

# Manejo de sistemas agrosilvopastoriles

Salvador Hernández\* y Miguel A. Gutiérrez\*\*

## Introducción

Los sistemas agrosilvopastoriles, como área del conocimiento científico, son una combinación de tecnologías tradicionales y modernas que se han sistematizado con el fin de ofrecer una alternativa viable y sostenible económica y ecológicamente a la ganadería extensiva tradicional, la cual, debido a la incompatibilidad entre las tecnologías utilizadas y el ambiente productivo, está ocasionando la degradación del suelo y el avance de la frontera agrícola sobre áreas frecuentemente menos adecuadas.

Los sistemas agrosilvopastoriles se refieren al manejo integrado del conjunto de procesos productivos al interior de la unidad de producción, así como a las prácticas de conservación relacionadas con el aprovechamiento de los recursos naturales. Desde este punto de vista, conviene enfocarlos como un sistema compuesto a su vez por subsistemas y por las interacciones que ocurren entre ellos. Se asume que la sostenibilidad de un sistema se da como producto de la complementariedad e interacción de todos sus componentes, que a su vez deben ser también sostenibles. En este sentido se puede decir que el objetivo de los sistemas agrosilvopastoriles es mejorar la producción mediante el uso integrado y sostenible de los recursos de la unidad productiva, incluyendo principalmente componentes agrícola, pecuario, forestal/agroforestal y familiar (CATIE, 1993).

Como parte importante de su identidad y su estrategia de sobrevivencia, los pequeños productores agrícolas cuentan con un rico bagaje de tecnologías para la producción, fundamentalmente mediante el aprovechamiento de los recursos naturales. La sistematización de estos conocimientos, junto con la generación de nuevas tecnologías y la disponibilidad de sistemas de información de cobertura global, facilitan hoy, más que nunca, el diseño inteligente de sistemas de producción basados en una gama amplia de opciones.

---

\* Institute of Ecology and Resource Management, The University of Edinburgh, West Mains Road, Edinburgh EH9 3JG, Escocia.

\*\* Unidad de Alimentación Animal, Escuela de Zootecnia, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, C.A., Correo electrónico: [usacmvyz@usac.edu.gt](mailto:usacmvyz@usac.edu.gt)

Por otro lado, el estudio científico de los agroecosistemas, y particularmente los agroecosistemas ganaderos, ha demostrado que el desarrollo tecnológico adolece de grandes vacíos, como es el caso de la conservación de la fertilidad natural del suelo, lo que es entendible ya que la tecnología se generó para sistemas de altos insumos, donde el uso de fertilizantes enmascara la pérdida de fertilidad, por sólo citar un ejemplo. Actualmente, cualquier profesional de la producción animal con un mínimo de preparación en ciencias, debe estar capacitado para elaborar un esquema de prioridades en el cual el uso adecuado de los recursos naturales forma el cimiento de un sistema de producción sostenible, sobre el que se basa el componente mayoritario de la estrategia de alimentación, sin negar la necesidad de suplementos, cuando estos son accesibles. En otras palabras, es fundamental que la producción de pastos y forrajes este basada en una estrategia de manejo sostenible de los recursos propios de la finca, preferentemente fuera de áreas de aptitud exclusivamente forestal.

El uso de fertilizantes y agroquímicos debe considerarse sólo como parte complementaria y en el nivel mínimo indispensable. La nutrición animal es, a su vez, el soporte esencial de la salud del hato, complementada con la inmunización y desparasitación, a cualquier costo. Sólo, entonces, en esta pirámide de prioridades, se debe considerar el manejo productivo y reproductivo del hato, el cual implica que los animales están bien alimentados y sanos. Los esfuerzos destinados a actividades como la división de potreros, la sincronización de partos, la mejora de la infraestructura o el uso de implantes anabólicos, por citar algunos ejemplos, serán de poco valor si no se asegura antes la disponibilidad de alimento durante todo el año y si los animales sufren parasitosis u otras enfermedades. Al final de la escala de importancia se encuentra el mejoramiento genético del hato, puesto que los animales de mérito elevado sólo manifestarán su potencial en la medida en que sus requerimientos ambientales, nutricionales y de salud estén satisfechos (Figura 1).

Mejoramiento genético
Manejo productivo y reproductivo
Salud animal
Estrategia de alimentación
Manejo de los recursos naturales

Figura 1. **Esquema de prioridades en un sistema de producción animal sostenible. La desestabilización del nivel inferior causa, tarde o temprano, el colapso de los componentes superiores.**

## **Contexto socioeconómico**

Existe un sector importante de la población rural en América tropical que está implícitamente marginado de las políticas nacionales de desarrollo, que usualmente ocupan las áreas con limitantes productivas más severas. La mayor parte de las tecnologías generadas en los centros de investigación y reflejadas en la variedad del mercado de insumos, muestra que la versión oficial del desarrollo pecuario no reconoce la existencia, o no le concede la mínima importancia, a los pequeños productores, en la medida que estos básicamente no consumen insumos comerciales, no generan mercancías y tampoco tributan al fisco.

En este documento se considera como objeto de estudio el conjunto de tecnologías agrosilvopastoriles enfocadas hacia pequeños productores —y más puntualmente hacia un tipo de pequeños productores: los pequeños finqueros— aunque éstas pueden ser utilizadas en fincas de mayor tamaño.

### **Tipos de productores**

Debido a que el sector de los pequeños productores agropecuarios es el más amplio dentro de la población rural, se considera importante subdividirlo para facilitar el entendimiento de los patrones de adopción tecnológica. Se usará una clasificación de productores basada en la disponibilidad de medios de producción en la unidad familiar, que incluye los pequeños finqueros, los campesinos sin tierra y un tercer grupo al que aquí se denominará ‘campesinos temporales’.

Los pequeños finqueros o pequeños agricultores son aquellos con título de propiedad legal de las tierras que trabajan, las cuales son en general de extensión limitada o bien no se cuenta con el capital para hacerlas más productivas. En este grupo se incluyen los minifundistas y las poblaciones con terrenos comunales, con sus distintos grados de individualización en el manejo de los recursos.

Los campesinos sin tierra trabajan parcelas ajenas mediante un contrato de arrendamiento o un convenio de mediería, un sistema en el cual el arrendador pone los medios de producción y el arrendatario la fuerza de trabajo y la cosecha se reparte entre ambos. También se incluyen en este grupo a los invasores de predios privados y nacionales, los desplazados y refugiados que ocupan temporalmente tierras para practicar la agricultura. Este grupo se caracteriza por carecer de título de propiedad. Es muy posible que este tipo de productores no tenga entre sus prioridades la inversión en infraestructura agropecuaria o el

establecimiento de pasturas mejoradas o plantaciones, al menos mientras no vean resueltas sus prioridades en el ámbito agrario. Más aún, los productores en este grupo no son en general sujetos de crédito bancario y es muy posible que tampoco formen parte de las organizaciones que velan por los derechos de los pequeños productores agrícolas.

Los campesinos temporaleros se ubican bajo el nivel mínimo de subsistencia en lo que se refiere a la unidad familiar de producción agropecuaria, por lo que se ven obligados a incorporarse a actividades económicas externas, que les permitan subsidiar su propia unidad de producción agropecuaria. En este grupo se encuentran los jornaleros agrícolas originarios de regiones secas, o de los altiplanos con serias limitantes edafoclimáticas donde, en el mejor de los casos, sólo se recoge una cosecha por año. En este grupo, durante la estación seca los hombres (y en ocasiones las mujeres y niños) migran a las zonas de agricultura comercial para alquilarse como peones agrícolas o a las ciudades como obreros. También se pueden incluir unidades familiares con estrategias económicas mixtas, tales como aquellas en que algunos de los miembros se trasladan por largas temporadas a otro sitio y continúan transfiriendo recursos para el sustento familiar; un ejemplo lo constituyen los obreros y peones agrícolas mexicanos y centroamericanos en las fincas frutícolas y de hortalizas de la frontera sur de Estados Unidos y en la península de Florida. La diferencia con el grupo de los campesinos sin tierra, en términos de las posibilidades de transformación de su sistema productivo, es que en este caso el recurso marginal no es la tierra sino la mano de obra.

De los grupos mencionados, el de los pequeños agricultores es el de mayor potencial para el cambio tecnológico, ya que cuentan con terreno propio donde desarrollar inversiones de largo plazo y permanecen durante todo el año en su propio lugar. A este grupo de productores está principalmente destinada la temática de este documento. Baste mencionar como prueba de su propensión al cambio que es este grupo quien más se ha alejado de las prácticas tradicionales de cultivo, adoptando de manera más o menos forzada la tecnología de altos insumos. Las razones de este cambio residen en la composición del paquete tecnológico oficial, que goza de la exclusividad en los medios de comunicación, además de ser el único disponible en el mercado local y el que ofrece cumplir el sueño de convertirse en un ganadero próspero, aunque esto normalmente no llega a cumplirse. Los sistemas campesinos están basados en la fuerza de trabajo familiar, por lo que la compra de insumos implica el sacrificio de necesidades relacionadas con la subsistencia de la familia; en el mejor de los casos esto implica que los insumos no lleguen en el tiempo, cantidad y calidad recomendados. Por otro lado, el deterioro ambiental asociado a la sobreexplotación de la base de recursos, la cual se da por la introducción no regulada de semillas mejoradas, fertilizantes, herbicidas, etc. ocasiona un

grave desequilibrio en un sistema de finca que por lo demás sigue basado en la explotación de los recursos naturales.

Estos dos aspectos son comúnmente ignorados durante el proceso de transferencia tecnológica. Los sistemas agrosilvopastoriles, como se dijo, consideran la combinación de tecnologías tradicionales y modernas, cuando éstas son aplicadas dentro del contexto del manejo integrado de los recursos de la unidad de producción y de acuerdo con su propia vocación ecológica.

### **Contexto biofísico**

La diversidad ambiental dentro de la faja tropical del continente americano rebasa ampliamente los alcances de esta publicación, por lo que se considera importante establecer los límites dentro de los cuales este documento tiene aplicación. América tropical puede ser dividida a grosso modo en las regiones cálida (tierras bajas) y templada (tierras altas). El presente trabajo está circunscrito a la región cálida.

La región templada de América tropical cuenta con enorme riqueza biológica y ambiental y debido a la situación económica prevalece una demanda por una revisión de las formas en que se han venido manejando los recursos productivos, aspecto en el que los sistemas agrosilvopastoriles tienen un papel importante. Existen muchos ejemplos de desarrollo in situ de sistemas silvopastoriles, donde el campesino innovador, adoptando tecnologías ya validadas, logra contrarrestar el deterioro de los recursos naturales como son las fuentes de agua y el suelo, confiriendo a su sistema sostenibilidad y biodiversidad. Un caso digno de mención es el de la comunidad de San José Caben, San Marcos, Guatemala. Sin embargo, gran parte de las tecnologías que tienen aplicación en las regiones templadas, no la tienen en las regiones calientes, principalmente debido a los diferentes regímenes climáticos que gobiernan cada región. Adicionalmente, la composición de especies en los ecosistemas es distinta, como también lo son las plagas y enfermedades que las atacan. Si bien el abordar el manejo de sistemas agrosilvopastoriles en regiones templadas merece un capítulo aparte, los lectores interesados en estos agroecosistemas podrán encontrar información de utilidad, teniendo en cuenta las diferencias ambientales. Con esto se desea prevenir sobre la inadecuada aplicación de tecnologías y principios que dependen del contexto biofísico en el que han sido probados.

La región cálida constituye una porción importante del total de tierras cultivadas y su clima es, en sí, un factor determinante para la adaptación de las especies, las tasas de

crecimiento y otros factores fundamentales para el diseño y manejo de sistemas productivos. A nivel mundial, las mayores posibilidades de expansión agrícola residen en el trópico, fundamentalmente sobre suelos ácidos e infértiles. En América tropical el 33.6% de los suelos potencialmente agrícolas son Oxisoles y el 21.4% son Ultisoles (FAO-UNESCO, 1971; 1975), cuyas limitaciones más comunes son de carácter químico más que físico. Cuando éstas son superadas, su productividad es de las más altas en el mundo (Sánchez y Salinas, 1981).

Los sistemas de pastoreo extensivo en los trópicos presentan un promedio de productividad de alrededor de 100 kg de peso vivo (PV) animal/ha por año, lo que implica una extracción inferior a 2 kg de nitrógeno. Experiencias tanto en la región húmeda como en la seca en el Sahel coinciden en que con un nivel de pastoreo moderado, este sistema es capaz de mantener el balance de nutrimentos en el suelo, siempre que la carga animal no sobrepase 1 animal/ha (Powell y Williams, 1993). Este sistema parece ser particularmente estable, aún sin la adición de fertilizantes, sin embargo, resulta cada vez más difícil mantener la sostenibilidad debido a la creciente demanda de alimentos (lo que obliga a la intensificación del sistema), a la falta de un reservorio de nutrimentos en el suelo (materia orgánica de fácil descomposición) y a la ausencia de un sistema radicular capaz de explorar regiones más profundas en el suelo.

Tanto por razones socioeconómicas como ambientales, es necesario restablecer en los agrosistemas el rol de estabilización de la vegetación natural e incorporar los suelos acidificados y los naturalmente ácidos a la agricultura (Szott, et al., 1991; Sánchez y Salinas, 1981). Dentro de este contexto, los sistemas silvopastoriles podrían resultar una alternativa para la recuperación de la productividad de las pasturas en los trópicos.

### **Interacciones en sistemas silvopastoriles**

El efecto ocasionado por la presencia de árboles en los potreros sobre la producción de pasto y animal es uno de los aspectos más controversiales para la adopción de tecnologías silvopastoriles. Esto se debe principalmente a la complejidad de las interacciones biológicas entre las especies y de éstas con el suelo y el ambiente. En un sistema de pasturas con árboles el entendimiento y control sobre sus interacciones es determinante en el balance de complementariedad y competencia entre las dos poblaciones. En este acápite se analizarán algunos ejemplos referentes a tres grandes rubros de interacciones suelo-árbol-pastura-animal.

