMS.

Las gramíneas asociadas a *E. deglupta* presentaron mayor DIVMS que las establecidas bajo *A. mangium* debido a que los árboles no afectan la radiación fotosintéticamente activa, estos resultados se deben a interacciones no estudiadas, tales como competencia por nutrientes y por espacio radicular, aporte de materia orgánica y ciclaje de nutrientes, entre otras.

7.8. FIBRA DETERGENTE ÁCIDO (FDA)

La gramínea *P. maximum* presentó la más alta fibra detergente ácido, seguido de *B. brizantha* y *B. decumbens*; este parámetro nutricional es importante, ya que indica el contenido de lignina y correlaciona con la DIVMS, estas diferencias son propias de las especies. Las gramíneas encontradas bajo *A. mangium* presentaron mayores contenidos de FDA que en asociación a *E. deglupta*, concordando con los resultados de DIVMS. La posición respecto a los árboles afectó notablemente la FDA del forraje, encontrándose un aumento en áreas a pleno sol y sombra

intermedia, mientras que bajo los árboles se redujo considerablemente. Resultados diferentes fueron encontrados por Bolívar (1998), quien afirma que la distancia respecto a árboles de *A. mangium* no afecta la FDA en *B. humidicola*. La respuesta de la FDA siempre estuvo relacionada a la DIVMS, siendo inversamente proporcionales.

7.9. PROTEÍNA CRUDA (PC)

La proteína cruda fue mayor en *B. decumbens* y *B. brizantha*, respecto a *P. maximum*. Estos valores son semejantes a los reportados por Vallejos (1988), quien encontró para *B. brizantha* y *B. decumbens* y muy superior para *P. maximum* (14.0%). Estos resultados confirman que las diferencias encontradas son debidas a características genotípicas de cada especie.

La PC se incrementó a medida que se acercó a las líneas de árboles, siendo 23% más alta en sombra intermedia, respecto a pleno sol. Estos resultados coinciden con los reportados por Bolívar (1998), quien encontró que la PC de *B. humidicola* asociada a *A. mangium* fue mayor que en monocultivo, sin embargo, no encontró diferencias entre distancias a los árboles. Igualmente, East y Felker (1993), encontraron mayor contenido de PC en *P. maximum* bajo la copa que fuera de ella. Zelada (1988) observó aumentos en PC en *B. brizantha* y *P. maximum* a medida que se reduce la luz artificialmente. Estos resultados indican que los sitios en los cuales se presentan los mayores contenidos de proteína son las zonas de sombra intermedia.

7.10. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA METABOLIZABLE (EM) Y DE PROTEÍNA CRUDA

La gramínea mejorada *P. maximum* produjo las mayores cantidades de energía metabolizable y proteína cruda, siendo ésta muy superior a la encontrada en *B. brizantha* y *B. decumbens*. Aunque el contenido EM y PC en el forraje de *P.*

maximum fue inferior a las demás gramíneas estudiadas, esto se ve compensado por la gran producción de biomasa de esta especie.

En las tres gramíneas se observa un mecanismo de compensación, ya que aunque se presentaron diferencias de productividad entre posiciones para cada una de ellas, la producción de EM y PC se mantuvo constante en todas las posiciones. Esto indica el alto grado de adaptación de estas especies en Sistemas Silvopastoriles.

7.11. FRACCIÓN DE CARBONO EN LA MADERA DE LAS ESPECIES ARBÓREAS

Las fracciones de carbono encontradas en *A. mangium* y *E. deglupta* fueron altas (46%), teniendo en cuenta que son de plantación y su corta edad (2 años, aproximadamente). Valores similares (44%) fueron encontrados para *Quercus costaricensis* en un bosque de altura en Costa Rica (Segura 1997), y del 43% para 12 especies de un bosque subhúmedo estacional de Bolivia (Soliz 1998). Los contenidos de carbono utilizados en estimaciones de carbono en bosques tropicales son del 50% (Brown y Lugo 1984; IPCC 1996).

7.12. ALTURA TOTAL Y DAP DE LAS ESPECIES ARBÓREAS

Las dimensiones de los árboles (dap y altura) no se vieron afectadas por la gramínea asociada a ellos, esto se debe posiblemente a que el tiempo de asociación es muy corto; los efectos de las gramíneas hacia los árboles aún no son notables.

