

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE
INVESTIGACION Y ENSEÑANZA**

CATIE

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

ÁREA DE POSTGRADO

**EXPLORACION DE OPCIONES SILVOPASTORILES PARA
LA SOSTENIBILIDAD DEL SISTEMA DE DOBLE
PROPOSITO EN EL TROPICO HUMEDO**

Tesis sometida a consideración del Comité Técnico de Postgrado y Capacitación del Programa de Enseñanza en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar el grado de

Magister Scientiae

Por

Javier Antonio Botero Botero


Turrialba, Costa Rica

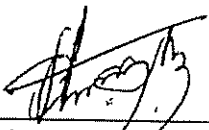
1998


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


MAGISTER SCIENTIAE

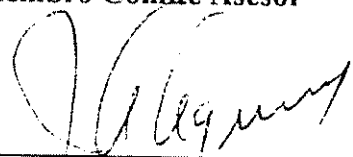
FIRMANTES:


Muhammad Ibrahim Ph.D.
Profesor Consejero


Sergio Velásquez M.Sc.
Miembro Comité Asesor


Hans Jansen Ph.D.
Miembro Comité Asesor


Bas Bouman Ph.D.
Miembro Comité Asesor


Juan A. Aguirre Ph.D.
Director y Decano de la Escuela de Postgrado


Javier Antonio Botero Botero
Candidato

a *LAURA*

AGRADECIMIENTOS

A Diana Bolívar y a Laura Botero, mi esposa y mi hija, por soportar las dificultades de estos dos años. Debo agradecer a mi familia por el apoyo económico y moral para la realización de los estudios.

Agradezco al Doctor Muhammad Ibrahim por su gran ayuda y apoyo durante los dos años de trabajo junto con él. Además de profesor, fue nuestro amigo.

Agradezco al Doctor Bas Bouman por su generosidad y apoyo académico, los cuales fueron fundamentales para la realización del trabajo de grado. Así mismo al Doctor Hans Jansen por sus aportes académicos y su apoyo logístico.

Debo agradecer la colaboración prestada por el Ms. Sergio Velásquez durante gran parte de la maestría y en el desarrollo del presente documento.

A todo el personal que labora en el proyecto REPOSA por su amistad y colaboración.

A los compañeros que en algún momento fueron apoyo moral y académico y con los cuales compartí los dos años de la mejor manera.

Al CATIE por brindarme un espacio de estudio y reflexión.

A todas las personas del CATIE que colaboraron para que vivieramos mejor.

SUMMARY

BOTERO, J. A. 1998. Exploration of silvopastoral systems for the sustainability of dual purpose cattle production in the humid tropics. Thesis MS.c. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 99 p.

Sustainability of tropical pastures has environmental and economic dimensions that are affected by the pasture species, age of the pasture and management. In the present study improved pastures and silvopastoral systems are explored that are economically and sustainable from a bio-physical point of view, to replace the degraded pastures in double purpose cattle production system. The objective is to define options that will optimise economic surplus of the production, when economic and sustainability restrictions are imposed. The investigation was developed in the Atlantic Zone of Costa Rica that corresponds to the humid tropics. The tools used were linear programming and a technical coefficients generator called PASTOR which was developed by REPOSA.

The options that were modelled were improved grass mono-cultures (*B. brizantha*, *Cynodon nlemfuensis* and *B. radicans*) with and without fertilisation; silvopastoral systems (protein bank of "poro": B-PT, alley farming pastures with "poro" and *B. brizantha*: K-PT, living fences of "poro" enriched with teak: PT, grazing under teak plantations: T) and an association of *B. brizantha* - *Arachis pintoi*. Economic variables evaluated were changes in meat, milk and timber prices and labour supply and cost. Five scenarios were built for each of these variables: the base scenario that consists of the actual price (obtained through interviews), a 10% and a 25% superior and inferior of the base price. The scenarios analysed to determine ecological sustainability of the land use systems modelled were: 1) mining of soil nutrients (N, P, K), and 2) green house emission of gases (N₂O and NO). Scenarios were built making gradual reductions in the quantity of nutrients mined from the soil and the amount of gas emitted.