#### **Intercepción de la radiación solar**

La intercepción de la radiación solar conlleva directamente la alteración simultánea de dos recursos importantes para las pasturas: la radiación fotosintéticamente activa y la

temperatura. Adicionalmente, conlleva indirectamente la alteración de la humedad de la capa superficial del suelo, importante para el balance hídrico del cultivo y para la asimilación de nutrimentos en solución. Se ha demostrado que de acuerdo a las condiciones ambientales la presencia de un dosel relativamente abierto puede favorecer el desarrollo de la pastura, mediante el adecuado equilibrio de las condiciones microclimáticas que se dan bajo la copa de cada árbol en una pastura. En Centroamérica, por ej., las gramíneas que crecen bajo coberturas hasta de 50% presentan incrementos notables en la calidad nutricional, especialmente su contenido de proteína, sin un deterioro significativo en la producción de biomasa (Daccarett y Blydenstein, 1968). Aunque es importante guardar ciertas reservas en la interpretación de este tipo de resultados, debido sobre todo a que las condiciones de cobertura y radiación variaron entre las especies del dosel; se debe reconocer, sin embargo, que este trabajo fue pionero en demostrar los beneficios asociados a la presencia de árboles en pasturas tropicales. En el experimento se compararon silvopasturas con tres especies fijadoras de N<sub>2</sub> (*Erythrina poeppigiana*, *Gliricidia sepium*, y *Pithecoelobium saman*) y una no fijadora (*Cordia alliodora*) en densidades similares (60 árboles/ha). Uno de los hallazgos más notables fue la influencia de la sombra moderada sobre la calidad del pasto. Los valores de proteína aumentaron con los mayores niveles de sombra, mientras que el contenido de fibra pareció aumentar en el caso contrario, aunque menos notoriamente (Cuadro 1). Esto puede ser explicado por que el grosor de los entrenudos y la longitud de los estolones, que son porciones de la planta altas en fibra, que incrementan proporcionalmente con la temperatura ambiental (Murtagh et al., 1987). Adicionalmente, altas intensidades de luz inhiben más rápidamente la producción de proteína que la de carbohidratos (Bronstein, 1983).

Cuadro 1. **Efecto de la intercepción de la radiación solar por árboles forrajeros sobre la producción de biomasa y proteína cruda de una pastura asociada *Panicum maximum*, *Paspalum fasciculatum*, *Homolepsis aturensis* y *Digitaria decumbens*.**

Especie de árbol	Árbol			Pastura		
	Diámetro de copa (m)	Cobertura arbórea (%)	Rad. solar interceptada (%)	Producción Biomasa (t/ha)	Proteína cruda (%)	Fibra cruda (%)
Leguminosas fijadoras de N <sub>2</sub> :						
<i>Erythrina poeppigiana</i>	10.4	51.0	56.0	6.39	8.37	29.2
<i>Gliricidia sepium</i>	6.1	17.5	43.4	6.39	6.54	29.7
<i>Pithecoelobium saman</i>	5.1	12.2	18.0	7.20	6.73	29.0
Boraginacea no fijadora de N <sub>2</sub> :						
<i>Cordia aliadora</i>	3.4	5.4	6.1	7.52	6.17	29.9
Testigo sin árboles	—	0.0	0.0	7.50	6.00	31.9

Adaptado de Daccarett y Blydenstein, 1968.

Los pastos bajo condiciones de menor temperatura del aire (como en el caso de la sombra moderada) reducen su tasa fotosintética (Ludlow, 1978: gramíneas C<sub>4</sub>; Johnson y Thornley, 1984: pasturas de clima templado; Herrero, 1995: *Pennisetum clandestinum*) y como consecuencia producen menos hojas. La disminución en la tasa de aparición de hojas reduce la translocación de sustrato, manteniendo la concentración de rubisco (ribulosa bifosfato carboxilasa) y clorofila en la misma hoja por mayor tiempo (Ludlow et al., 1988), lo cual explica la mayor concentración de nitrógeno (proteína cruda) en la pastura. De esta forma, la biomasa en oferta mantiene una mejor calidad por mayor tiempo, debido a un efecto múltiple de la radiación solar en el cual, si bien la tasa fotosintética se reduce, la eficiencia fotosintética se incrementa debido a la mayor concentración de nitrógeno en la hoja, y a la reducción de la tasa respiratoria y de evapotranspiración del cultivo. Murtagh et al. (1987), por ejemplo, reportaron que la tasa específica respiratoria de mantenimiento del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) se incrementa de 11 mg/g por día a 15 °C hasta 37 mg/g por día a 30 °C, por lo que la eficiencia en la utilización de la radiación solar disminuye debido a un mayor consumo de fotosintatos para mantenimiento.

En la Isla de Guadalupe, Antillas Francesas, la sombra de hileras de árboles en potreros de *Dichantium aristatum* mejoró consistentemente la eficiencia de la gramínea en la utilización de la radiación solar, independientemente de la estación climática (Cruz, 1997). En un experimento en el que el efecto de la deposición natural o artificial de hojas de árboles y las excretas de los animales fueron eliminadas, se evaluaron pasturas de *D. aristatum* (Chamba) a pleno sol y bajo sombra de *G. sepium* (Jacq.) Walp. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit durante cuatro estaciones de crecimiento, dos con menor precipitación (A y C, ver Cuadro 2) y dos con mayor precipitación (B y D). La presencia de sombra no incrementó la producción de pasto, sin embargo, la producción fue más eficiente en función de la disponibilidad de radiación solar a nivel de la pastura, posiblemente debido a la mayor concentración de N en la lámina foliar. Durante los periodos de baja precipitación, la producción de pasto fue similar entre los tratamientos; la presencia de sombra ayudó a conservar la humedad en el suelo, permitiendo al pasto sucesivamente el acceso a nutrimentos y agua, continuar sus funciones de crecimiento, incrementar su área foliar, mantener la apertura de estomas y un nivel eficiente de fotosíntesis. En los periodos más lluviosos la presencia del árbol resulto menos ventajosa debido a que las condiciones permanentes de humedad en el suelo y el descenso de la temperatura debido a la presencia de nubes facilitaron el crecimiento del pasto a pleno sol. Aún bajo estas condiciones, la eficiencia en la utilización de la radiación solar (EUR) fue menor en la parcela sin sombra, lo cual sugiere, si se considera que la EUR es calculada como función de la relación entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFA) y la producción de biomasa (MS), que una proporción importante de la biomasa en las parcelas a pleno sol lo



Cuadro 2. **Efecto de la sombra en la producción de biomasa verde (MS), índice de área foliar (IAF), radiación absorbida (RFA) y la eficiencia en la utilización de la radiación solar (EUR) de *Dichanthium aristatum* bajo sombra y a pleno sol durante cuatro ciclos de crecimiento (FUENTE: Cruz, 1997).**

Parámetro	A		B		C		D	
	Sombra	Sol	Sombra	Sol	Sombra	Sol	Sombra	Sol
MS (g/m <sup>2</sup> )	248	245	202 a	333 b	138	125	303	303
IAF	4.5 a	3.4 b	3.9 a	4.8 b	1.9	1.4	5.8 a	3.4 b
RFA (MJ/m)	95	251	69	178	93	140	165	270
EUR	47.6	53.1	32.3	76.4	42.9	75.2	39.5	62.1
Origen (g)	2.00 a	0.77 b	2.50 a	1.42 b	1.03	0.34 b	1.62 a	1.03 b
Pend (g/MJ)	0.05	0.09	0.07	0.08	0.05	0.06	0.07	—
E.S. (0.07)	0.98	0.97	0.99	0.98	0.96	0.87	0.94	0.94

A: de mayo 16 a junio 17 de 1991, B: de octubre 18 a noviembre 21 de 1991, C: de enero 13 a febrero 17 de 1992 y D: de abril 27 a junio 3 de 1992.

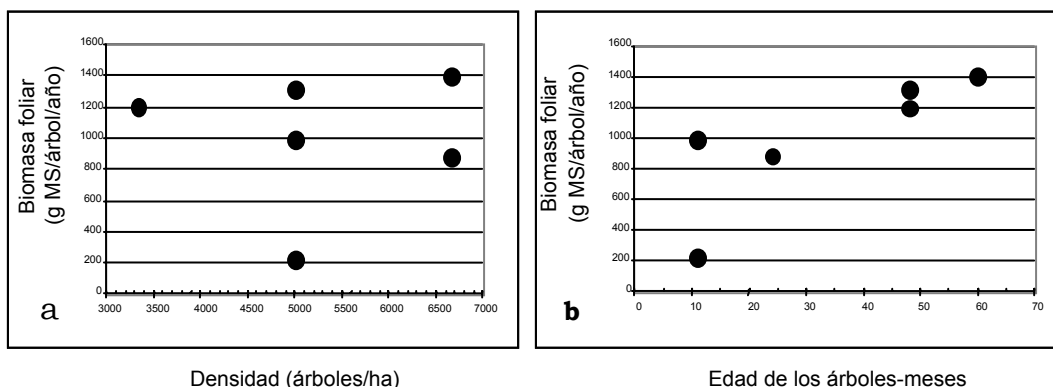
constituía tejido senescente y tallos, los cuales no forman parte del aparato fotosintético. En general, el pasto que crece bajo la copa de los árboles se beneficia, al menos durante la estación seca, de la sombra y la humedad, la concentración de nutrientes producto de la muerte de raíces y la ocurrencia de fauna huésped del árbol, del lavado de hojas y tallos y de la producción de mantillo.

Cruz (1997) también encontró que el pasto que crecía bajo sombra presentó consistentemente mayor tasa marginal de asimilación de nitrógeno desde la solución del suelo para un nivel de acumulación de materia seca, por lo que la relación N metabólico/N estructural se mantuvo más alta. La tasa marginal de asimilación de nitrógeno (N asimilado por unidad de incremento de biomasa) es un indicador de la disponibilidad de este nutriente en el suelo (Lemaire y Salette, 1984). Esto tiene dos implicaciones principales, si se considera que la plantación presentó bajos niveles de nodulación. Primero, el árbol mejora efectivamente el régimen hídrico del cultivo durante la época seca, permitiendo prolongar la estación de crecimiento. Segundo, la relación carbono:nitrógeno fue más baja en el pasto bajo sombra, lo que mejora la calidad de la dieta para el animal. El pasto bajo sombra tuvo un contenido promedio de N de 2.64%, mientras que el pasto a pleno sol presentó 1.61% N, en promedio.

Cabe señalar que cuando las parcelas sin sombra fueron fertilizadas e irrigadas para mantener el nivel óptimo de crecimiento del pasto, las diferencias en la eficiencia en la utilización de la radiación entre ambos tratamientos desaparecieron por completo (datos no presentados).

### Producción de biomasa

Fernández et al. (1994) hacen un resumen de la información disponible sobre el potencial productivo de árboles en cultivo en sistemas de callejones, la cual, hasta cierto punto, puede extrapolarse a silvopasturas, cuando los árboles son podados permanentemente como fuente de mantillo o forraje. Su revisión abarca suelos moderadamente fértiles e infértiles en zonas húmedas y subhúmedas de los trópicos. En la Figura 2 se ilustra el caso de *G. sepium*, especie que mostró consistencia en la producción de biomasa aérea en un rango de precipitación anual entre 2200 y 3000 mm y en un gradiente de densidades de siembra desde 3300 hasta 6700 árboles/ha (Figura 2a). Las variaciones dentro de la misma densidad están marcadamente asociadas con la edad de la plantación y la proveniencia del cultivar reportado. Consistentemente los árboles logran mayor productividad a mayor edad, ya que el sistema radicular alcanza una mayor cobertura para la captación de nutrientes y agua (Figura 2b).



### Materia orgánica en el suelo

La materia orgánica en el suelo se produce a partir de la humificación de las partes muertas de las plantas, las cuales no sólo incluyen las hojas y ramas, sino las raíces y los microorganismos simbiotes asociados con ellas (rizobios y micorrizas). En suelos orgánicos las lombrices tienen un papel importante.

El N en la materia orgánica se encuentra como constituyente de compuestos orgánicos, por lo que su tasa de mineralización se considera dependiente de la tasa de descomposición de la fracción a la cual está unido en su conjunto (Thomas y Asakawa, 1993). El proceso de

descomposición de los tejidos vegetales es esencialmente una consecuencia de la asimilación de carbohidratos como fuente de energía por parte de los microorganismos del suelo. Este proceso se caracteriza por la selectividad de estos microorganismos hacia aquellos compuestos con menor peso molecular.

La tasa de descomposición del contenido celular, principalmente constituido por compuestos de bajo peso molecular, es bastante rápida, especialmente en ambientes cálido-húmedos. En diversos estudios se ha encontrado que la tasa de descomposición de esta fracción puede ser representada como una función exponencial negativa del tipo:

$$Y = Y_0 e^{-kt}$$

con una constante de degradación  $k$  entre 0.03 y 0.20/semana. Estos valores son característicos de material resultante de podas de leguminosas tropicales (Cuadro 3).

Cuadro 3. **Tasas de descomposición ( $k$ )/semana de material de poda de especies utilizadas como abono verde en zonas tropicales.**

Especies	$K^*$	Observaciones	FUENTE
<i>Acioa barteri</i>	0.0011	Hojas y tallos tiernos (tropico húmedo)	Tian et al., 1992
<i>Gliricidia sepium</i>	0.192	Hojas y tallos tiernos (tropico húmedo)	Tian et al., 1992
<i>Leucaena leucocephala</i>	0.121	Hojas (trópico seco)	Mwiinga et al., 1994.
	0.125	Hojas y tallos tiernos (tropico húmedo)	Tian et al., 1992
<i>Flemingia congesta</i>	0.103	Hojas secas (promedio de épocas del año)	Vanlauwe et al., 1995.
	0.099	Hojas (trópico seco)	Mwiinga, et al. 1994.
<i>Sesbania sesban</i>	0.029	Hojas (trópico seco)	Mwiing et al., 1994.
<i>Senna siamea</i>	0.091	Hojas (trópico seco)	Vanlauwe et al., 1995.
<i>Dactyladenia barteri</i>	0.088	Hojas secas (promedio de épocas del año)	Vanlauwe et al., 1995.
	0.046	Hojas secas (promedio de épocas del año)	Palm y Sánchez, 1990
<i>Inga edulis</i>	0.072	Hojas secas (promedio de épocas del año)	Palm y Sánchez, 1990
<i>Cajanus cajan</i>	0.061	Biomasa libre de ceniza (trópico húmedo)	Palm y Sánchez, 1990
	0.067	Biomasa libre de ceniza (trópico húmedo)	Palm y Sánchez, 1990

\* Tasas derivadas al ajustar los residuos a la ecuación exponencial  $Y = e^{-kt}$  donde  $Y$  es la fracción remanente del material original después de un tiempo  $t$ .

A diferencia del material resultante de las podas, el material muerto en forma natural es rico en polímeros de carbono como celulosa/hemicelulosa, así como en lignina y otros polifenoles. Su tasa de descomposición es entre uno y tres órdenes de magnitud menor que la del contenido celular. En experimentos para determinar la tasa de mineralización del N en residuos vegetales de diversas calidades se han encontrado altos coeficientes de correlación entre la tasa de descomposición y una baja relación polifenoles:nitrógeno (Oglesby y Fownes, 1992; Palm y Sánchez, 1991), baja relación lignina:nitrógeno (Kachaca et al., 1993; Melillo et al., 1982), alta fracción soluble y baja relación C:N (Vanlauwe et al., 1997). La edad y la parte de la planta controlan, junto con la especie, las características mencionadas. Los residuos provenientes de partes más viejas de la planta contienen una mayor proporción del nitrógeno asociado con la pared celular, donde las relaciones C:N son más altas (100:1) y por consecuencia, la tasa de mineralización es significativamente más baja (Handayanto et al., 1995).