7.13. BIOMASA ARBÓREA

Los modelos de biomasa aérea encontrados presentaron excelente ajuste ($R^2=0.99$), similar al encontrado para volumen de *E. deglupta* ($R^2= 0.99$) (CATIE

1985), y muy superior al obtenido para biomasa de *A. mangium* ($R^2=0.59$) (Yanthasath *et al.* 1985). Por tal razón, la estimación de la biomasa aérea de estas dos especies es muy confiable.

Al igual que en el caso de las dimensiones arbóreas, la biomasa de los árboles no se afectó por el tipo de gramínea, las similitudes en biomasa para las combinaciones estudiadas se debe, igualmente, al poco tiempo de asociación

7.14. BIOMASA TOTAL Y CARBONO ALMACENADO

La tasa de fijación de carbono de *A. mangium* y *E. deglupta* (1.75 y 1.8 t C ha⁻¹ año⁻¹), es aceptable teniendo en cuenta la baja densidad de plantación (370 ha⁻¹) y se encuentra entre los estimados para especies en plantaciones tropicales a mayor densidad, tales como *Pinus caribaea*, *Casuarina spp.*, *Pinus patula*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mearnsii*, *Cassia siamea*, *Acacia nilotica* y *Azadirachta indica* (3.9 , 6.0 , 5.5 , 3.6 , 2.9 , 7.8 y 2.8 tC ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) (Schroeder 1992). Tomando en consideración las densidades arbóreas, los valores de almacenamiento de carbono encontrados en este estudio son un poco superiores a los estimados para *Alnus acuminata* (35 árboles ha⁻¹) en potreros y para una plantación (1378 árboles ha⁻¹) de *Eucalyptus saligna* (0.1 y 3.6 tC ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) (Kursten y Burschel 1993).

Es importante recalcar que estas cuantificaciones fueron hechas para biomasa aérea del sistema, sin embargo, las pasturas mejoradas contribuyen grandemente a la fijación de carbono en el suelo, de esta forma los valores totales se incrementarían considerablemente. López (1998), afirma que *Panicum maximum* acumuló 233 tC ha⁻¹ en el suelo, mientras que un Sistema Silvopastoril de *Cordia alliodora* con *P. maximum* en un suelo de menor fertilidad, almacenó entre 180 y 200 tC ha⁻¹.

8. CONCLUSIONES

La radiación fotosintéticamente activa (RAFA) incidente en la pastura y la productividad de ésta no fueron afectadas por la especie arbórea; mientras que la época de muestreo (declinación solar) sí las afectó. La mayor intensidad de radiación y producción de forraje se obtuvo en las posiciones centrales entre las líneas de árboles; la mayor sombra y menor producción se presentaron cerca a los árboles, especialmente el costado noreste de cada hilera. *Panicum maximum* fue la pastura más productiva, mientras que *Brachiaria brizantha* y *B. decumbens* mostraron un rendimiento semejante. La mayor producción de las pasturas bajo sombra, en comparación a monocultivos de gramíneas nativas, muestra la productividad de estos Sistemas Silvopastoriles.

La producción de las gramíneas no es explicada completamente por la RAFA incidente, en ésta influyen otros factores. En las tres gramíneas, la RAFA incidente influye en la eficiencia de uso de radiación (EUR), siendo mayor en sitios sombreados. *B. decumbens* presentó la mayor calidad nutricional; sin embargo, *P. maximum* fue la de mejor comportamiento en términos de producción de materia seca, de energía y de proteína cruda, y EUR. De esta forma, *P. maximum* puede asociarse con *A. mangium* o *E. deglupta* y establecer así Sistemas Silvopastoriles de alta productividad forrajera, y a la vez obtener otros productos derivados de los árboles, como la madera.

La zona de sombra intermedia presentó las mejores condiciones para la calidad de la pastura. Las gramíneas establecidas bajo *E. deglupta* presentaron una mayor calidad forrajera que las asociadas con *A. mangium*, esto se manifiesta por una mayor digestibilidad *in vitro* de materia seca, mayor proteína cruda y menor fibra. Es decir, *E. deglupta* permite un mejoramiento de la calidad de las pasturas en Sistemas Silvopastoriles. De la misma forma, en términos de producción y calidad nutricional, la mejor combinación fue *P. maximum* con *E. deglupta*.