The price of milk was the economic parameter that had more pronounced effect on the economic surplus of the system. The net income decreased in the same proportion that milk price was reduced. However, changes in milk prices had little effect on land use options; in this scenario the model selected a large area under natural pastures (N-PT), and the association of *Brachiaria brizantha*-*Arachis pintoi*, which represented 18% of the farm area. In spite of the decrease in net revenue, the quantity of milk and meat produced stayed constant as prices decreased; the quantity of wood produced was maintained constant since the area elected by the model for plantations was small and timber production on living fences is constant. The area with N-PT decreased when the price of the milk increased by 25% of the base price. A reduction in the price of meat by 25% resulted in a reduction of net revenue by 15% and similar changes was observed when timber price was reduced by 25%. The quantity of meat, wood and milk stayed constant with a decrease in the price of meat. The price of the wood had an important effect on the distribution of pastures; when the price increased by 25%, the model selected 45% of the pasture area with grass-legume mixture and the rest of area under plantations. This resulted in a reduction in the amount of animal products, while the opposite occurred when the prices of timber decreased. The quantity of milk

produced increased, since the land without use was reduced to only 2%. The area sown with the association increased to 21% of the farm area.

The model did not elect supplements for the different scenarios constructed except when the current price of supplements were reduced by 50%. The quantity of labour available was not restrictive, but labour price had serious implications on land use; total farm area was under use when current labour prices decreased by 20% (1600 colons/day). Equal situation occurred only when meat or milk price was 25% above of the base price. The area under improved pastures and silvopastoral systems increased when labour price decreased by 25%. The marginal price of the three soil types was always inferior to the commercial land prices in the zone. The poorly drained soils had little use compared to other soil types especially since these soils are not appropriate for Teak plantations.

In the base model N loss from the system was reduced to 29.6 kg./ha/year. The results showed that the use of well drained infertile soils (SIW) decreased as the amount of N loss was reduced, while the quantity of well drained fertile soil (SFW) cultivated with alley farming pastures (K-PT) increased significantly. When the amount of N mined was reduced to 0 kg the total area under SFW was used for K-PT while the area under SFP is sown in fertilised tanner. In this scenario the area under SIW was without use. Under this condition the quantity of milk and meat produced reduced by 19%, wood by 49% and the net revenue was reduced by 79%. The base model showed that the amount of P lost from the system was only 2.14 kg./ha/year and a reduction in the amount of P mined had little impact on the distribution of the pastures and on the economic parameters. An area of the SFW are planted with fertilized star (5%) while the area planted with the association maintained constant. The rest of the soil is maintained in N-PT. The net revenue was reduced by 11% when the amount of P mined from the soil was reduced to 0 kg; the amount of milk and meat produced is reduced by 5% but timber production was not reduced. In contrast, a reduction in the amount of K mined from the system to 0 kg, resulted in a significant reduction in economic surplus. The amount of K mined from the soil in the base scenario was only 22 kg./ha/year. When the amount of K mined in soil was reduced, N-PT on SFW was replaced with K-PT, SFP changes its use of N-PT to fertilised Tanner and the SIW was without use. The K-PT are a silvopastoral system that contributes to maintain the quantity of K of the soil, and this system became more important as the amount of K depleted was restricted. The living fences enriched with timber trees were elected in all the restrictions, as a form of optimising economic surplus.

The amount of gas emitted was the sustainability parameter analyzed which had more effects on the economic surplus. However, there was little changes in pasture distribution, natural pasture and enriched living fences with teak were the main land use options selected as the amount of gas emitted was reduced; the area without use increased with a reduction in gas emission. The quantity of gases emitted to the atmosphere in the base scenario was of 7.7 and 3.9 kg./year of N₂O and NO respectively. In the model is shown that are not conceived systems without gas emission.

RESUMEN

BOTERO, J. A. 1998. Exploración de sistemas silvopastoriles para la sostenibilidad del sistema de doble propósito en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 99 p.

La sostenibilidad de las pasturas tropicales tiene dimensiones económicas y ambientales que están afectadas por la especie, edad de la pastura y tipo de manejo. En el presente trabajo se exploran opciones de sistemas silvopastoriles y de pasturas mejoradas que sean factibles económicamente y sostenibles desde el punto de vista biofísico para reemplazar las pasturas degradadas bajo el sistema de doble propósito, con el objetivo de definir cuales opciones optimizan el ingreso neto del productor, cuando se imponen restricciones económicas y de sostenibilidad. La investigación se desarrolla en la Zona Atlántica de Costa Rica en el trópico húmedo. Las herramientas utilizadas son la programación lineal y un generador de coeficientes técnicos llamado PASTOR.