## **Sistemas silvopastoriles**

### **Pastoreo en plantaciones**

La práctica del pastoreo en plantaciones forestales se realiza con el propósito de obtener ingresos a un plazo menor que el permitido en la rotación para el aprovechamiento forestal, aunque en algunos casos esto implica una mayor distancia entre árboles. Sin embargo la presencia de animales, siempre que no dañen la plantación, puede promover el crecimiento de los árboles mediante el control de malezas, una menor competencia entre plantas y el reciclaje de nutrimentos.

Se mencionan a continuación algunos ejemplos y sistemas silvopastoriles exitosos. En el altiplano oriental de Antioquia, en Colombia, la ganadería lechera se basa en el pastoreo de kikuyo (*P. clandestinum*) en tierras severamente degradadas. La producción depende de la adición de fertilizantes. La recuperación de pasturas degradadas se hace mediante la siembra de cultivos tradicionales como frijol voluble, maíz y papa (Murgueitio y Calle, 1998). En una finca de la región, se establecieron aliso (*Alnus acuminata*) y barreras vivas de botón de oro (*Tithonia diversifolia*) mediante el sistema Taungya, consistente en la siembra de los árboles en asociación con los cultivos anuales, con lo cual aquellos se benefician de las labores de cultivo. Una vez que los árboles se desarrollaron suficientemente, se permitió la invasión del kikuyo nuevamente. La incorporación de residuos de cosecha, aunado a la caída de hojas y la mortalidad natural de raíces del aliso, mejoraron la aireación y la estructura del suelo. La capacidad del aliso para fijar N atmosférico se aprovecha para recuperar la fertilidad del suelo,

de tal manera que se ha logrado restaurar la pastura bajo condiciones apropiadas de suelo en sólo 2 años. Similarmente, una explotación lechera basada en la asociación de aliso y kikuyo se ha mantenido estable y altamente productiva durante más de 25 años en las inmediaciones de Cantel, Quetzaltenango, Guatemala. En ambos casos, el sistema silvopastoril establecido sustituye monocultivos dependientes de insumos externos, diversifica los ingresos del productor y transforma la producción lechera en un sistema más sostenible.

En el sureste asiático se practica con éxito el pastoreo de bovinos y ovinos en plantaciones de palma de aceite y cocotero. La cantidad de luz transmitida bajo las plantaciones permite el desarrollo de pastos resistentes a un cierto nivel de sombra, entre ellos *P. maximum* y *Brachiaria decumbens* (Wilson y Ludlow, 1991). La presencia de animales incrementa el reciclaje de nutrimentos y reduce la competencia del estrato herbáceo, mejorando la producción de coco. Los subproductos industriales de la extracción de aceite posibilitan el engorde de cerdos o pueden ser utilizados en la ceba de bovinos u ovinos (Reynolds, 1995).

La introducción de leguminosas herbáceas puede incrementar la capacidad de carga y el rendimiento de la plantación. Rika et al. (1981) mencionan una asociación de *B. decumbens* y *Centrosema pubescens* en plantaciones de coco que produjo hasta 40% más frutos que los producidos por cocoteros en pasturas nativas. Aunque con una ganancia diaria moderada de PV animal (0.249 a 0.321 kg/ha), el pastoreo bajo la plantación superó consistentemente al sistema tradicional de alimentación basado en pasturas nativas de corte, tallo de banano (*Musa* sp.) y hojas de cocotero (Cuadro 4). El rendimiento en frutos incrementó significativamente al aumentar la carga animal. Estos resultados coinciden con los de Chen et al. (1978) en plantaciones de palma aceitera, donde se aprecian rendimientos de 5.2, 6.7 y 10.6 racimos por planta en el cultivo solo y con cargas animales de 1 y 2 animales/ha, respectivamente. El incremento en el rendimiento de la plantación se asocia directamente con un efecto depresivo sobre la competencia que ejercen las raíces del pasto sobre la palma (Chen, et al., 1978) y con el aumento del reciclaje de nutrimentos al aumentar la carga animal, lo cual puede potenciarse mediante la introducción de especies mejoradas que incorporan al sistema mayor producción de biomasa, mayor calidad nutritiva de la dieta y fijación biológica de nitrógeno más eficiente. La sombra es quizá uno de los factores más importantes de la interacción, por lo que la selección de especies tolerantes es determinante para el éxito del sistema; por ej., *B. decumbens* es capaz de mantener niveles de producción similares en un rango desde 100% hasta 70% de la radiación solar total (Eriksen y Whitney, 1981; Wong et al. 1985).

Cuadro 4. **Efecto de la siembra de pasturas (gramínea-leguminosa) mejoradas y pastoreo en la ganancia de peso y el rendimiento de cocoteros en Bali, Indonesia.**

Tratamiento	Carga animal (Anim/ha)	Ganancia de PV (kg/ha por día)	Producción de coco (kg/ha por mes)
<i>B. decumbens</i> + <i>C. pubescens</i>			
	2.7	0.321	507
	3.6	0.313	516
	4.8	0.293	713
	6.3	0.249	779
Pastos nativos	—	—	483
Sistema tradicional	—	0.235	—

\* Ganado Bali (*Bos banteng*).

FUENTE: Rika et al., 1981.

Este tipo de sistemas tiene más oportunidades bajo plantaciones totalmente desarrolladas, donde la cantidad y la calidad de la luz transmitida a través del dosel superior son suficientemente altas para permitir el máximo desarrollo de la pastura (Thomas, 1978; en Torres, 1985).

### **Bancos de proteína**

Estos podrían ser mas apropiadamente denominados bancos forrajeros arbóreos, por ser productores de forraje, sin embargo, a la fecha se utilizan predominantemente árboles con follajes ricos en proteínas (Cuadro 5), de ahí su nombre. El banco de proteína es la forma más intensiva de producción de forraje de plantas leñosas y consiste normalmente en la siembra en monocultivo de especies de árboles o arbustos de alto valor nutritivo y alta capacidad de rebrote después del aprovechamiento. Los bancos de proteína son áreas compactas destinadas a la suplementación animal y, por tanto, es conveniente ubicarlas cerca de las instalaciones de manejo y alimentación. Pueden ser aprovechados directamente por los animales (ramoneo) o podados cíclicamente para alimentación en corral (Botero y Russo, 1998).

Las tecnologías de este tipo permiten producir volúmenes de forraje de alta calidad en cantidades que impactan positivamente la nutrición del hato. La documentación sobre cultivos de árboles con niveles proteínicos altos es extensa. Estos son bien aceptados por animales y su digestibilidad indica un satisfactorio nivel de aprovechamiento.

**Rentabilidad.** La rentabilidad es probablemente el argumento más sólido para la introducción de un banco de proteína como alternativa a un sistema tradicional. Por ejemplo, Hernández et al. (1986) reportan incrementos de hasta 51% en la producción de carne por hectárea en la

Cuadro 5. **Contenido de proteína cruda (PC), digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS), fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FAD) de algunas especies leñosas forrajeras en América Latina**

Especies	Proteína cruda (%)	DIVMS (%)	FDN (%)	FAD (%)	FUENTE
<b>Zonas húmedas</b>					
<b>Leguminosas:</b>					
<i>Leucaena leucocephala</i>	18.6		34.6	18.2	Ku et al., 1998
<i>Erythrina poeppigiana</i>	12.9		48.4	35.6	Ku et al., 1998
<i>Erythrina poeppigiana</i>	23.8				Benavides, 1998
<i>Erythrina berteroana</i>	24.3	51.3	65.2	45.8	Benavides, 1998
<i>Erythrina tinifolia</i>	15.7	55			Ku et al., 1998
<b>Zonas subhúmedas</b>					
<b>Leguminosas:</b>					
<i>Gliricidia sepium</i>	19.3-21.6	59.2	35.7	21.8	Ku et al., 1998
<i>Cratylia argentea</i>	23.5	48-53			Argel y Lascano, 1998
<b>Moráceas</b>					
<i>Brosimum alicastrum</i>	15.7		37.5		Ku et al., 1998
<i>Morus alba</i>	23.0	79.9		28.5	Benavides, 1998
<b>Malvaceas</b>					
<i>Hibiscus rosasinensis</i>	21.0	70.0			Benavides, 1998
<i>Malvabiscus arborea</i>	22.4	64.5			Benavides, 1998
<b>Zonas bajas</b>					
<b>Otras familias:</b>					
<i>Cnidocolus acontifolius</i>	42.4	86.6			Benavides, 1998
<i>Cnidocolus chayamana</i>	30.8	74.8			Hernández, 1993
<i>Trichanthera gigantea</i>	9.0-17.8		29.4-41.7	21.8-29.2	Rosales y Ríos, 1998
<i>Moringa oleifera</i>	23	79	30	27	Foild et al., 1998
<i>Tithonia diversifolia</i>	24.2-27.5		35.3	30.5	Rosales 1996
<i>Guazuma ulmifolia</i>	14.7-18.1	54.3	45.1-49.5	28.9-31.4	Ku et al., 1998
<i>Hamelia patens</i>	17.5	61.6			Pezo et al., 1990
<i>Cecropia peltata</i>	19.8	51.8			Hernández, 1993 Hernández, 1993
<b>Zonas altas</b>					
<i>Sambucus canadiensis</i>	25.8	73.7	32.6		Arias, 1998
<i>Sambucus mexicana</i>	25.0	69.8	30.7		Arias, 1998
<i>Bacharis salicifolia</i>	23.4	71.5	33.3		Arias, 1998
<i>Bohemeria spp.</i>	24.8	66.3	28.9		Arias, 1998
<i>Verbesina apleura</i>	24.4	50.6	49.2		Arias, 1998
<i>Budleia sp.</i>	17.1	55.9	51.8		Arias, 1998

ceba inicial de novillos Cebú con un sistema de banco de proteína de *L. leucocephala* como complemento a una pastura natural asociada con leguminosas (*Neonotonia*, *Macroptilum*, *Teramnus* e *Indigofera*) en relación con un control con pasto nativo. La diferencia se incrementó a 73% durante la ceba final. Estos resultados fueron comparables a las ganancias de animales suplementados con melaza-urea a razón de 1.5 kg/día o con harina de soya (200 g/animal por día) durante la mitad de la época seca (Cuadro 6).

El incremento en la calidad de la dieta tiene efectos positivos en la edad al sacrificio de los animales, como lo demostraron Hernández et al. (1992). Toros cebados en pasturas de *Andropogon gayanus* cv. CIAT-621 suplementados en un banco de proteína de *L. leucocephala* alcanzaron un peso al sacrificio de 448 kg en 29 meses (Cuadro 6), mientras que sin

Cuadro 6. **Resumen de resultados experimentales obtenidos con vacunos en sistemas de ceba, reemplazo y leche en Cuba.**

Tratamiento	Raza	Carga animal (anim/ha)	Producción
Ceba (PV, kg/animal por día):			
<i>L. leucocephala</i> y <i>Panicum maximum</i> cv. Likoni <sup>a</sup>	Cebú	2.0	0.530
<i>L. leucocephala</i> , pastos naturales y leguminosas herbáceas <sup>b</sup>	Cebú	2.0	0.715
<i>L. leucocephala</i> y <i>Andropogon gayanus</i> CIAT 621 <sup>c</sup>	Cebú	1.7 – 2.0	0.487
Reemplazo (PV, kg/ha por día):			
<i>L. leucocephala</i> y <i>Panicum maximum</i> <sup>d</sup>	3/4H x 1/4C	2.5	0.450
<i>L. leucocephala</i> y <i>Andropogon gayanus</i> CIAT 621 <sup>e</sup>	Cebú	2.0	0.407
Vacas lecheras (lt/vaca por día):			
<i>L. leucocephala</i> cv. Perú + <i>P. maximum</i> cv. Likoni <sup>f</sup>	Mestizas (H x C)	2.7	10.0

H: Holstein, C: Cebú

a Simón et al., 1990 (en Hernández et al., 1998)

b Hernández et al., 1986

c Hernández et al., 1992.

d Iglesias et al., 1994

e Hernández y Carballo, datos inéditos, (en Hernández et al., 1998)

f Milera et al., 1994.

suplementación el peso al sacrificio se alcanzó a los 60 meses. Resultados similares se han obtenido en la producción de hembras de reemplazo (Cuadro 6), ya que la utilización del banco de proteína de *L. leucocephala* permitió reducir de 36 a 25 meses (promedio de tres ciclos de manejo) la edad de incorporación de novillas Cebú pastando *A. gayanus* cv. CIAT-621 (Hernández et al., 1998).

El banco de proteína puede ofrecer resultados positivos inclusive en sistemas más intensivos, así, vacas lecheras en pastoreo de *Panicum maximum* cv. Likoni con un banco de proteína en 20% del área y fertilización de la gramínea (140 kg/ha de N por año) lograron niveles de producción de 10 lt/día (promedio de 3 años), superando significativamente ( $P < 0.01$ ) un control sin suplementación (Milera et al., 1994; ver Cuadro 6).

**Sostenibilidad ecológica.** Debido a la elevada demanda de nutrientes y agua, el banco de proteína puede colapsar en pocos años, si en su planificación no se toman en cuenta la selección de la especie adecuada, el tamaño de la parcela, la demanda de forraje, la disponibilidad de abono para mantener la producción y los cambios estacionales en el nivel productivo. El uso de especies fijadoras de nitrógeno mantiene parcialmente el balance de nutrientes, pero pueden ser necesarias adiciones de residuos orgánicos, lo cual incrementa el costo de manejo.



La asociación de leguminosas leñosas perennes con leguminosas herbáceas en el banco de proteína puede potenciar la capacidad productiva, haciendo más costea la inversión, sin embargo, no es fácil lograr el equilibrio entre los dos estratos. En Cuba, en experimentos con *L. leucocephala* y *Neonotonia wightii* (Hernández, et al., 1992) la población de la leguminosa herbácea se redujo drásticamente, mientras que leucaena mantuvo la densidad inicial.

Gómez y Preston (1996) en el Valle del Cauca, Colombia, en un banco de proteína de con *Glericidia sepium* están produciendo 66.3 t/ha por año de forraje fresco (equivalente a 15.2 t/ha de materia seca) en cuatro cortes. Con este forraje se complementa la alimentación de vacas lecheras en pastoreo. Este sistema ha funcionado durante 10 años con un balance adecuado de nutrimentos (N, P, K, Mg, Ca y S). Llama la atención que, a pesar de la intensa extracción de biomasa, hay un aumento considerable de los niveles de materia orgánica (20% en 1 año), y se lograron incrementos en el reciclaje de fósforo (50 kg/ha), calcio (282 kg/ha) y magnesio (125 kg/ha) en el sistema, lo que no serían posibles sin la presencia del árbol.