La fracción de carbono encontrada en la biomasa de las dos especies arbóreas fue 46%, siendo este valor alto, al tener en cuenta que son especies de rápido crecimiento. En los Sistemas Silvopastoriles evaluados, las especies arbóreas (*A. mangium* y *E. deglupta*), ni las herbáceas (*B. brizantha*, *B. decumbens* y *P. maximum*) afectaron la biomasa producida, consecuentemente, tampoco el carbono almacenado.

A. mangium y *E. deglupta* son dos árboles de rápido crecimiento que capturan y almacenan una importante cantidad de carbono (1.75 y $1.8 \text{ t C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$). En caso de pagarse este servicio ambiental, se aumentarían los ingresos de los productores, haciendo aún más atractivos los sistemas de producción silvopastoriles. Del mismo modo, la fijación de carbono en éstos sistemas sirve de argumento a la hora de proponer este tipo de alternativas y cambia un poco la imagen de contaminadora que actualmente tiene la ganadería.

9. RECOMENDACIONES

La producción de forraje de los Sistemas Silvopastoriles evaluados fue muy superior a la encontrada en monocultivos de gramíneas nativas; sin embargo, es recomendable evaluar la introducción de leguminosas herbáceas con el fin de hacer un uso más eficiente de la radiación; así mismo se podría enriquecer notablemente la calidad nutricional de la pastura.

Es importante estudiar el comportamiento productivo de estas gramíneas en el largo plazo, de esta forma evaluar su persistencia en este tipo de sistemas de producción. De la misma forma, en el proceso de evaluación es necesario conocer la respuesta animal dentro de los Sistemas Silvopastoriles, en términos de productividad.

Se deben realizar estudios de los efectos de estas combinaciones silvopastoriles sobre la fertilidad del suelo, esto debido a que se han presentado estos sistemas como alternativa de producción viable en suelos degradados. Los aspectos a tener en cuenta deberán ser: cambios en propiedades físicas y de fertilidad del suelo, especialmente la dinámica del aluminio y del fosforo.

La estimación del aporte de estos sistemas al contenido de carbono en el suelo es importante, ya que se ha encontrado contribuciones significativas por parte de las raíces. Igualmente, se hace necesario estimar la cantidad de carbono presente en la materia orgánica del suelo.

10. REFERENCIAS

- ABARCA, S. 1996. Ganadería de carne: Amiga del ambiente y bosques. In X Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. (1996, San José, Costa Rica). 21 p.
- ACCIARESI, H.A.; ANSIN, O.E.; MARLATS, R.M. 1994. Sistemas silvopastoriles: efectos de la densidad arbórea en la penetración solar y producción de forraje en rodales de álamo (*Populus deltoides* Marsh). Agroforestería en las Américas 1(4): 6-9.
- ACCIARESI, H.A.; MARLATS, R.M.; MARQUINA, J.L. 1993. Sistemas silvopastoriles: Incidencia de la radiación fotosintéticamente activa sobre la fenología y la producción estacional forrajera. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales 2(1): 19-30.
- BATEMAN, J. 1970. Nutrición animal: manual de métodos analíticos. México D.F., Ed. Herrero. 468 p.
- BELSKY, A.J. 1992. Effects of trees on nutritional quality of understory gramineous forage in tropical savannas. Tropical Grasslands 26: 12-20.
- BELSKY, A.J.; MWONGA, S.M.; DUXBURY, J.M. 1993. Effects of widely spaced trees and livestock grazing on understory environments in tropical savannahs. Agroforestry Systems 24: 1-20.
- BOLIVAR, D.M. 1998. Contribución de *Acacia mangium* al mejoramiento de la calidad forrajera de *Brachiaria humidicola* y la fertilidad de un suelo ácido del trópico. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 97 p.
- BREWBAKER, J.L. 1986. Leguminous trees and shrubs for Southeast Asia and the South Pacific agriculture. G.J. Blair, D.A. Ivory, T.R. Evans (eds.) In Forages in Southeast Asian and South Pacific agriculture. ACIAR Proceedings No. 12. Indonesia. 43 p.
- BRONSTEIN, G.E. 1984. Producción comparada de una pastura de *Cynodon plectostachyus* asociada con árboles de *Cordia alliodora*, con árboles de *Erythrina poeppigiana* y sin árboles. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR-CATIE. 110 p.
- BROWN, S.; LUGO, A.E. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. Science 223: 1290-1293.
- BUSTAMANTE, J. 1991. Evaluación de comportamiento de ocho gramíneas forrajeras asociadas con poró (*Erythrina poeppigiana*) y solas. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 131 p.