Como opciones para reemplazar las pasturas degradadas se modelaron pasturas mejoradas de gramíneas solas (*B. brizantha*, *Cynodon nlemfuensis* y *B. radicans*) con y sin fertilizantes; sistemas silvopastoriles (banco de proteína de poró: B-PT, pastura en callejones con poró y *B. brizantha*: K-PT, cercas vivas de poró enriquecidas con teca: PT, pastoreo bajo plantaciones de teca: T) y una asociación de *B. brizantha* - *Arachis pintoi* (Bb-Ap). Como variables de sostenibilidad económica se evalúan el precio de la carne, de la leche, de la madera, de los suplementos y de la mano de obra. Para cada uno de los productos se construyeron cinco escenarios: el base que consiste del precio actual (obtenido a través de entrevistas), un 10% y un 25% superior e inferior del precio base. En términos de sostenibilidad se analizan escenarios relacionados con la disminución de nutrientes en el suelo (N, P, K) y emisión de gases invernadero (N_2O y NO). Los escenarios se construyeron haciendo reducciones graduales en la cantidad de nutrientes disminuidos en el suelo y en la cantidad de gases emitidos.

El precio de la leche fue el parámetro económico que más afectó los ingresos netos del sistema. Los ingresos netos bajaron en la misma proporción que lo hizo el precio de la leche. Sin embargo, no tuvo efecto en la distribución de los diferentes opciones de pasturas, siendo siempre el más importante en área las pasturas naturales (N-PT), seguidas de la asociación de Bb - Ap, que representó el 18% del área de la finca. A pesar de la disminución del ingreso neto, la cantidad de leche y carne producida permaneció constante con las disminuciones de los precios; la cantidad de madera producida se mantiene constante ya que el área bajo plantaciones elegida por el modelo es muy baja y solo se obtiene la madera producida en cercas vivas, la cual es constante. Solo se encuentra una disminución del área con N-PT cuando el precio de la leche se incrementa un 25% del precio base. Cuando se disminuye el precio de la carne en un 25%, el ingreso neto solo se disminuye en un 15% (igual sucede con el precio de la madera); la cantidad de carne, madera y leche permanecen constantes con la disminución en el precio de la carne. El precio de la madera tuvo un efecto importante en la distribución de las pasturas, de tal forma que cuando el precio incrementó un 25%, el 45% se siembra en la asociación, pero la siembra del resto de la finca en plantaciones trae como consecuencia disminución en la cantidad de los otros productos. Al contrario con una disminución en el precio de la madera, la cantidad de leche producida se incrementa, ya que la tierra sin sembrar se

disminuye a un 2%, y la sembrada con asociación se incrementa a un 21% del área de la finca.

Con relación al uso de suplementos, no fueron utilizados en ninguno de los escenarios de precios de productos y de insumos; solo se eligieron cuando su precio disminuyó en un 50% del precio actual. La mano de obra nunca fue restrictiva en cantidad, pero su precio limitó el uso de la tierra; solo cuando el precio del jornal estuvo 20% inferior al precio actual (1600 colones) se sembró toda el área de la finca. Igual situación solo ocurre cuando el precio de la carne o de la leche está un 25% por encima del precio actual. A medida que disminuye el costo de la mano de obra, la cantidad de pasturas mejoradas y sistemas silvopastoriles se incrementa. El precio marginal de los tres tipos de suelo siempre fue inferior al precio comercial de la tierra en la zona. El suelo menos utilizado fue el Suelo fértil mal drenado (SFP) debido a no poderse plantar teca en las cercas vivas.