**Banco de energía y banco forrajero.** Botero y Russo (1998) proponen una estrategia para minimizar la ineficiencia en el balance de nitrógeno en un banco de proteína, particularmente cuando éste se ha establecido con especies fijadoras de nitrógeno. Un monocultivo de este tipo tiene un superavit de nitrógeno disponible en el suelo que normalmente será arrastrado en solución, volatilizado o aprovechado por las malezas debido a la falta de otro cultivo que lo aproveche. Estos autores sugieren el establecimiento de gramíneas para corte, por ej., caña de azúcar, kinggrass, pasto elefante, o para pastoreo; a este sistema se le denomina banco de energía. Este tipo de banco puede incluir también una leguminosas herbáceas preferiblemente no trepadoras (por ej., *Desmodium*, *Stylosanthes*, *Arachis*, *Aeschynomene*, *Cassia*, *Chamaecrista*, *Indigofera* y *Zornia*), las cuales incrementan la cantidad de nitrógeno fijado por el sistema. Bajo estas condiciones es posible la introducción de diversas especies leñosas forrajeras no fijadoras de nitrógeno las cuales producen forraje de alta calidad, pero demandan elevadas cantidades de este nutrimento (Benavides, et al., 1985). La mezcla de varias especies dentro del banco forrajero crea un ambiente más resistente a plagas y enfermedades (Botero, 1992) y con un nivel de producción más estable.

### **Arboles en pasturas**

Los sistemas silvopastoriles con árboles o arbustos en pasturas se refieren a la introducción de especies forrajeras (o multipropósito) en pasturas ya establecidas o en proceso de establecimiento. Existen diversas estrategias de distribución de los árboles, según el propósito: cercos y barreras vivas, cetos forrajeros, cortinas rompimientos, árboles forrajeros en pasturas y los corredores de hábitat (Sánchez, 1998). Aquí se describen algunos de ellos.

**Cercas vivas.** Es quizá la más conocida, la más exitosa y potencialmente la menos productiva de las estrategias para la introducción de árboles en pasturas. Esto es debido al beneficio obtenido (volumen de follaje, nitrógeno fijado, materia orgánica del suelo, etc.) en relación con el tamaño de la parcela. En otras palabras, la interacción biológica directa del árbol con el suelo y el cultivo sólo impacta significativamente a una banda relativamente estrecha a cada lado del cerco, mientras que el resto de la parcela escasamente recibe algún eventual beneficio. Considérese el caso de una pastura de 10 hectáreas, dividida con cercas vivas de *G. sepium* en diez potreros para pastoreo rotacional. Supóngase un ambiente productivo idóneo, con un clima cálido húmedo, con precipitación superior a 100 mm en el mes más seco, siendo posible aprovechar la pastura y el follaje de las cercas con la misma intensidad durante cualquier mes del año. Diez hectáreas de pasto estrella, manejadas adecuadamente, podrían soportar 10 unidades animal permanentemente. Excepto en el caso de una pastura con una geometría muy irregular, no se requieren más de 3000 m de cerca para hacer todas las divisiones, ya que muchas de ellas compartirán al menos dos de sus lados con otra división. Árboles de *G. sepium* a una distancia entre postes de 2 m pueden producir alrededor de 1.2 kg de MS comestible por año (Muschler et al., 1993), lo que equivale a 1.8 t de MS por año en toda la cerca. Este valor es consistente con los resultados obtenidos en podas de *G. sepium* en cultivo en callejones, donde el máximo potencial productivo por planta por año ha sido de alrededor de 1.24 kg de MS aprovechable (Figura 2). Una asignación de forraje de *G. sepium* de 20% del consumo diario total, implica un volumen de 31.5 kg/día, o sea, 11.5 t/año. Este ejemplo ilustra cómo el forraje proveniente de una cerca perimetral es mínimo en relación con la demanda anualizada de alimento para el ganado que puede mantenerse en la misma parcela.

La cerca viva es una fuente de forraje limitada, que debe ser manejada estratégicamente para suplementar a un grupo reducido de animales, durante periodos críticos. Como tal, este tipo de cerca debe integrarse a un conjunto de mecanismos para el manejo racional de los recursos forrajeros.

**Silvopasturas.** Son una combinación natural o una asociación deliberada de uno o de varios componentes leñosos (arbustivos y/o arbóreos) con una pastura de gramíneas y/o de leguminosas herbáceas nativas o cultivadas para su utilización por animales en pastoreo. El follaje de los árboles posee varios atributos según la especie y el objetivo del sistema, siendo la producción de forraje o de abono verde de alta calidad los atributos más bien documentados. Sin embargo la importancia de los árboles en las pasturas no reside únicamente en su función como fuente de follaje, el potencial de fijación biológica de nitrógeno, la capacidad para formar asociaciones con micorrizas, concentraciones considerables de nutrimentos en las raíces,

resistencia a factores ambientales adversos son sólo algunos de los atributos que ciertas especies poseen y que deben evaluarse en el diseño de silvopasturas.

La presencia de árboles reduce la temperatura del suelo, previniendo la pérdida de humedad, lo cual prolonga la estación de crecimiento del pasto. Productores entrevistados en la zona subhúmeda de Costa Rica, y en San Marcos y la franja transversal del norte en Guatemala, por ejemplo, citaron como los motivos más frecuentes para dejar árboles en los potreros: la sombra para los animales, la fuente de madera, frutos y postes para cerco, la retención de humedad en el suelo, protección contra el viento y la provisión de leña (Harvey et al., 1998; Gutiérrez, 1996).

Los condicionantes para el establecimiento de pasturas con árboles incluyen, entre otros factores, el conocimiento sobre las especies leñosas y gramíneas que se desean sembrar y el distanciamiento entre árboles. Las especies deben tener probada capacidad para convivir en asociación. La distancia entre los árboles no debe ser tan corta que impida el paso de la radiación solar, el libre tránsito y la visualización mutua de los animales, ni tan grande que deje áreas en las que los árboles no ejerzan algún efecto benéfico sobre la pastura o que no satisfagan los requerimientos nutricionales de los animales. La consideración de estas condicionantes durante la elaboración de un plan de siembra que incluya cálculos sobre el potencial productivo de cada especie y el establecimiento de pruebas piloto, así como la revisión de los reportes de otros autores, pueden prevenir el fracaso del establecimiento de este tipo de pasturas.

Hernández (datos sin publicar) estableció silvopasturas con *L. leucocephala* o *G. sepium* asociadas a *B. decumbens* en suelos fértiles y bien drenados, en una región con precipitación promedio anual de 3700 mm, en el sur de México. Algunos árboles de *L. leucocephala* fueron sembrados en una parcela adyacente, sin pasto. Después de 3 años, los árboles de *L. leucocephala* en la pastura habían crecido 3 m, con un diámetro basal de 5 a 6 cm, mientras que los de la parcela adyacente medían más de 6 m con diámetro basal de 9 a 10 cm. Los árboles de *G. sepium* en la pastura presentaban mejor aspecto que los de *L. leucocephala*, aunque no se contaba con un punto de comparación. Otras especies de árboles fijadores de nitrógeno que fueron probadas preliminarmente sin éxito fueron *Delonix regia* y *Lysiloma auritum*. La primera creció satisfactoriamente hasta los 2 años de edad, pero posteriormente fue destruida por una plaga de roedores en las raíces. *Lysiloma auritum* presentó tasas de crecimiento y rebrote muy bajas y no se consideró promisorias para este tipo de asociaciones.

Técnicamente los tiempos para la siembra de los árboles son, antes, durante o después del establecimiento de la pastura. Debido a las diferencias obvias en la velocidad de establecimiento, plantar los árboles antes de sembrar la pastura debiera ser la opción a elegir, sin embargo, es posible enfrentar casos donde la pastura ya está establecida o no es posible posponer su establecimiento. Aquí se citan algunas sugerencias para cada caso.

Cuando los árboles van a ser sembrados antes que la pastura, el sistema 'Taungya' resulta muy conveniente. Este sistema consiste en el establecimiento de las silvopasturas mediante cultivos agrícolas o agrosilvopasturas (Russo y Botero, 1996). Los árboles se siembran simultáneamente y desde el inicio con cultivos en rotación como arroz de secano, maíz, sorgo, millo; oleaginosas como soya, maní, ajonjolí; legumbres como caupí, canavalia, mungo, frijol de abono; o frutos como sandía o patilla, zapallo o ayote, cidra o chayote, melón, etc. También pueden sembrarse con cultivos anuales o bianuales como yuca, ñame, tiquisque, camote, jengibre, piña, guandul, plátano, etc.; esa etapa puede durar de 2 a 3 años, lapso determinado por el desarrollo que tengan los árboles a fin de prevenir el daño por los animales en pastoreo. Al cosechar el último cultivo se siembran las especies herbáceas (gramíneas puras o asociadas con leguminosas herbáceas) como cobertura. La silvopastura se beneficia de los nutrimentos residuales aplicados y de las labores practicadas al cultivo (Botero, 1996).

Las ventajas de este sistema radican principalmente en los ingresos generados durante el período de establecimiento de la plantación (antes que el sistema silvopastoril sea rentable por sí mismo) y se favorece el crecimiento de los árboles hasta alcanzar un desarrollo cuando ya no sean susceptibles al daño de los animales (mínimo 1.5 años) al iniciar el pastoreo (Botero, 1992).

Cuando se requiere establecer los árboles simultáneamente con la pastura o en pasturas ya existentes se deben enfrentar dos limitantes; por una parte, la susceptibilidad de los árboles recién sembrados al daño ocasionado por los animales, y por otra, los efectos negativos del pasto que crece mientras los árboles son aún susceptibles. En el primer caso se recomienda utilizar plantines provenientes de semilla directamente del vivero o utilizar postes de especies con capacidad de reproducción vegetativa como *G. sepium* con el fin de recortar el período de exclusión. Hernández (datos sin publicar) estableció silvopasturas con postes de *G. sepium* a 3.5 m en marco real (al cuadro) en pasturas de *B. decumbens*, logrando porcentajes de sobrevivencia muy cercanos al 100%. A los 6 meses los postes habían desarrollado un sistema radicular abundante y capaz de soportar la planta bajo condiciones de poda y pastoreo. Una tercera opción es la que sugieren Botero y Russo (1998) consistente en utilizar

especies cuyos árboles jóvenes producen espinas, como *Acacia farnesiana* y *Pithecellobium*, lo cual los protege contra el ramoneo.

Con respecto a la segunda limitante, una pastura tropical que no se utiliza por un tiempo prolongado tiende a degradarse debido a que la capa de material muerto que se forma sobre la superficie impide el desarrollo de nuevos brotes. Las opciones consisten en aprovechar el material mediante corte y acarreo o pastorear excluyendo las áreas con árboles, en este caso la protección individual de los árboles puede resultar costosa y poco efectiva.

La exclusión de pequeñas áreas con árboles dentro de un potrero puede ser la solución a la necesidad de pasto de un lado de la cerca mientras que del otro se permita que los árboles adquieran resistencia. Una estrategia en la que se programe la siembra escalonada de plantines en grupos cada año permitiría establecer el sistema en un tiempo relativamente corto, sin mayor alteración del pastoreo. El costo relativamente bajo que tienen hoy en día los equipos compactos de electrificación de cercos hace de esta última alternativa una opción viable. Cuando es imposible excluir el pastoreo de áreas silvopastoriles recientemente establecidas, el uso del cerco eléctrico para proteger líneas de árboles es una opción factible. La movilización del cerco cada día, sin embargo, es una limitante que no debe dejarse de tomar en cuenta.

Las asociaciones de pasturas y árboles han sido comparadas con otras opciones (Hernández et al., 1998) arrojando resultados útiles para el diseño de sistemas de cultivo. Una asociación de *L. leucocephala* con *P. maximum* cv. Likoni mostró ser superior a un arreglo alternativo en el que *L. leucocephala* constituía un banco de proteína (25% de la superficie); a la vez, una tercera opción, en la que una pastura de *P. maximum* en monocultivo fue fertilizada con 80 kg/ha de N por año mostró resultados en ganancia de peso similares a la alcanzada en el banco (Cuadro 6). Las ganancias de peso vivo promedio de toros Cebú finalizados fue de 0.623, 0.530 y 0.538 kg/animal por día para la asociación, la pastura con banco de proteína y la pastura fertilizada, respectivamente. Estos resultados involucran dos procesos en los que el componente arbóreo esta beneficiando la ganancia de peso. En forma directa, el forraje de alta calidad de la leguminosa suple las deficiencias nutricionales de una pastura no fertilizada, y en forma indirecta, las hojas, raíces y nódulos muertos mejoran la dieta del animal mediante la fertilización orgánica de la pastura. Mientras que en el sistema con banco de proteína la suplementación de la dieta con el follaje del árbol parece equipararse con el efecto sobre la nutrición del animal de un régimen de fertilización moderado; en la asociación, como resultado del efecto sinérgico de ambos procesos, las ganancias de peso mostraron ser significativamente superiores (Figura 3). Los hallazgos de Lamela et al., (1996) confirman este planteamiento. con

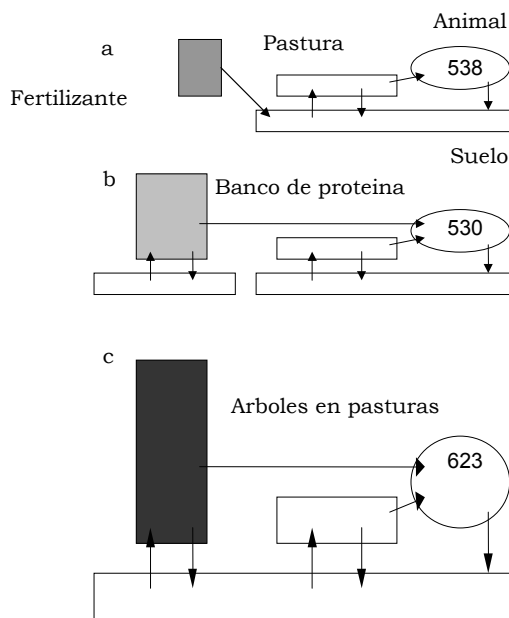


Figura 3. **Modelos de sistemas de pastoreo. (a) sistema de monocultivo de pasturas fertilizadas, (b) pastoreo suplementado con forraje del banco de proteína, (c) pastoreo en pasturas con árboles. Las flechas indican los principales flujos de nitrógeno en el sistema. Las cifras en el animal representan el promedio de la ganancia de peso al final de la ceba (g/animal por día). Datos de Simón et al, (1990); citado por Hernández et al. (1998).**

vacas lecheras mestizas pastando en *P. maximum* cv. Likoni fertilizada con 80 kg/ha de N por año y suplementada con *L. leucocephala* en un banco de proteína que alcanzaron una producción de 9.3 lt/vaca por día; mientras que en otras fincas con la misma alimentación, pero sin fertilización de la gramínea, sólo alcanzaron una producción de 6.6 lt/vaca por día.

Los sistemas de pastoreo poseen una dinámica propia de ciclaje de nutrientes, la cual es comparativamente más acelerada y superficial que la de otros sistemas de cultivo debido a la mayor tasa de producción de biomasa y a que la mayor parte de los nutrientes removidos del suelo por la pastura (60% a 99%) retornan al sistema en forma de heces y orina (Barrow, 1987). Sin embargo, la elevada tasa de reciclaje no confiere por sí misma mayor estabilidad al sistema. Mientras el elevado nivel de retorno resulta benéfico en los sitios donde las excretas animales son depositadas, más de la mitad de la superficie de la pastura no recibe este beneficio (Haynes y Williams, 1993). Las áreas donde se concentra el ganado experimentan pérdidas de nutrientes por volatilización, lixiviación y escorrentía superficial, y al mismo tiempo, otras áreas del potrero están siendo sometidas a un proceso de extracción y degradación debido a la falta de un mecanismo de retorno de nutrientes.