- BUSTAMANTE, J.; IBRAHIM, M.; BEER, J. 1998. Evaluación agronómica de ocho gramíneas mejoradas en un sistema silvopastoril con poró (*Erythrina poeppigiana*) en el trópico húmedo de Turrialba. *Agroforestería en las Américas* 5(19): 11-16.
- CANNELL, M.G.R.; GRACE, J. 1993. Competition for light: detection, measurement and quantification. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1969-1979.
- CANNON, P. 1994. *Acacia mangium*, Origen, Características Genéticas y Comportamiento. In Seminario Técnico *Acacia mangium*, comportamiento y potencial en Panamá (1, 1994, Panamá, Panamá). Resúmenes. Panamá, Panamá, p. 1.
- CARVALHO, M.M.; FREITAS, V.; ALMEIDA, D.S.; VILLACA, H. 1994. Efeito de árvores isoladas sobre a disponibilidade e composicao mineral da forragem em pastagens de braquiaria. *Sociedade Brasileira de Zootecnia* 23 (5): 709-719.
- CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. 1985. Producción de biomasa de *Eucalyptus deglupta* en una plantación de ocho años en Turrialba, Costa Rica. *Silvoenergía*, No. 8.
- CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. 1992. *Mangium (Acacia mangium)*: especie de árbol de uso múltiple en América Central. Colección de guías silviculturales. Turrialba, Costa Rica. 56 p.
- CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. 1994. *Deglupta (Eucalyptus deglupta)*: especie de árbol de uso múltiple en América Central. Colección de guías silviculturales. Turrialba, Costa Rica. 45 p.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. 1988. Informe anual 1987. *Pastos Tropicales*. Documento de Trabajo No. 45. CIAT, Cali, Colombia. CIAT Report/Informe 1991. Amaya, S. Cali, Colombia. 162 p.
- CIESLA, W.M. 1996. Cambios climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. *Estudios FAO: Montes* No. 120. 146 p.
- COCKRANE, T.T. 1982. Caracterización agroecológica para el desarrollo de pasturas en suelos ácidos de América Tropical. In J.M. Toledo (ed). *Manual para la evaluación agronómica*. CIAT, Cali, Colombia. p. 23-24.
- CHATUVERNI, A.N. 1994. Sequestration of atmospheric carbon in India's forest. *Ambio* 23: 460-461.

- DETWILER, R.P.; HALL, C.A.S. 1988. Tropical forest and the global carbon cycle. *Science* 239: 42-47.
- DIXON, R.K. 1995. Agroforestry systems: Sources or sinks of greenhouse gases?. *Agroforestry Systems* 31: 99-116.
- EAST, R.M.; FELKER, P. 1993. Forage production and quality of 4 perennial grasses grown under and outside canopies of mature *Prosopis glandulosa* Torr. Var. *glandulosa* (mesquite). *Agroforestry Systems* 22: 91-110.
- EDUARTE, E.; SEGURA, M. A. 1999. Método de calorimetría para determinación del contenido de carbono en biomasa. *Revista de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica* 15: 45-46.
- ERIKSEN, F.I.; WHITNEY, A.S. 1981. Effects of light intensity on growth of some tropical forage species. 1. Interaction of light intensity and nitrogen fertilisation on six forage grasses. *Agronomy Journal* 73: 427-433.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 723 p.
- FAO, 1992. Gramíneas tropicales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 849 p.
- FISHER, M.J.; RAO, I.M.; AYARZA, M.A.; LASCANO, C.E.; SANZ, J.I.; THOMAS, J.R.; VERA, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236-238.
- FLORES, J. 1985. *Bromatología animal*. 3 ed. Limusa. México. p. 235-237.
- FOREST AND WOOD PRODUCTS RESEARCH AND DEVELOPMENT CORPORATION (FWPRDC). 1996. Environmental properties of timber. Brisbane. Australia.
- GRIJPMA, P. 1969. *Eucalyptus deglupta* Bl: una especie forestal prometedora para los trópicos húmedos de América Latina. Turrialba, Costa Rica. 19(2): 267-283.
- HERNÁNDEZ, M.; ARGEL, P.J.; IBRAHIM, M.A.; MANNETJE, L.T. 1995. Pasture production, diet selection and liveweight gains of cattle grazing *Brachiaria brizantha* with or without *Arachis pintoi* at two stocking rates in the Atlantic Zone of Costa Rica. *Tropical Grasslands* 29: 134-141.
- HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L.; LEFKOWITZ, D.S. 1991. Changes in landscape of Latin America between 1850 and 1985, 2: Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38: 173-199.