En el modelo base, las pasturas disminuyeron el contenido de N en 29.6 kg./ha/año. Los resultados cuando se restringió la pérdida de N muestran que el suelo infértil bien drenado (SIW) disminuye en uso, mientras que la cantidad de suelo fértil bien drenado (SFW) sembrado con pasturas en callejones (K-PT) se aumenta. Cuando la disminución de N en el suelo es 0, todo el SFW queda en K-PT y el SFP se siembra en tanner fertilizado, mientras que el SIW no es utilizado, esto trae como consecuencia que aunque la cantidad de leche y de carne producida solo se reduce un 19% y la madera un 49%, el ingreso neto se disminuye un 79%. La cantidad de P que se pierde en el modelo base es poca 2.14 kg./ha/año, por ello, el P muestra poco impacto en la distribución de las pasturas y en los parámetros económicos. Parte de los SFW son plantados con estrella fertilizada (5%), y la cantidad de suelo plantado con Bb-Ap se mantiene constante, el resto del suelo se mantiene en N-PT; el ingreso neto solo se reduce en un 11% cuando se restringe el modelo para que no se disminuya el P del suelo, la producción de leche y carne se disminuyen en un 5% y la de madera no se disminuye. Al contrario, el K disminuye fuertemente el ingreso neto cuando no se permite su pérdida desde el suelo. La cantidad de K que se pierde en el escenario base es de 22 kg./ha/año, pero cuando se restringe su pérdida a 0 kg., los parámetros económicos se ven igualmente afectados que con el N. Cuando se restringe la pérdida de K en el suelo, el SFW pasa de N-PT a K-PT, el SFP cambia su uso de naturales a Tanner fertilizado y el SIW deja de ser utilizado. Las K-PT son un sistema de pasturas que contribuye a mantener la cantidad de K del suelo, por lo cual a medida que se hace más fuerte la restricción, más área es sembrada con este sistema silvopastoril. Las cercas vivas enriquecidas con árboles maderables fueron elegidas en todas las restricciones, como forma de optimizar los ingresos netos al productor.

La emisión de gases fue el parámetro de sostenibilidad analizado que más afectó los ingresos netos. Sin embargo, la distribución de las pasturas, no cambió; el suelo que se utilizó en cada escenario siempre fue explotado con pasturas naturales (son el sistema que menos niveles de gases producen) con cercas vivas. A medida que se disminuyó la cantidad de gases que se pueden emitir a la atmósfera se aumentó el área sin uso. La cantidad de gases emitidos a la atmósfera en el escenario base fue de 7.7 y 3.9 kg./ha/año de N₂O y NO respectivamente. En el modelo se muestra que no se conciben sistemas sin emisión de gases.

INDICE GENERAL

SUMMARY	V
RESUMEN	VII
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE FIGURAS	XIII
CAPITULO I	1
INTRODUCCION GENERAL	1
BIBLIOGRAFIA	7
COLECCIÓN Y ANALISIS DE DATOS BIOLÓGICOS Y SOCIOECONÓMICOS PARA MODELAR SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE DOBLE PROPOSITO EN EL TROPICO HUMEDO	10
INTRODUCCION	10
DESCRIPCION CUANTITATIVA DEL DOBLE PROPOSITO EN LA ZONA ATLANTICA DE COSTA RICA.	12
DESCRIPCION CUANTITATIVA DE LOS PASTs.	14
DESCRIPCIÓN CUANTITATIVA DE LOS INSUMOS REQUERIDOS POR LOS PASTs Y APSTs EN LA ZONA ATLANTICA DE COSTA RICA.	21
INFORMACION REFERENTE A LOS FASTs	25
BIBLIOGRAFIA	26
CAPITULO III	30
EXPLORACION DE OPCIONES SILVOPASTORILES PARA LA SOSTENIBILIDAD ECONOMICA DE LA GANADERIA DE DOBLE PROPOSITO EN EL TROPICO HUMEDO	30
INTRODUCCION	30
MATERIALES Y METODOS	34
SOFTWARE	38
ESCENARIOS	38
RESULTADOS	40

1. Efecto del precio de la leche.	40
2. Efecto del precio de la carne.	42
3. Efecto del precio de la madera	43
4. Análisis de la mano de obra.	46
DISCUSION	51
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFIA	58
CAPITULO IV	62
EXPLORACION DE OPCIONES SILVOPASTORILES PARA LA SOSTENIBILIDAD BIOFISICA DE LA GANADERIA DE DOBLE PROPOSITO EN EL TROPICO HUMEDO	62
INTRODUCCION	62
MATERIALES Y METODOS	67
SOFTWARE	71
ESCENARIOS	72
RESULTADOS	74
NITROGENO	74
FOSFORO	76
POTASIO	77
OXIDO NITROSO Y OXIDO NITRICO	80
DISCUSION	85
CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFIA	90
CONCLUSIONES GENERALES	94
RECOMENDACIONES	96
ANEXO 1.	98
ANEXO 2.	99