**Corredores de hábitat.** Un Corredor de hábitat es un rasgo lineal de la vegetación, diferente de la vegetación circundante (inducida o introducida) y que conecta al menos dos áreas de vegetación nativa, que estuvieron unidos en el pasado (Saunders y Hobbs, 1991). Los corredores a su vez pueden estar presentes en forma natural o pueden ser establecidos o inducidos deliberadamente, como medio para incrementar la presencia de especies arbóreas útiles en los potreros. La inducción de estos elementos se facilita en las regiones tropicales gracias a la abundancia de especies pioneras y a que la estación de crecimiento abarca prácticamente todo el año.

La importancia de los corredores puede ser entendida más fácilmente cuando se considera a las silvopasturas como agroecosistemas, es decir, cuando se reconoce que todos los elementos del paisaje intervienen en la estabilidad del sistema. Estos sistemas tienen gran importancia para el movimiento de la fauna y la dispersión de la flora entre hábitats que de otra forma estarían aislados (Pimentel et al., 1992). Como se ha visto, la flora local puede ser una fuente importante de recursos forrajeros, así como puede contribuir a la diversificación económica de la unidad de producción, sin embargo, el área cubierta solamente por pastura puede tender a degradarse, sin obtenerse la sostenibilidad deseada. Mientras mayores sean la amplitud y la complejidad estructural de los corredores de hábitat, más importante será su contribución a la preservación de la biodiversidad local (Murgueitio y Calle, 1998).

**Sistemas de corte y acarreo.** Los sistemas de corte y acarreo documentados en la literatura son modelos esencialmente domésticos, es decir, de muy pequeña escala. Se refieren a la alimentación en corral basada en forrajes cultivados o recolectados en cercos vivos, siembras de forrajes o en crecimientos secundarios. Estos sistemas se basan idealmente en dos premisas: alto flujo de caja y alimentación de excelente calidad.

Instituciones nacionales de investigación en Centroamérica en coordinación con El CATIE han desarrollado tecnologías para la explotación de rumiantes menores (principalmente cabras lecheras) en pequeña y mediana escala. El sistema se basa en el confinamiento permanente de los animales en corrales de piso alzado, donde puedan ser albergadas hembras de alto valor genético, normalmente poco resistentes a las condiciones ambientales del trópico húmedo. El principio de eficiencia del sistema es la explotación del máximo potencial de producción de este tipo de animales mediante la alimentación con materiales de alto valor nutritivo y bajo costo, como son los forrajes arbóreos (Benavides, 1994).

## **Evaluación del potencial forrajero de especies leñosas**

La evaluación del potencial forrajero es una línea de investigación altamente desarrollada y en permanente evolución. Son cada vez son mayores los conocimientos disponibles para identificar hasta qué punto un follaje arbóreo satisface los requerimientos nutricionales de una especie animal. Quizá valga la pena anotar que el potencial forrajero es un concepto que va más allá del valor nutritivo y que incluye al menos dos características adicionales: el consumo voluntario, como indicador preliminar de la respuesta animal, y la disponibilidad del material en forma suficiente y permanente. De lo anterior se deriva una serie de pruebas que en suma hacen de la evaluación de forrajes un proceso muy costoso en términos de tiempo y dinero. Benavides (1991) propuso una metodología de evaluación para especies leñosas que fue innovativa en su tiempo. Las leñosas son de más lento crecimiento y en ese entonces se sabía mucho menos sobre ellas en comparación con las latifoliadas herbáceas o las gramíneas. Una de las virtudes más sobresalientes de esa metodología es la estructuración inteligente de las diferentes pruebas que la constituyen, en un gradiente de menor a mayor costo, sea este económico o del tiempo requerido. También puede decirse que la precisión de las evaluaciones se incrementa en la medida que aumenta la certidumbre sobre el potencial forrajero de cada especie, esto es, en la medida en que muestra buenos resultados en las pruebas precedentes.

### **Identificación de especies y proveniencias aceptadas por el animal**

Este paso en la metodología se refiere a la primera aproximación en la búsqueda de nuevos materiales, a partir del universo de especies y proveniencias locales. Esta fase es necesaria cuando el objeto de estudio es una comunidad vegetal desconocida en lo referente a la presencia de especies útiles para la alimentación animal. La preferencia por parte de los animales en libre pastoreo (ramoneo), combinada con los conocimientos sobre las especies y proveniencias presentes en la vegetación circundante, constituyen las herramientas para esta primera aproximación a la flora forrajera local. Dentro de la misma especie pueden darse ecotipos de alta, mediana y baja palatabilidad, como sucede con *G. sepium*, lo que está asociado con las condiciones ecológicas de las distintas localidades. En Guatemala, por ejemplo, en las regiones cálidas, de precipitación elevada (superior a 2500 mm por año) se encuentran los ecotipos de mayor palatabilidad, mientras que en aquellas de mediana pluviosidad (900 a 1500 mm por año) con época seca larga y bien definida, se encuentran ecotipos que los bovinos y caprinos no consumen, aún no teniendo otro forraje disponible.

**Monitoreo en pastoreo.** El uso de animales para la detección de especies potencialmente forrajeras está basado en el olfato y el gusto de los mismos animales para identificar especies



palatables, no así para discriminar materiales ricos en compuestos que demeritan física (fibra) o químicamente (sustancias fenólicas) su valor nutritivo, aunque esto puede llegar a ocurrir. Hernández (1993) utilizó este método para construir una base de datos con la que se creó un índice de preferencia ( $P_i$ ) para evaluar las plantas leñosas presentes en bosques secundarios en El Petén, Guatemala.

$$P_i = (s_i/a_i)/\Sigma(s_i/a_i)$$

El  $P_i$  pondera la frecuencia de bocados sobre cada especie ( $s_i$ ) de acuerdo con la abundancia relativa de dicha especie en la comunidad vegetal de la parcela ( $a_i$ ). Este es, a su vez, ponderado respecto a la suma del  $P_i$  de todas las especies presentes. Subsecuentemente, la preferencia es ponderada por el valor nutritivo, con lo que se genera un índice de importancia forrajera (IIA). El IIA es, por tanto, un atributo complejo de las especies, en el que se expresan al mismo tiempo tres grupos de variables, también combinadas: la importancia ecológica, la aceptación por una especie animal y la calidad nutritiva. Como puede suponerse el IIA no tiene unidades. Una metodología similar ha sido utilizada por Rubio (1995; datos sin publicar), Hernández (1997), Aguirre (1999) y Sinay (1999) en caprinos y bovinos en diferentes regiones boscosas de Guatemala. En el Cuadro 7 se ofrece un ejemplo de tres especies contrastantes en cuanto a preferencia e importancia forrajera. *Chrysophila argentea*, además de ser comparativamente abundante, presenta un contenido de proteína cruda apreciable, sin embargo, su importancia forrajera es casi nula debido a la pobre preferencia. Por otro lado, *Trophis racemosa*, a pesar de su mediocre valor proteínico, representa un recurso forrajero valioso debido a su alta preferencia y buena IVMS.

Este tipo de estudios permiten la valoración de especies para su manejo en sistemas de pastoreo en bosques, por ejemplo, en cuanto a áreas con mayor potencial e explotación silvopastoril y en cuanto a especies que deben conservarse en un raleo para facilitar el tránsito de los animales en los bosques secundarios.

Cuadro 7. **Componentes del índice de importancia forrajera de algunas especies consumidas por ovinos en pastoreo en bosques secundarios en El Petén, Guatemala.**

Especie	Cobertura (%)	Densidad (%)	Preferencia	Proteína cruda (%)	DIVMS (%)	Importancia forrajera
<i>Chrysophila argentea</i>	5.5	7.0	0.04	17.7	47.7	0.02
<i>Dendropanax arboreus</i>	10.3	3.1	0.10	12.0	52.6	0.29
<i>Trophis racemosa</i>	6.7	2.7	0.20	12.8	56.5	0.36

FUENTE: Hernández, 1993.

**Fuentes secundarias.** Consiste en la consulta de fuentes bibliográficas sobre especies presentes en la zona de estudio que han sido documentadas como forrajeras o potencialmente forrajeras.

### **Valor nutritivo**

Las especies promisorias deben ser analizadas en cuanto a su calidad nutritiva, aún en forma muy elemental, efectuando los análisis de rutina en el laboratorio. Es importante señalar que la información secundaria sobre este aspecto debe ser interpretada con precaución, debido a la alta variabilidad de los resultados. Desafortunadamente sólo en muy pocos casos los autores de este tipo de estudios indican con claridad el origen y la condición del material analizado. Los factores que más comúnmente afectan los resultados de análisis de calidad nutritiva son la edad del material, la disponibilidad de agua y la radiación solar durante la etapa de desarrollo del cultivo, la variabilidad genética (proveniencia) y las partes de la planta incluidas en el análisis.

De acuerdo con la metodología de Benavides (1991), debido al elevado costo de los análisis y a las limitaciones de la generalidad de los laboratorios de nutrición animal en los países no industrializados, las pruebas más acuciosas de evaluación de forrajes, tales como proteína verdadera, digestibilidad de la proteína o contenido de sustancias antinutricionales, deben ser dejadas para etapas posteriores, una vez que el material ha demostrado un potencial forrajero considerable. Es posible que en muchos casos se deba recurrir a otros laboratorios fuera de la región de estudio para realizar dichos análisis, por lo que se debe tener el cuidado de seleccionar 'candidatos' que lo ameriten.

Los exámenes básicos que se deben aplicar en la etapa inicial son la determinación de proteína cruda y la de fibra neutro detergente. Alternativamente a ésta última, muchos laboratorios con recursos limitados efectúan todavía el análisis de digestibilidad in vitro de la materia seca (Tilley y Terry, 1963) a pesar de no ser particularmente adecuado para forrajes tropicales (a menudo ricos en lignina). Sin embargo, cabe recordar que los materiales latifoliados poseen una estructura química y un patrón de distribución de lignina diferentes al de las gramíneas (Van Soest, 1994), lo cual tiene relación con la mayor degradabilidad de la pared celular en las primeras. Esto ha sido demostrado tanto en leguminosas (Bonsi et al., 1994) como en algunas especies no leguminosas (Validivia y Ku, 1996). Otras características desventajosas de la técnica de digestibilidad in vitro son su complicación técnica y requerir de más tiempo que la técnica de fibra neutro detergente.

Se ha comenzado a realizar análisis más acuciosos del valor forrajero de plantas leñosas, utilizando técnicas bien conocidas en el análisis de gramíneas y concentrados. En la Universidad de Yucatán, México, se demostró que aparte del alto contenido proteínico de algunas especies de árboles tradicionalmente utilizados para la alimentación de rumiantes (*G. sepium* y *Brosimum alicastrum*), éstas poseen mayor tasa de digestión ruminal que los pastos tradicionales (*Cynodon nlemfuensis* y *Panicum maximum*), sin embargo, presentan un moderado desbalance en cuanto a la energía disponible para maximizar la producción de proteína microbiana en el rumen y la digestión de la dieta basal (Ku et al, 1998). En esta misma Universidad encontraron que el incremento en la fracción arbórea en la dieta condujo a mayor concentración de amonio en el rumen, lo cual favorece la fermentación y el desarrollo de la flora microbiana que es digerida en el tracto posterior. Estos trabajos también permitieron establecer que la suplementación con urea llenó, a un costo menor que el de la suplementación arbórea, los niveles adecuados de amonio en rumen y que el volumen de forraje de alta calidad necesario para alcanzar efectos similares a los de la urea pudiera ser cercano al 50% del consumo voluntario. Por otro lado, no se encontró diferencia en el patrón de fermentación al incrementar la fracción de follaje de árboles en la dieta. Esto puede explicar parcialmente la deficiencia mencionada en la utilización de la energía metabolizable. Finalmente, las dietas con mayores proporciones de árboles forrajeros presentaron tasas de pasaje significativamente mayores, lo cual favorece el consumo voluntario y la síntesis de proteína microbiana.

Tomando como base en este nuevo enfoque en el análisis de alimentos, se están diseñando programas de alimentación en los que se combinan materiales de alta degradación ruminal, con los que se proveen nutrimentos a la flora ruminal y fuentes de proteína con mayores niveles de taninos, como estrategia para incrementar la fracción de nutrimentos sobrepasantes (Flores et al., 1998). Experiencias de campo no sistematizadas en Guatemala han mostrado que al combinar varios follajes arbóreos como dieta única o como suplemento a una dieta basal de gramíneas, se logra duplicar y hasta triplicar la producción láctea en cabras (Gutiérrez, 1999; datos no publicados).

### **Consumo voluntario y efectos secundarios**

El último de los tres atributos que preliminarmente configuran el valor forrajero de una planta, es el consumo voluntario, el cual debe ser determinado en condiciones controladas. Su evaluación en forma preliminar se desarrolla mediante pruebas de consumo ad libitum en corral, renovando el pienso (forraje) ofrecido con frecuencia para determinar el máximo nivel de consumo, así como la calidad del pienso rechazado, con lo que se obtiene información suficiente para estimar el potencial de la especie para satisfacer los requerimientos nutricionales del animal. Utilizando este método, Hernández (1993) encontró que los niveles de

consumo de algunas leñosas nativas de bosques tropicales, con base en su valor nutritivo, (Cuadro 8) pueden satisfacer hasta un 75% de los requerimientos de energía digestible de mantenimiento y un 100% de los requerimientos de proteína para mantenimiento y reproducción de ovejas de pelo en corral. Este tipo de ensayo normalmente se utiliza para comparar un número reducido de materiales, por lo que se recomienda el uso de diseños completos aleatorizados con arreglo de recambio en cuadrado latino, para minimizar el tiempo del estudio y eliminar el error debido al animal, ya que en esta forma todos los animales tienen finalmente acceso a cada uno de los materiales. En Guatemala se han encontrado resultados similares, pero tendencias divergentes en las proporciones en que satisfacen los requerimientos de energía y de proteína para mantenimiento y producción de leche en cabras Vidal (1997), Herrera (1995), Galdámez (1996), Villa Nueva (1994) y Azzari (1996); y en bovinos por Velásquez (1992) y Girón (1993) en Guatemala.

Alternativamente se han realizado pruebas de 'cafetería', donde el acceso a las diferentes especies es simultáneo, lo cual reduce los costos en tiempo, mano de obra e instalaciones de la prueba. Los materiales más palatables son secuencialmente retirados de la prueba para continuar con la evaluación. Las observaciones derivadas de una prueba de cafetería, sin embargo, pueden verse afectadas si los mejores materiales son acaparados por el animal dominante del grupo, esto dará como resultado niveles de consumo falsamente menores. Deben considerarse también los efectos estacionales y la posición que las diferentes especies tienen con respecto a los lugares de ingreso de los animales en el corral experimental.