- IPCC. 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories (1996, Mexico city, México).
- JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. 1987. Light availability at the tree/crop interface. *In* Reifsnyder, W.S.; Darnchofer, T.O. (eds.). *Meteorology and Agroforestry* ICRAF. 546 p.
- KEPHART, K.D.; BUXTON, D.R. 1993. Forage quality responses of C₃ and C₄ perennial grasses under reduced irradiance. *Crop Science* 33: 831-837.
- KURSTEN, E.; BURSCHEL, P. 1993. CO₂ mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 533-544.
- LARCHER, W. 1975. *Physiological plant Ecology*. Heidelberg, Springer – Verlag. 303 p.
- LÓPEZ, A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 47 p.
- LUDLOW, M.M.; WILSON, G.L. 1970. Studies on the productivity of tropical pasture plants; 2: Growth analysis, photosynthesis and respiration of 20 species of grasses and legumes in a controlled environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 21: 183-194.
- LUDLOW, M.M.; WILSON, G.L.; HESLEHURST, M.R. 1980. Stress physiology of tropical plants. *Tropical Grasslands* 14: 136-145.
- LUJÁN, R.; BEER, J.; KAPP, G. 1996. Manejo y crecimiento de linderos de tres especies maderables en el valle de Sixaola, Talamanca, Costa Rica. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica. 73 p.
- McINTYRE, B.D.; RIHA, S.J.; ONG, C.K. 1996. Light interception and evapotranspiration in hedgerow agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology* 81: 31-40.
- MESQUITA, M.; DE PAULA, V.; SETTE, D.; E DE ASSIS, H. 1994. Efeito de árvores isoladas sobre a disponibilidade e composicao mineral de forragem em pastagens de Braquiaria. *Revista Sociedade Brasileira de zootecnia* 23 (5): 709-718.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA. 1991. Manual descriptivo de la leyenda del mapa de Asociaciones de Subgrupos de Costa Rica. Consultora Ancón y Asociados S.A. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA).

- MOLDEN, S.E. 1987. Effects of trees on pasture in a silvopastoral system in Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Berkeley, U.S.A., University of California. 88 p.
- MONTEITH, J.L. 1965. Radiation and crops. *Experimental agriculture* 1: 241-251.
- NAIR, P.K.R. 1993. An introduction to agroforestry. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer academic publisher. 499 p.
- NYGREN, P. 1990. Modelos de patrones de sombra de surcos de *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook en sistemas de cultivos en callejones. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 143 p + apéndices.
- ONG, C.K. 1996. A framework for quantification the various effects of tree-crop interactions. *In* C.K. Ong, P. Huxley (eds.). *Tree-crops interactions*. Wallingford, U.K., CAB International. p 1-23.
- PEZO, D.; IBRAHIM, M. 1998. Sistemas silvopastoriles. Turrialba, C.R.: CATIE. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. 258 p. Módulos de enseñanza agroforestal / Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ; No. 2).
- SAS INSTITUTE INC. 1985. SAS user's guide: Statistics. Cary, EE.U.U. SAS Institute Inc. 629 p.
- SCHROEDER, P. 1992. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. *Forest Ecology and Management* 50: 31-41.
- SEGURA, M.A. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de altura en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis licenciatura. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 114 p.
- SERRÃO, E.A. 1988. Pasturas mejoradas en áreas de bosque húmedo brasileño: Conocimientos actuales. *In* VI Encuentro nacional de zootecnia y II conferencia nacional de producción y utilización de pastos y forrajes (1988, Palmira, Colombia). p. 43-85.
- SERRÃO, E.A. 1991. Sustainability of pastures replacing forests in the Latin American humid tropics: The Brazilian Experience. *In* DESFIL humid tropical lowlands conference. (1991, Panama City, Pan.).[Conferencia]. P. irr.
- SHELTON, H.M.; HUMPHREYS, L.R.; BATELLO, C. 1987. Pastures in the plantations of Asia and the Pacific: Performance and prospect. *Tropical Grasslands* 21: 159-168.