Una vez concluida la evaluación nutricional preliminar del potencial forrajero, las

Cuadro 8. **Consumo de materia seca, contenido de proteína cruda y digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) de algunas especies leñosas de bosques secundarios consumidas por ovinos de pelo en corral en El Petén, Guatemala (FUENTE: Hernández, 1993).**

Especie	Familia	Consumo MS (%, peso vivo)	Parte de la planta	Proteína cruda (%)	DIVMS (%)
<i>Cecropia peltata</i>	Cecropiaceae	2.1 a* (0.4) <sup>a</sup>	Hoja apical	21.2	54.3
			Hoja basal	18.4	49.2
<i>Brosimum alicastrum</i>	Moraceae	2.0 ab (0.9)	Hoja apical	13.4	67.7
			Hoja basal	12.0	66.6
<i>Lonchocarpus guatemalensis</i>	Leguminosae	1.4 b (0.4)	Hoja apical	20.2	73.7
			Hoja basal	18.7	25.1
<i>Hamelia patens</i>	Rubiaceae	1.3 b (0.3)	Hoja apical	18.5	69.6
			Hoja basal	16.4	53.7

\* Valores seguidos de letras iguales no difieren en forma significativa ( $P < 0.05$ ), según la prueba de Duncan.

a Valores en paréntesis indican la desviación estándar.

especies promisorias son aquellas que están presentes en forma natural y son suficientemente abundantes para permitir que una dieta basada parcialmente en ellas pueda proporcionarse permanentemente a un número determinado de animales. Alternativamente, una especie nueva o escasa en la región debe ser de fácil propagación y de alta tasa de rebrote. Una especie promisorias, además, cuenta con un nivel proteínico superior al de los pastos tradicionales en la región y digestibilidad de la materia seca idealmente superior a 65%. Finalmente, este grupo de forrajes puede ser consumido voluntariamente a niveles que satisfagan las necesidades de los animales.

Los materiales físicamente abundantes, con alto valor nutritivo y bien aceptados por los animales, son sometidos a pruebas de respuesta animal de acuerdo con los sistemas productivos practicados en la región. Las pruebas de respuesta en producción de leche o ganancia de peso vivo animal son largas y costosas, por lo que sólo materiales muy promisorios son probados de esta manera.

Una vez que comienzan las pruebas de respuesta animal, eventualmente puede surgir la necesidad de propagar la especie con los objetivos de completar su caracterización, contar con material homogéneo para los experimentos y extender su uso a otras zonas donde puede potencialmente ser aprovechada. Los atributos silvoagrícolas más importantes en una especie forrajera son la tasa de rebrote, la forma de propagación, la sobrevivencia en podas continuas, la relación hoja:tallo y la tasa de fijación biológica de nitrógeno, la capacidad para retener las hojas en época seca, la alelopatía (especialmente sobre herbáceas), la sobrevivencia en competencia y la abundante producción de semilla botánica viable, entre otras.

### **Modelos matemáticos de sistemas policultivo árboles-gramíneas**

La posibilidad de disponer de más información para el diseño y el manejo de sistemas productivos lleva al uso del análisis de sistemas, una herramienta para el tratamiento de sistemas complejos, donde el comportamiento de los componentes se resuelve por la interacción de varios de los componentes del sistema. En forma tradicional, la investigación ecológica en general y en sistemas agroecológicos en particular, utiliza herramientas estadísticas para generar parámetros esencialmente empíricos que relacionan fenómenos biológicos y ambientales. Normalmente estos datos están restringidos al contexto particular del estudio y no permiten abarcar las interacciones ecológicas en toda su complejidad. Si se pretende estudiar sistemas complejos y conservar la posibilidad de generalizar los principios de un área del conocimiento dada se debe recurrir a la formulación de modelos cuantitativos, los

cuales permiten amplitud estructural, es decir, permiten operar simultáneamente todas aquellas interacciones que ocurren entre los componentes que, de acuerdo a nuestro entendimiento, determinan el comportamiento del sistema. Al mismo tiempo, los modelos cuantitativos ofrecen una imagen dinámica del sistema, que es más entendible para el lector que la clásica imagen de los modelos estadísticos (Robertson et al., 1991). Los modelos matemáticos, sin embargo, no sustituyen el trabajo experimental ni la intuición del productor y técnico experimentado, son básicamente un complemento útil para el manejo de grandes cantidades de información simultáneamente y para identificar los vacíos en el conocimiento científico.

### **Objetivos de los modelos**

Un modelo es una representación o abstracción del sujeto de estudio, al que se le denomina sistema. Los objetivos del modelado son la descripción del sistema y sus procesos, de tal forma que sea comprensible y pueda ser utilizado como herramienta en la toma de decisiones sobre el manejo de dicho sistema. Los modelos deben estar diseñados y, por tanto, ser capaces de responder a un conjunto de preguntas sobre el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones (Bossel, 1986).

### **Componentes de los modelos matemáticos**

Los modelos cuantitativos, como todo sistema dinámico, están constituidos por variables de estado o compartimientos, donde se almacenan el sustrato u objeto de estudio, flujos o tasas de cambio de dichas variables de estado, parámetros ambientales (constantes), variables intermedias que varían como consecuencia del comportamiento de las variables de estado, pero que, a su vez, condicionan las tasas de cambio de éstas y finalmente entradas y salidas que determinan las relaciones con otros sistemas (Robertson et al., 1991).

Se han desarrollado modelos cuantitativos de sistemas de pasturas con árboles como RECAFS (Conijn, 1995) y el Silvopastoril (Hernández, sin publicar); también existen modelos que tienen la capacidad de simular diferentes sistemas agroforestales, siendo las pasturas con árboles una de esas variantes. Entre los más completos se encuentran: SCUAF (Young, et al., 1987), WaNuLCAS (Van Noordwijk y Lusiana, 1999), BEAM (Thomas, et al., 1994) y Century (Parton, et al., 1988).

A continuación se describen brevemente los modelos RECAFS y el Silvopastoril, con el propósito de dar al lector una idea general del enfoque de cada uno de ellos en cuanto a la simulación del sistema de policultivo árboles-gramíneas, considerando que fueron concebidos para ambientes diferentes. Mientras RECAFS hace énfasis en el rol del árbol en la

conservación de la humedad del suelo y el aporte de forraje en época seca en un sistema de pastoreo bajo condiciones de déficit hídrico, en el modelo Silvopastoril, concebido para regiones húmedas, el árbol es un agente controlador de los ciclos de nutrientes y productor de abono, capaz de fijar nitrógeno y que debe ser sometido a un manejo (podas) como medio para regular las interacciones con los otros componentes del sistema.

**Modelo RECAFS.** El modelo ‘competencia por recursos y reciclaje en sistemas agroforestales’, (RECAFS por su sigla en inglés) fue desarrollado en el marco del proyecto Production Soudano-Sahélienne, en el Departamento de Agrosistemas del Instituto de Investigaciones en Agrobiología y Fertilidad de Suelos (AB-DLO, Wageningen, Holanda).

El modelo se construyó bajo la hipótesis de que el balance final entre los procesos de facilitamiento y la competencia en sistemas de policultivo árboles-gramíneas depende primordialmente de las condiciones ambientales (tipo de suelo, lluvia, fertilidad) y de las características de las especies en la asociación (ver Cuadro 9). Por tanto, el modelo fue diseñado para determinar bajo qué condiciones de sitio, en la región Sudán-Sahel en el oeste africano, un sistema silvopastoril podría incrementar la recuperación de nutrientes y si ésta podría potenciarse mediante una adecuada selección de especies. Durante la construcción del modelo fueron atendidos tres objetivos, de acuerdo con diferentes aspectos de la interacción árbol-pastura, a saber: discernir los efectos de corto plazo en la competencia por recursos limitados, inferir bajo qué condiciones el árbol sería capaz de mejorar a largo plazo la producción de forraje mediante la reducción de pérdidas de recursos limitados y evaluar si el árbol, aparte de su rol como aportador de materia orgánica, pudiera desarrollar un rol económico como la producción de forraje o de otros bienes.

La densidad de población del componente arbóreo es una variable que puede oscilar desde un árbol por hectárea hasta la densidad de un bosque de dosel cerrado. Se asume que los árboles son todos del mismo tamaño y están distribuidos homogéneamente en un patrón rectangular. Se representan tres áreas para el crecimiento de la gramínea de acuerdo con la posición del árbol más cercano (Figura 4): (1) el área bajo la copa, (2) el área fuera de la cobertura de la copa pero aún afectada por las raíces del árbol, y (3) el área remanente por árbol en la matriz rectangular la cual no es ocupada por las raíces del árbol. El modelo simula el crecimiento y desarrollo de una pastura con una especie anual en cada área por separado y también el crecimiento y desarrollo de una población arbórea de una especie decidua. El modelo puede simular varios años a intervalos de 1 día.

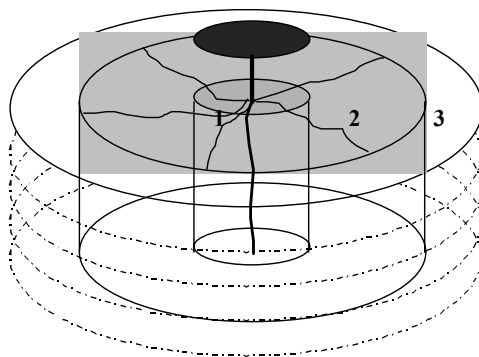


Figura 4. Una unidad árbol-pastura con tres áreas y cuatro compartimientos de suelo en cada área (FUENTE: Conijn, 1995).

Si bien la densidad de población es constante durante una simulación, ésta puede ser ajustada a un nivel en el que las raíces de cada árbol pueden, eventualmente, alcanzar las de los árboles vecinos, por lo que el área tres desaparece, similarmente, el diámetro de la copa de los árboles puede variar durante el curso de la simulación, de acuerdo con las situaciones siguientes: los árboles son podados completamente; el área uno desaparece temporalmente, pero si las copas se extienden hasta tocarse unas con otras; el área dos desaparece.

El suelo puede ser distribuido en capas para simular el movimiento vertical de agua y nutrimentos, así como su asimilación y la competencia por estos recursos entre las dos poblaciones vegetales. Si bien las interacciones entre áreas vecinas (horizontalmente) son ignoradas, el modelo representa el movimiento lateral de recursos captados por las raíces del árbol en el área dos hacia las otras partes del árbol.

**El Modelo Silvopastoril.** Este modelo simula el efecto de la presencia y del manejo de una población de árboles en una pastura tropical. Consiste de cinco submodelos que contienen los procesos relevantes para la simulación de los ciclos del carbono y el nitrógeno en un sistema silvopastoril. La pastura, el suelo y el animal son componentes del modelo que están basados en otro modelo para flujos de nitrógeno en pasturas llamado Hurley, en nombre del lugar donde fue desarrollado (Johnson y Thornley, 1985; Thornley y Verberne, 1989). El componente arbóreo se basa en un modelo de crecimiento y partición de sustratos en plantaciones forestales llamado Edimburgo (Thornley, 1991). El modelo Silvopastoril calcula los compartimientos y flujos de carbono y nitrógeno sobre la base de  $1 \text{ m}^2$  y con intervalo de integración de 1 día, y fue diseñado de acuerdo con las premisas siguientes:

- Las pasturas tropicales de alto rendimiento ejercen una intensa demanda sobre los nutrimentos del suelo.



Cuadro 9. **El modelo RECAFS fue desarrollado con el language de simulación FORTRAN 77 y usa el ambiente de simulación FORTRAN (FSE).**

Evapotranspiración potencial de la pastura	Se resuelve mediante la combinación de ecuaciones de Penman-Monteith, utilizando parámetros de radiación de onda corta diaria, transmisión atmosférica, temperaturas mínima y máxima diaria, presión de vapor en el aire y velocidad media del viento, todo esto como función de la intensidad de sombra causada por la presencia de los árboles (es decir que no es posible utilizar bases de datos climáticos generados en espacios abiertos).
Evapotranspiración potencial del dosel superior	Se calcula como función directa del producto de la fotosíntesis potencial (que a su vez es función de la radiación absorbida) y un factor de reducción debido a estrés nutricional y es inversamente proporcional a la eficiencia en la utilización del agua.
Índice de área foliar de un árbol individual	Se deriva de la relación entre la biomasa foliar, el área foliar específica y el recíproco de la cobertura por la densidad de población.
Cobertura de la copa de cada árbol	Se calcula como una función empírica de la biomasa del tallo.
Absorción de radiación solar (ARS) por los árboles	Inicialmente se calcula la ARS para un individuo en una población densa, mediante una ecuación en que la radiación solar total por hectárea se multiplica por el complemento del coeficiente de reflexión y entonces es tratada de acuerdo con la ley de Lambert-Beer, finalmente se divide por la densidad de población. Se asume que un dosel cerrado crea una capa única y homogénea de hojas y ramas. La absorción por árboles solitarios es calculada como el producto del ARS de un individuo en una población densa por un factor que considera la latitud y longitud geográfica del sitio, la transmisión atmosférica, las dimensiones de la copa, el área foliar, el área de la parte leñosa y el coeficiente de extinción. Finalmente, la ARS del follaje de un árbol a una densidad dada se calcula por interpolación de ambos escenarios, sustrayendo la absorción de la porción leñosa.
Radiación solar transmitida	La radiación disponible para la vegetación herbácea se calcula por la diferencia entre la radiación total y aquella interceptada por el dosel para cada área de la pastura.
Absorción de radiación solar por la pastura	Similarmente a la ARS por los árboles, se calcula por el producto de la radiación transmitida y el complemento del coeficiente de reflexión y el complemento de una función exponencial negativa que contiene el coeficiente de extinción y el índice de área foliar (ley de Lambert-Beer).
Producción de biomasa de la gramínea	Es similar a la arbórea, con la diferencia de que la producción y la eficiencia en la utilización de la luz están correlacionadas en forma no lineal, debido a que el nivel de radiación puede variar mucho de un área a otra.
Producción de materia orgánica del suelo	Se genera por la producción de mantillo de las dos especies, indistintamente de la parte de la planta (hojas, tallos y raíces). De acuerdo a coeficientes de partición constantes y a la relación carbono-nitrógeno del material, se producen cuatro fracciones, las cuales tienen tasas de mineralización que disminuyen logarítmicamente de $0.1 \text{ día}^{-1}$ a $0.0001 \text{ día}^{-1}$ .
Mineralización de nitrógeno	Depende de las constantes de mineralización de cada componente de la materia orgánica del suelo, de la constante de eficiencia del crecimiento microbiano y del contenido de nitrógeno en cada componente de la materia orgánica. Se simulan

	cuatro componentes, dos de elevada tasa de mineralización y dos de baja tasa de mineralización.
Distribución de las raíces	Es una función exponencial negativa del producto de la profundidad relativa del suelo y un parámetro de distribución vertical de las raíces.
Producción de biomasa arbórea	Se calcula como función de la radiación solar absorbida y la eficiencia máxima de utilización de la luz como función de la biomasa total de la porción leñosa (tallos y raíces), lo cual describe una función lineal. En caso de déficit hídrico, la producción de biomasa se multiplica por la razón de la evapotranspiración real y la potencial.
Demanda de nitrógeno	Se deriva de los requerimientos para alcanzar la máxima concentración de nitrógeno en todos los componentes de la planta y para asegurar su crecimiento. La demanda es satisfecha a través de la extracción de nitrógeno del suelo y de la translocación proveniente de componentes senescentes.
Extracción de nitrógeno del suelo	Se controla mediante dos procesos paralelos, el flujo de masa y la difusión. El primero dependiente del uso consuntivo de agua y la concentración de nitrógeno soluble en cada compartimiento del suelo. El segundo es descrito empíricamente como función de la máxima capacidad de absorción de agua por las raíces en cada compartimiento.
Competencia por nitrógeno	Cuando el nitrógeno disponible no es suficiente para abastecer la demanda de ambas poblaciones, en lugar de las ecuaciones referidas, se utiliza una que distribuye el nitrógeno entre las dos especies en función de la tasa de absorción de agua en cada compartimiento, la cual es función de la densidad de raíces y el agua disponible. En condiciones de competencia, el modelo también simula por separado el flujo de masa y la difusión, con la salvedad de que en ésta última la partición del nitrógeno es modelada en función de la longitud de las raíces de cada especie.
Balance hídrico del suelo	Utiliza el modelo SAHEL (Suelos en Hábitats semiÁridos que Lixivian con facilidad, acrónimo por sus siglas en inglés). Cada área es dividida en horizontes (fig. 3). El agua en cada compartimiento se distribuye homogéneamente dentro de éste, ignorando flujos horizontales entre compartimientos. El contenido de agua se calcula integrando la evapotranspiración real, la evaporación en el suelo, la infiltración y la percolación con base diaria.