- SOLIZ, B.G. 1998. Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 113 p.
- SOMARRIBA, E. 1992. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems* 19: 233-240.
- TOURNEBIZE, R.; SINOQUET, H. 1995. Light interception and partitioning in a shrub/grass mixture. *Agricultural and Forest Meteorology* 72: 277-294.
- VALLEJOS, A. 1988. Caracterización y evaluación agronómica preliminar de accesiones de *Brachiaria* y *Panicum* en el trópico húmedo de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 126 p.
- VEENENDAAL, E.M.; SHUSHU, D.D.; SCURLOCK, J.M.O. 1993. Responses to shading of seedlings of savanna grasses in Botswana. *Journal of Tropical Ecology* 9: 213-229.
- VEIGA, J.B.; SERRAO, E.A. 1987. Recuperación de pasturas en la región este de la Amazonía brasileña. *Pasturas Tropicales*. Boletín 9: 40-43.
- VELASCO, J.; CAMARGO, J.C.; ANDRADE, H.; IBRAHIM, M. 1999. Mejoramiento del suelo por *Acacia mangium* en un Sistema Silvopastoril con *Brachiaria humidicola*. In VI seminario Internacional de sistemas agropecuarios sostenibles. CIPAV, Cali, Colombia, 28-30 de octubre de 1999. Memorias electrónicas.
- WILSON, J.R. 1982. Environmental and nutritional factors affecting herbage quality. In Hacker, J.B. (ed). *Nutritional limits to animal production from pastures*. Framham Royal, U.K. CAB. pp. 111-131.
- WILSON, J.R. 1996. Shade-simulated growth and nitrogen uptake by pasture grasses in a subtropical environment. *Australian Journal of Agriculture Research* 47: 1075-1093.
- WILSON, J.R., LUDLOW, M.M. 1991. The environment and potential growth of herbage under plantations. In Shelton, H.M. y W.W. Stür (eds). *Forages for plantations crops*. ACIAR Proceedings No. 32. Canberra, Australia. ACIAR. p. 10-24.
- WINJUM, J.K.; DIXON, R.K.; SCHROEDER, P.E. 1992. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air and Soil pollution* 64: 213-227.
- WONG, C.C.; STÜR, W.W. 1996. Persistence of tropical forage grasses in shaded environments. *Journal of Agricultural Science* 126: 151-159.

- WONG, C.C.; WILSON, J.R. 1980. Effects of shading on the growth and nitrogen content of Green Panic and Siratro in pure and mixed swards defoliated at two frequencies. *Australian Journal of Agriculture Research* 31: 269-285.
- YANTASATH, K.; SUPATANAKUL, W.; UNGVICHIAN, I.; CHAMSAWAD, S.; CHANTRASIRI, S.; PATANAVIBUL, S.; HYAKITKOSOL, C.; PROMPETCHARA, S.; PITHAKARNOP, N.; CHALERMKLIN, P. 1985. Determination of biomass production of Nitrogen Fixing trees using allometric regression equation. *Nitrogen Fixing Tree Research*, Vol 3: 51-53.
- YUNUSA, A.M; MEAD, D.J.; POLLOCK, K.M.; LUCAS, R.J. 1995. Process studies in a *Pinus radiata*-pasture agroforestry systems in a subhumid temperature environment. I. Water use and light interception in the third year. *Agroforestry Systems* 32: 163-183.
- ZELADA, E. 1996. Tolerancia a la sombra de especies forrajeras herbáceas en la zona atlántica de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 88 p.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de variancia para RAFA incidente en pasturas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F
BLOQUE	2	0.8436
ÁRBOL	1	0.9317
ERROR (Parcela principal)	2	0.0137
POSICIÓN	5	0.0001
ERROR (Sub-parcela)	10	0.1721
ÁRBOL*POSICIÓN	5	0.7139
ERROR (Sub-sub-parcela)	10	0.0042
ÉPOCA	2	0.0004
ÁRBOL*ÉPOCA	2	0.2519
POSICIÓN*ÉPOCA	10	0.0486
ÁRBOL*POSICIÓN*ÉPOCA	10	0.5515
ERROR EXPERIMENTAL	48	

Anexo 2. Análisis de variancia para producción de materia seca de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F
BLOQUE	2	0.5653
ÁRBOL	1	0.2990
GRAMÍNEA	2	0.0003
ÁRBOL*GRAMÍNEA	2	0.4837
ERROR (Parcela principal)	10	0.0001
POSICIÓN	5	0.0045
ERROR (Sub-parcela)	10	0.5071
ÁRBOL*POSICIÓN	5	0.7237
GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.5900
ÁRBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.8634
ERROR (Sub-sub-parcela)	50	0.1111
ÉPOCA	4	0.0001
ÁRBOL*ÉPOCA	4	0.8462
GRAMÍNEA*ÉPOCA	8	0.0001
ÁRBOL*GRAMÍNEA*ÉPOCA	8	0.9794
POSICIÓN*ÉPOCA	20	0.2039
ÁRBOL*POSICIÓN*ÉPOCA	20	0.9007
GRAMÍNEA*POSICIÓN*ÉPOCA	40	0.0171
ÁRBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN*ÉPOCA	40	0.8156
ERROR EXPERIMENTAL	288	

Anexo 3. Análisis de variancia para la producción de hojas de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F
BLOQUE	2	0.8500
ARBOL	1	0.6382
GRAMÍNEA	2	0.0418
ARBOL*GRAMÍNEA	2	0.8990
ERROR (Parcela principal)	10	0.0005
POSICIÓN	5	0.0278
ERROR (Sub-parcela)	10	0.6429
ARBOL*POSICIÓN	5	0.6850
GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.0034
ARBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.5442
ERROR EXPERIMENTAL	50	

Anexo 4. Análisis de variancia para la EUR de tres gramíneas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F
BLOQUE	2	0.2562
ARBOL	1	0.9171
GRAMÍNEA	2	0.0092
ARBOL*GRAMÍNEA	2	0.8553
ERROR (Parcela principal)	10	0.0015
POSICIÓN	5	0.0004
ERROR (Sub-parcela)	10	0.0485
ARBOL*POSICIÓN	5	0.8558
GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.0123
ARBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.9999
ERROR EXPERIMENTAL	50	

Anexo 5. Análisis de variancia para relación hoja/tallo de pasturas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F
BLOQUE	2	0.1508
ÁRBOL	1	0.8204
GRAMÍNEA	2	0.0001
ÁRBOL*GRAMÍNEA	2	0.1057
ERROR (PARCELA PRINCIPAL)	10	0.4359
POSICIÓN	5	0.7257
ERROR (Subparcela)	10	0.4375
ÁRBOL*POSICIÓN	5	0.2472
GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.2478
ÁRBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN	10	0.0636
ERROR EXPERIMENTAL	50	

Anexo 6. Análisis de variancia para parámetros de calidad nutritiva de pasturas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F		
		DIVMS	FDA	PCRUDA
BLOQUE	2	0.113	0.106	0.867
ÁRBOL	1	0.006	0.042	0.015
GRAMÍNEA	2	0.001	0.001	0.002
ÁRBOL*GRAMÍNEA	2	0.177	0.342	0.260
ERROR (Parcela principal)	10	0.871	0.767	0.328
POSICIÓN	2	0.024	0.008	0.076
ERROR (Subparcela)	4	0.807	0.487	0.545
ÁRBOL*POSICIÓN	2	0.958	0.775	0.891
GRAMÍNEA*POSICIÓN	4	0.815	0.552	0.556
ÁRBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN	4	0.743	0.886	0.155
ERROR EXPERIMENTAL	20			

Anexo 7. Análisis de variancia para producción de Energía metabolizable (PEM) y de Proteína Cruda (PPC) de pasturas en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F	
		PEM	PPC
BLOQUE	2	0.883	0.835
ARBOL	1	0.284	0.094
GRAMINEA	2	0.001	0.004
ÁRBOL*GRAMÍNEA	2	0.536	0.438
ERROR (Parcela principal)	10	0.170	0.480
POSICIÓN	2	0.537	0.598
ERROR (Sub-parcela)	4	0.391	0.353
ÁRBOL*POSICIÓN	2	0.886	0.868
GRAMÍNEA*POSICIÓN	4	0.990	0.979
ÁRBOL*GRAMÍNEA*POSICIÓN	4	0.981	0.953