- Los árboles fijadores de nitrógeno pueden contribuir a la restauración de la fertilidad natural del suelo, aunque eventualmente sea necesaria la aplicación de enmiendas de otro origen (fundamentalmente fertilizantes químicos).
- La competencia interespecífica por los nutrientes del suelo se basa en la biomasa, la actividad y la capacidad de regeneración de las raíces de ambas especies.
- La competencia por luz comienza cuando el dosel superior ocasiona que la radiación transmitida a la pastura sea insuficiente para alcanzar el máximo potencial fotosintético.
- El reciclado de nitrógeno es acelerado mediante la poda de los árboles, esta acción produce simultáneamente abono verde y la muerte de raíces y nódulos de rizobios,

todos estos materiales son ricos en materia orgánica de elevada tasa de descomposición. Adicionalmente, esta acción permite que mayor cantidad de radiación solar penetre hasta la pastura.

- La descomposición de la materia orgánica en el suelo depende de la calidad del material de poda y de la del mantillo que naturalmente se produce de los árboles y el pasto, también depende de la abundancia natural de los microorganismos descomponedores del suelo.
- Las temperaturas atmosférica y del suelo, así como la humedad controlan las tasas de descomposición y mineralización de la materia orgánica.

**Aplicaciones del modelo Silvopastoril.** La densidad de plantación requerida para compensar las deficiencias nutricionales de la pastura, el número de árboles que podría soportar el sistema antes de causar un nivel dañino de competencia por luz, agua o nutrimentos; así como, los atributos que deben mostrar las especies de árboles para asociarse adecuadamente con la gramínea y el ganado, dentro de un determinado ambiente, son temas que pueden ser rápidamente investigados mediante el modelo silvopastoril. Las características del modelo, que lo hacen distinto a otros modelos árbol-pastura-animal, son: (1) describe un agroecosistema donde el árbol tiene un rol de controlador de procesos, desarrollando varias funciones biológicas, más que directamente económicas, (2) simula una pastura con árboles e incorpora un tercer elemento, el animal en pastoreo y (3) la disponibilidad de nutrimentos en el suelo depende principalmente de la descomposición de la materia orgánica, más que de insumos externos.

El modelo fue desarrollado utilizando ModelMaker Ver. 3.0.3 (Cherwell Scientific Publishing Ltd, Oxford, UK., Walker and Crout, 1997), un paquete para modelado de simulación con interfase a Microsoft Windows que permite visualizar sistemas, ver las relaciones entre componentes y evaluar los efectos de cambios en el estado basal.

### **Conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones**

Los sistemas silvopastoriles se presentan como una alternativa al manejo de los recursos productivos ante la incompatibilidad de la tecnología comercial con la conservación de los mismos. Si bien en teoría los sistemas silvopastoriles tienen como fin el manejo integrado de la tierra, del trabajo y del objeto de la producción (forrajes y animales), en la práctica el desarrollo de este campo tecnológico se ha dado principalmente hacia el mejoramiento en la producción de forrajes y sus implicaciones microambientales. Notables excepciones a esta norma son,

entre otros, los trabajos del CIPAV en Colombia (Murugeitio y Calle, 1998) y el Proyecto Agrosilvopastoril del CATIE en la zona seca de Centroamérica (CATIE, 1993). Como consecuencia de este sesgo, el impacto en la toma de decisiones sobre políticas agropecuarias (escala macroeconómica), así como el nivel de adopción (escala de finca) de las tecnologías silvopastoriles es aún muy bajo. En este documento se hace una aproximación al enfoque de tipología de productores, como opción para orientar el desarrollo de tecnologías adecuadas.

En cuanto a las interacciones biológicas que emergen de la asociación de gramíneas con leguminosas leñosas, en este documento se analizan tres de las más controversiales:

- Se ofrece evidencia de que en términos generales una moderada disminución de la radiación incidente sobre el pasto (asociada a una reducción de temperatura) no demerita la producción y sí mejora la calidad de la pastura, tanto por el incremento en la concentración de nitrógeno en la hoja como por la menor relación tallo:hoja. Bajo esta premisa, la calidad nutricional y la productividad de una parcela silvopastoril debe ser superior a la de la pastura en monocultivo, ya que se añade la biomasa de alta calidad proveniente del material de poda y las raíces muertas del árbol.
- Existe una gran diversidad de estrategias para la explotación de los beneficios potenciales de los sistemas silvopastoriles, desde los más especializados y de mayor demanda de mano de obra como el banco de proteína y el pastoreo en plantaciones hasta los más versátiles y de menor demanda de mano de obra como el cerco vivo y los corredores de hábitat. En la mayoría de los sistemas descritos en este documento está aún pendiente un análisis económico que demuestre los beneficios económicos al interior de la finca.

El panorama en la investigación en valor nutritivo de forrajes y alimentación animal es mucho más alentador, el catálogo de especies arbóreas y gramíneas con alto potencial productivo, así como los estudios de adaptabilidad a condiciones de competencia biológica crece continuamente. La incorporación de técnicas más exactas para la evaluación nutricional están demostrando que algunos forrajes provenientes de leguminosas arbóreas mejoran la calidad de la dieta de animales en pastoreo en el trópico, no solo por el incremento en el nivel de nitrógeno de la dieta, el cual se traduce en mayor producción microbiana en el rumen, sino por una mayor tasa de pasaje y por consiguiente mayor consumo voluntario. Cuando estas especies son altamente disponibles y aceptadas por los animales se cuenta con las condiciones mínimas para reducir el uso de insumos externos y transformar la producción de rumiantes en una actividad económica sostenible.

La necesidad de integrar la gran cantidad de información generada para apoyar la toma de decisiones en el entorno productivo, así como para orientar la investigación y facilitar la enseñanza, ha llevado a la generación de modelos de simulación. Lo innovativo de los modelos silvopastoriles referidos en este documento es la exploración de las respuestas de las especies en asociación. Este aspecto requiere de un gran esfuerzo colectivo para la generación de los parámetros o atributos de las especies ya que la información disponible, si la hay, ha sido producida en condiciones de monocultivo o bajo asociaciones con especies particulares, lo cual no garantiza el mismo comportamiento con otras especies y en otros ambientes. Sin embargo, dentro de las limitaciones de precisión mencionadas, los modelos de simulación tienen un rol de gran valor al permitir experimentar con las posibles combinaciones de especies y estrategias de manejo, en lugar de depender exclusivamente de las posibilidades de espacio y otros recursos en campo.

En resumen, la investigación en sistemas silvopastoriles tiene por lo menos tres grandes asignaturas pendientes: (1) el análisis macro y micro económico y en términos más generales la evaluación de las condiciones para la adopción de las tecnologías; (2) la evaluación del impacto del sistema en otros subsistemas de la unidad productiva; y (3) la caracterización cuantitativa de las especies en policultivo, no solo para la parametrización de los modelos de simulación sino para terminar de establecer las bases científicas de la agroforestería para la producción animal. La única forma eficiente de producir y divulgar esta información es mediante la creación de redes de investigadores y usuarios, que coordinen el diseño de proyectos de investigación en función de las potencialidades y limitaciones de los participantes. La ausencia de este tipo de organismos ha ocasionado duplicidad de esfuerzos y pobre aprovechamiento del conocimiento generado.

## Bibliografía

- Aguirre, E. G. 1999. Caracterización de especies arbóreas y arbustivas nativas con potencial para la alimentación de bovinos en Ixcán, Quiché, Guatemala. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 45 p.
- Argel, P. J. y Lascano, C. E. 1998. *Cratylia argentea*: Una nueva leguminosa para suelos ácidos en zonas subhúmedas tropicales. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG.

- Azzari, A. G. 1996. Efecto del nivel de suplementación con copal (*Verbesina apleura* Standl y Steyermerk) sobre el consumo voluntario de napier (*Pennisetum purpureum* Schum) y la ganancia de peso en cabritos estabulados. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 28 p.
- Barrow, N. J. 1987. En: R.W. Swanydon (ed.). *Managed Grasslands*. Elsevier, Oxford. p. 181-186.
- Benavides, J. E. 1998. Utilización de la morera en sistemas de producción animal. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG.
- \_\_\_\_\_. 1991. Integración de árboles y arbustos en los sistemas de alimentación para cabras en América Central: un enfoque agroforestal. *El Chasqui*. Costa Rica 25:6-35.
- \_\_\_\_\_. 1994. La Investigación en Árboles Forrajeros. En: árboles y arbustos forrajeros de América Central. J. Benavides (ed) CATIE, Costa Rica. Vol. 1: 3-19.
- \_\_\_\_\_; Esquivel, J.; y Lozano, E. 1985. Módulos agroforestales con cabras para la producción de leche. Guía técnica para extensionistas. Manual Técnico no. 18. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. 56 p.
- Bonsi, M. L.; Osuji, P. O.; Nsahlai, I.V.; y Tuah, A. K. 1994. Graded levels of *Sesbania sesban* and *Leucaena leucocephala* as supplements to teff straw given to Ethiopian Menz sheep. *Animal Production* 59:235-244.
- Bossel, H. 1986. *Ecological systems analysis. An introduction to modelling and simulation*. CRCUDS, Guanghou, China. p. 1.3-1.10.
- Botero, R. 1992. Estrategias para la alimentación de rumiantes con forrajes tropicales en sistemas de producción sostenible. En: Memorias del foro sobre Estrategias para la Producción Animal en el Proceso de Integración Colombo-Venezolana. Asociación Venezolana de Producción Animal (AVPA), Universidad Nacional Experimental del Táchira y Universidad Francisco de Paula Santander. San Cristobal, Venezuela. 18 p.
- \_\_\_\_\_. 1996. Fertilización racional y renovación de pasturas mejoradas en suelos ácidos tropicales. Documento interno. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH). Las Mercedes de Guácimo, Costa Rica. 21 p.
- \_\_\_\_\_ y Russo, R. O. 1998. Utilización de árboles y arbustos fijadores de nitrógeno en sistemas sostenibles de producción animal en suelos ácidos tropicales. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG.
- Bronstein, G. 1983. Los arboles en la producción de pastos. CATIE, Costa Rica. 10 p. (Mimeog.).
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1993. R. Radulovich, (ed.). Proyecto Sistemas de Producción Agrosilvopastoriles para Pequeños Productores de Ladera con Sequía Estacional de Centroamérica. Informe final. CATIE-ACDI. Turrialba, Costa Rica.

- Chen, C. P.; Chang, K. C.; Sidhu, A. S.; y Wahab, H. 1978. Pasture and animal production under five-year-old oil palm at serdang. Seminar on integration of animals with plantation crops, held at Pulau Pinang, April 13-15, 1978. Malaysian Society of Animal Production and Rubber Research Institute of Malaysia. 11 p.
- Conijn, J. G. 1995. RECAFS: A Model for resource competition and cycling in agroforestry systems. Model description and user manual. Production Soudano-Sahélienne. Exploitation optimale des éléments nutritifs en élevage. Projet de coopération scientifique. Raports PSS No. 12. IER, Bamako, AB-DLO, Wageningen, Haren, DAN-UAW, Wageningen. p. 3-18.
- Cruz, P. 1997. Effect of shade on the growth and mineral nutrition of a C<sub>4</sub> perennial grass under field conditions. *Plant Soil* 188:227-237.
- Daccarett, M. y Blydenstein, J. 1968. La influencia de los arboles leguminosos y no leguminosos sobre el forraje que crece bajo ellos. *Turrialba* 18(4):405-408.
- Eriksen, F. I. y Whitney A. S. 1981. Effects of light intensity on growth of some tropical forage species. I. Interaction of light intensity and nitrogen fertilization on six forage grasses. *Agron. J.* 73:427-433.
- FAO-UNESCO. 1971. Soil Map of the world. Volume IV: South America. UNESCO, Paris.
- \_\_\_\_\_. 1975. Soil Map of the world. Volume III: México and Central America. UNESCO, Paris.
- Fernandes, E. C.; Garrity, D. P.; Szott, L. T.; y Palm, C. A. 1994. Use and potential of domesticated trees for soil improvement. En: Leakey, R. R. y Newton, A. C. (eds.). Tropical trees: the potential for domestication and the rebuilding of forest resources. ITE Symposium No. 29. ECTF Symposium No. 1. Proceedings of a conference organized by the Edinburgh Centre for Tropical Forests. 23-28 August 1992, Londres: HMSO. p. 137-147.
- Fernandes, E. C. 1990. Alley cropping on acid soils. PhD. Dissertation. North Carolina State University.
- Flores, O. 1993. Caracterización y evaluación de follajes arbóreos para la alimentación de rumiantes en el departamento de Chiquimula. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 50 p.
- \_\_\_\_\_; Bolivar, D. M.; Botero, J. A.; e Ibrahim, M. A. 1988. Parámetros nutricionales de algunas arbóreas leguminosas y no leguminosas con potencial para la suplementación de rumiantes en el trópico. *Livestock Research for Rural Development* 10(1) WWW.CIPAV.ORG.CO
- Foild, N.; Mayorga, L.; y Velásquez, W. 1998. Utilización del marango (*Moringa oleifera*) como forraje fresco para ganado. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG.
- Galdámez, N. W. 1996. Utilización de follaje de shatate (*Cnidioscolus aconitifolius*) como suplemento para cabras lecheras en producción alimentadas a base de rastrojo de maíz (*Zea mays*), la Fragua, Zacapa. Guatemala. Tesis Lic. Zoot. Chiquimula, Guatemala. Universidad de San Carlos de Gautemal, Centro Universitario de Oriente. 53 p.