Anexo 8. Análisis de variancia para DAP y Altura arbórea en Sistemas SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F	
		DAP	ALTURA
BLOQUE	2	0.336	0.658
ÁRBOL	1	0.144	0.604
GRAMÍNEA	2	0.428	0.663
ÁRBOL*GRAMÍNEA	2	0.961	0.622
ERROR EXPERIMENTAL	10		

Anexo 9. Modelos probados para estimar la biomasa arbórea aérea con base en medidas del DAP y Altura total.

MODELO	R2	R2 AJUST	C.V. %	Prob>F
<i>Eucalyptus deglupta</i>				
$B = -1.33^{NS} + 2.14^{**}D$	0.852	0.815	8.8	0.008
$B = 3.88^{NS} + 1.55^{**}H$	0.929	0.911	6.1	0.001
$B = 8.28^{**} + 0.12^{**}D^2$	0.819	0.773	9.8	0.013
$B = -50^{NS} + 13.18^{NS}D - 0.61^{NS}D^2$	0.932	0.886	6.9	0.017
$B = -24.46^* + 19.42^{**}Ln(D)$	0.882	0.852	7.9	0.005
$B = 4.24^{**} + 0.05^{**}D^2 + 1.05^{**}H$	0.999	0.999	0.4	0.001
$B = 10.99^{**} + 0.009^{**}D^2H$	0.933	0.916	5.9	0.001
$B = 2.12^{NS} + 0.09^{NS}D^2 - 0.004^{NS}D^2H + 1.24^{**}H$	0.999	0.999	0.3	0.001
$B = 5.73^* + 0.03^{NS}D^2 + 0.19^*DH - 0.008^{NS}D^2H$	0.999	0.999	0.4	0.001
$LnB = 2.08^{**} + 0.04^{NS}LnD + 0.04^{**}Ln(D)H$	0.998	0.998	0.3	0.001
<i>Acacia mangium</i>				
$B = 15.24^{**} + 0.63^{NS}D$	0.478	0.347	2.6	0.128
$B = 15.24^{**} + 0.63^{NS}H$	0.068	-0.164	3.4	0.615
$B = -0.60^{NS} + 1.03^{**}H + 1.02^{**}D$	0.999	0.999	0.1	0.001
$B = 17.75^{**} + 0.04^{NS}D^2$	0.475	0.344	2.6	0.129
$B = 12.17^{NS} + 1.41^{NS}D - 0.05^{NS}D^2$	0.479	0.132	3.0	0.375
$B = 9.97^{NS} + 4.97^{NS}Ln(D)$	0.479	0.349	2.6	0.127
$B = 3.44^* + 0.06^{**}D^2 + 1.03^{**}H$	0.997	0.995	0.2	0.001
$B = 16.96^{**} + 0.004^*D^2H$	0.669	0.586	2.1	0.046
$B = 8.09^{NS} - 0.02^{NS}D^2 + 0.007^{NS}D^2H + 0.65^{NS}H$	0.997	0.994	0.2	0.003
$B = 11.93^{NS} - 0.09^{NS}D^2 + 0.08^{NS}DH + 0.008^{NS}D^2H$	0.997	0.992	0.3	0.004
$LnB = 2.16^{**} + 0.09^{**}Ln(D) + 0.03^{**}Ln(D)H$	0.997	0.995	0.1	0.001

NS: No significativo (P>0.05); * : Significativo (P<0.05); ** : Altamente significativo (P<0.01)

Anexo 10. Análisis de variancia para biomasa arbórea aérea, biomasa aérea total y carbono almacenado en SSP, Guápiles, Costa Rica, 1999.

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	Pr > F		
		Biomasa arbórea	Biomasa total	Carbono almacenado
BLOQUE	2	0.716	0.796	0.749
ÁRBOL	1	0.874	0.810	0.843
GRAMÍNEA	2	0.854	0.187	0.155
ÁRBOL * GRAMÍNEA	2	0.879	0.592	0.529
ERROR EXPERIMENTAL	10			