- Girón, H. 1993. Alternativas de suplementación nitrogenada en dietas a base de caña de azúcar para vacas lactantes de doble propósito durante la época seca. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 45 p.
- Gómez, M. E. y Preston, T. R. 1996. Ciclaje de nutrientes en un banco de proteína de matarratón (*Gliricidia Sepium*). *Livestock Research For Rural Development* 8(1). WWW.CIPAV.ORG.CO
- Gutiérrez, M. A. 1996. Pastos y Forrajes de Guatemala, su manejo y utilización, base de la producción animal. Guatemala, Editorial E y G. 318 p.
- Handayanto, E.; Cadish, G.; y Giller, K. E. 1995. Manipulation of quality and mineralisation of tropical legume tree prunings by varying nitrogen supply. *Plant Soil* 176:149-160.
- Harvey, C. A.; Haber, W. A.; Mejías, F.; y Solano, R. 1998. Remnant trees in Costa Rican pastures. Tools for Conservation? *Agroforestry Today* 10(3):7-9.
- Haynes, R. J. y Williams, P. H. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv. Agron.* 49:119-199.
- Hernández, C. A.; Alfonso, A.; y Duquesne, P. 1986. Producción de carne basada en pastos naturales mejorados con leguminosas arbustivas herbáceas. I. Ceba inicial. *Pastos y Forrajes* 9:79
- Hernández, D.; Hernández, I. y Carballo, M. 1992. Los pastos y la carne bovina en condiciones difíciles. *Asociación Cubana de Producción Animal (ACPA)*. Cuba 1:140.
- Hernández, I.; Milera, M.; Simón, L.; Hernández, D.; Iglesias, J.; Lamela, L.; Toral, O.; Matías C.; y Francisco, G. 1998. Avances en las investigaciones en sistemas silvopastoriles en Cuba. Conferencia electrónica de la fao sobre agroforestería para la producción animal en Latinoamérica. , FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG
- Hernández, K.J. 1997. Caracterización de especies arbóreas y arbustivas nativas con potencial para la alimentación de bovinos en el Petén. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 66 p.
- Hernández, S. 1993. Evaluación del potencial forrajero de especies leñosas de bosques secundarios en El Petén, Guatemala. Tesis, Mg. Sci. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 106 p.
- Herrera, O. 1994. El follaje de chaperno (*Lonchocarpus guatemalensis* Benth) como suplemento de dieta de napier (*Pennisetum purpureum* Schum) en el consumo voluntario y producción láctea en caprinos. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 53 p.
- Herrero, M. 1995. Grassland modelling: A decision support tool. *Ciencias Veterinarias, Costa Rica* 17:72-79.
- Iglesias, J.; Simon, L.; Docazal, G.; Aguilar, A.; y Duquesne, P. 1994. Asociaciones y/o bancos de proteína: alternativas para la cría de hembras en desarrollo en condiciones de bajos insumos. *Pastos y Forrajes* 17:83



- Johnson, I. R. y Thornley, J. H. 1984. A Model of instantaneous and daily canopy photosynthesis. *J. Theor. Biol.* 107:531-545.
- \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_. 1985. Dynamic model of the response of a vegetative grass crop to light, temperature and nitrogen. *Plant, Cell Environ.* 8:485-499.
- Kachaka, S.; Vanlauwe, B.; y Merckx, R. 1993, Decomposition and nitrogen mineralisation of prunings of different quality. En: Mulongoy, K. y Merckx, R. (eds.). *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*. Chapter 3.4. John Wiley & Sons. Chichester, West Sussex, Reino Unido. 199-208.
- Kass, D. L.; Barrantes, A.; Bermúdez, W.; Campos, W.; Jiménez, M.; y Sánchez, J. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (*Alley Cropping*) en La Montaña, Turrialba, Costa Rica. *El Chasqui, Costa Rica* 19:5-24.
- Ku, J. C.; Ramírez, L.; Jiménez, G.; Alayón, J. A.; y Ramírez, L. 1998. Árboles y arbustos para la producción animal en el trópico mexicano. Conferencia electrónica de la FAO sobre agroforestería para la producción animal en Latinoamérica. , FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG
- Lamela, L.; Valdes, L. R.; y Fung, C. 1996. Comportamiento del banco de proteína para la producción de leche. Resúmenes. X Seminario Científico de Pastos y Forrajes. EEPF Indio Hatuey. Matanzas, Cuba. p. 14.
- Lemaire, G. y Salette, J. 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4: 423-430.
- Ludlow M. M. 1978. Light relations of pasture plants. En: J. R. Wilson (ed.). *Plant relations in pastures*. CSIRO, East Melbourne, Australia. p. 35-49.
- Ludlow M. M.; Samarakoon, S. P.; y Wilson, J. R. 1988. Influence of light regime and leaf nitrogen concentration on 77K fluorescence in leaves of four tropical grasses: no evidence for photoinhibition. *Austr. J. Plant Physiol.* 15:669-676.
- Melillo, J. M.; Aber, J. D.; y Muratore, J. F. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63:621-626.
- Milera, M.; Iglesias, J.; Remy, V.; y Cabrera, N. 1994. Empleo del banco de proteína de *Leucaena leucocephala* cv. Perú para la producción de leche. *Pastos y Forrajes* 17:79.
- Murgueitio, E. y Calle, Z. 1998. Diversidad biológica en sistemas de ganadería bovina en Colombia. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG.
- Murtagh, G. J.; Hallingan, E. A.; y Greer, D. H. 1987. Components of growth and dark respiration of kikuyu (*Pennisetum clandestinum* Chiov.) at various temperatures. *Annals of Botany* 59:149-157.
- Muschler, R. G.; Nair, P. K.; y Meléndez, L. 1993. Crown development and biomass production of pollarded *Erythrina berteroana*, *E. fusca* and *Gliricidia sepium* in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 23:123-143.

- Mwiinga, R.; Kwesiga, F. R.; y Kamara, C. S. 1994. Decomposition of leaves of six multipurpose trees in Chipata, Zambia. *Forest Ecol. Manag.* 64:209-216.
- Oglesby, K. A. y Fownes, J. H. 1992. Effects of chemical composition on nitrogen from green manures of seven tropical leguminous trees. *Plant Soil* 143:127-132.
- Palm, C. A. y Sánchez, P. A. 1990. Decomposition and nutrient release patterns of the leaves of three tropical legumes. *Biotropica* 22(4):330-338.
- \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_. 1991. Nitrogen release from leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biol. Biochem.* 23:83-88.
- Parton, W.; Stewart, J. W.; y Cole, C. V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: A Model. *Biogeochem.* 5:109-131.
- Pezo, D.; Kass, D.; Benavides, J.; Romero, F.; y Chávez, C. 1990. Potential of legume tree fodders as animal feeds in Central America. En: C. Devendra (ed.). *Shrubs and tree fodders for farm animals. Proceedings of a workshop held in Denpasar, Indonesia, 1989.* IDRC, Ottawa. P 163-175.
- Pimentel, D.; Stachow, U.; Takacs, D.; Brubaker, H. W.; Dumas, A. R.; Meaney, J. J.; O'neil, A. S.; Onsi, D. E.; y Corzilius, D. B. 1992. Conserving biological diversity in agricultural and forestry systems. *BioScience* 42(5).
- Powell, J. M. y Williams, T. O. 1993. Livestock, nutrient cycling and sustainable agriculture. Sustainable Agriculture Programme. International Institute for Environment and Sustainability. Londres. Gatekeeper Series no. 37. 13 p.
- Reynolds, S. G. 1995. Pasture-cattle-coconut system. FOA, Roma. 668 p.
- Rika, I.K.; Nitis, I.M.; y Humphreys, L. R. 1981. Effect of stocking rate on cattle growth, pasture production and coconut yield in Bali. *Tropical Grasslands* 15(3):149-157.
- Robertson, D.; Bundy, A.; Muetzelfeldt, R.; Haggith, M. and Ushold, M. 1991. *Eco-Logic: Logic-Based Approaches to Ecological Modelling.* MIT Press. Londres. p. 11.
- Roche, L. J. 1996. Evaluación de follaje de shatate (*Cnidioscolus aconitifolius* Mill. I.M. Johnston) como suplemento de raciones para cabritos en crecimiento estabulados, Zacapa, Guatemala. Tesis Lic. Zoot. Chiquimula, Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Oriente. 49 p.
- Rosales, M. 1996. In vitro assessment of the nutritive value of mixtures of leaves from tropical fodder trees. Tesis de Doctorado. D. Phil. Department of Plant Sciences. Oxford University, Oxford, U.K. 214p.
- \_\_\_\_\_ y Ríos, C. I. 1998. Avances en la investigación en la variación del valor nutricional de procedencias de *Trichanthera gigantea*. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG.
- Rosecrance, R. C.; Brewbaker, J.L.; y Fownes, J. H. 1992. Alley cropping of maize with nine leguminous trees. *Agroforestry Systems* 17:159-168.

- Russo, R. O. y Botero, R. 1996. El sistema silvopastoril laurel-braquiaria como una opción para recuperar pastizales degradados en el trópico húmedo de Costa Rica. En: Memorias del I Congreso Agropecuario y Forestal de la Región Heter Atlántica. Guápiles, Costa Rica. 4 p.
- Sánchez, M. 1998. Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en América tropical. Conferencia electrónica sobre agroforestería en producción animal en Latinoamérica, FAO, Roma-Oxford Forestry Institute, UK-CIPAV, Colombia. WWW.FAO.ORG
- Sánchez, P. A. y Salinas, J. G. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv. Agron.* 34:279-406.
- Sanginga, N.; Danso, S. K.; Zapata, F.; y Bowen, G. D. 1994. Influence of pruning management on P and N distribution and use efficiency by N<sub>2</sub> fixing and non-N<sub>2</sub> fixing trees used in alley cropping systems. *Plant Soil* 167:219-226.
- Saunders, D. A. y Hobbs, R. J. 1991. The role of corridors in conservation: what do we know and where do we go? En: Saunders, D. A. y Hobbs, R. J. (eds.). *The role of corridors.* Surrey Beaty & Sons.
- Sinay, J. A. 1999. Caracterización de especies arbóreas y arbustivas nativas con potencial para la alimentación de bovinos en Fray Bartolomé de las Casas, Alta Verapaz, Guatemala. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 42 p.
- Szott, L. T.; Palm, C. A.; y Sánchez, P. A. 1991. Agroforestry in acid soils of the humid tropics. *Adv. Agron.* 45:275-301.
- Thomas, R. J. y Asakawa, N.M. 1993. Decomposition of leaf-litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biol. Biochem.* 25:1351-1361.
- Thomas, T. H.; Willis, R. W.; Winterbourne, J.; y Samuel, J. 1994, The BEAM Project. Using models to help design and evaluate tropical and temperate agroforestry systems. *Agroforestry Forum* 5(2):25-30.
- Thornley, J. H. M. 1991. A transport-resistance model of forest growth and partitioning. *Ann. Bot.* 68:211-226.
- \_\_\_\_\_ y Verberne, E. L. 1989. A model of nitrogen flows in grasslands. *Plant, Cell Environ.* 12:863-886.
- Tian, G.; Kang, B. T.; y Brussaard, L. 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions - Decomposition and nutrient release. *Soil Biol. Biochem.* 24(10):1051-1060.
- Tilley, J. M. y Terry, R. A. 1963. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *J. Brit. Grassl. Soc.* 18:104-111.
- Toledo, J. M. y Torres, F. (s.f.). Potential of silvopastoral systems in the rain fores. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Torres. F. 1985. El Papel de las leñosas perennes en los sistemas agrosilvopastoriles . INFORAT, CATIE, Costa Rica. 44 p. (mimeo).

- Valdivia, V. y Ku, J. C. 1996. Efecto del ramón (*Brosimum alicastrum*) sobre la digestión ruminal y el flujo de proteína microbiana en ovinos 'pelibuey' alimentados con pasto guinea (*Panicum maximum*). Reunión Nacional de Investigación Pecuaria. Cuernavaca 1996, Morelos, México. p. 267.
- Van Noordwijk, M. y Lusiana, B., 1999. WaNuLCAS, a model for water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 41:217-242.
- Van Soest, P. J. 1994. Nutritional ecology of the ruminant. 2<sup>nd</sup>. Edition. Cornell University Press. Ithaca. p. 184.
- Vanlauwe, B.; Diels, J.; Sanginga, N.; y Merckx, R. 1997. Residue quality and decomposition: an unsteady relationship? En: G. Cadisch y K.E. Giller (eds.). *Driven by nature: Plant Litter quality and decomposition*. Chapter 12. CAB International. Oxon, Reino Unido. p. 157-166.
- \_\_\_\_\_; Vanlangenhove, G.; Merckx, R.; y Vlassak, K. 1995. Impact of rainfall regime on the decomposition of leaf litter with contrasting quality under subhumid tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils* 20:8-16.
- Velásquez, C. 1992. El forraje de morera (*Morus* sp.) como fuente de proteína en dietas a base de ensilado de sorgo (*Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanense*) para novillos en el parcelamiento Cuyuta, Escuintla, Guatemala. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 43 p.
- Vidal, L. A. 1997. Utilización de follajes arbóreos en el comportamiento productivo de cabras estabuladas en el nororiente de Guatemala. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 37 p.
- Villanueva, C. 1994. Efecto de la suplementación con sauco (*Sambucus mexicanus* Presl.) sobre el consumo voluntario de rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) y el aumento de peso en cabritos estabulados. Tesis Lic. Zoot. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. 42 p.
- Walker, A. y Crout, N. 1997. ModelMaker. One-step simulation and model analysis. User Manual Version 3. Cherwell Scientific Publishing Ltd. Oxford. 374 p.
- Wilson, J.R. y Ludlow, M. M. 1992. The environment and potential growth of herbage under plantations. En: Shelton, H. M. y Stür, W. W. (eds.). *Forages for plantation crops*. Proceedings of a workshop held in Sanur Beach, Bali, Indonesia. ACIAR Proceedings no. 32. 168 p.
- Wong, C. C.; Rahim, H.; y Mohd Sharudin, M. A. 1985. Shade tolerance potential of some tropical forages for integration with plantations. 1. Grasses. *MARDI Res. Bull.* 13(3):225-247.
- Young, A.; Cheatle, R. J.; y Muraya, P. 1987. Soil changes under agroforestry (SCUAF): A predictive model. En: Young, A. (ed.). *The potential of agroforestry for soil conservation*. Part 3. ICRAF working paper no. 44.