INDICE DE TABLAS

TABLA No	TITULO	PAGINA
1	Información cuantificada sobre el hato en sistemas de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica.	13
2	Datos aplicables al archivo DOBLEHRD.DAT que no son obtenidos en campo.	14
3	Valores de las variables sobre costos de producción relacionadas con el manejo del hato de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica.	15
4	Información acerca de los tres tipos de cercas utilizadas en la Zona Atlántica de Costa Rica.	18
5	Cuantificación de la información para el establecimiento y manejo de pasturas mejoradas.	19
6	Información sobre pasturas mejoradas que son fertilizadas en la Zona Atlántica de Costa Rica.	20
7	Información sobre pasturas que son mejoradas pero que no son fertilizadas anualmente.	22
8	Información sobre pasturas no mejoradas o naturales.	23
9	Información cuantificada sobre el pastoreo bajo plantaciones.	23
10	Características de los insumos utilizados por el hato de doble propósito y por los diferentes sistemas de pasturas.	24
11	Información relacionada con los herbicidas utilizados por los productores en la Zona Atlántica de Costa Rica.	25
12	Información cuantificada de los suplementos comúnmente utilizados en la Zona Atlántica de Costa Rica.	25
13	Opciones para producir nutrientes necesarios para el sistema de producción animal.	35

14	Efecto del precio de la leche sobre los ingresos netos o función objetivo, los productos, el consumo de mano de obra y el precio sombra de algunos insumos.	41
15	Efecto del precio de la carne sobre los beneficios, los productos, el consumo de mano de obra y el precio sombra de algunos insumos.	44
16	Efecto del precio de la madera sobre los beneficios, los productos, el consumo de mano de obra y el precio sombra de algunos insumos.	46
17	Uso del suelo con pasturas para los escenarios en los cuales el precio de la mano de obra no es limitante	47
18	Efecto del precio de la mano de obra sobre la producción de la finca.	48
19	Distribución de las pasturas seleccionada por el modelo en los diferentes tipos de suelos según el escenario.	50
20	Opciones para producir nutrientes necesarios para el sistema de producción animal.	68
21	Parámetros productivos de la finca según las restricciones de disminución de N.	76
22	Parámetros productivos de la finca según las restricciones de disminución de P.	78
23	Parámetros productivos de la finca según las restricciones de disminución de K.	80
24	Parámetros productivos de la finca según las restricciones de N_2O cedido hacia la atmósfera.	82
25	Parámetros productivos de la finca según las restricciones de NO cedido hacia la atmósfera.	83

INDICE DE FIGURAS

FIGURA No	TITULO	PAGINA
1	Cálculo del perímetro de los potreros.	18
2	Efecto de la variación del precio de la leche sobre el uso de la tierra con pasturas (precio de la leche en junio de 1998).	42
3	Efecto de la variación del precio de la carne sobre el uso de la tierra con pasturas (precio de la carne en junio de 1998).	43
4	Distribución de la tierra en los diferentes PASTs, según el precio de la madera (precio en colones m ⁻³ , junio de 1988).	45
5	Relación entre los precios de los productos y el beneficio.	49
6	Uso del suelo con diferentes tipos de pasturas cuando no se hace ninguna restricción.	74
7	Efecto de la restricción en la cantidad de N que puede ser disminuida en el suelo, sobre el tipo de pasturas a utilizar.	75
8	Efecto de las restricciones en la cantidad de fósforo que se puede disminuir en el suelo sobre el tipo de pasturas a utilizar en la finca.	77
9	Efecto de la restricción en la disminución de potasio en el suelo sobre el uso con pasturas.	79
10	Cambio del uso de los suelos como respuesta a las restricciones en la emisión de N ₂ O.	81
11	Efecto de la disminución en la cantidad de NO que puede ser emitido desde el suelo a la atmósfera sobre el uso de suelos.	81
12	Efecto de las restricciones ambientales sobre el ingreso neto.	83

CAPITULO I

INTRODUCCION GENERAL

En Latinoamérica, la expansión de la ganadería está fuertemente asociada con la deforestación. El más importante cambio en el uso de la tierra en los últimos treinta años ha sido la conversión de bosques en pasturas, y se considera que entre 1981 y 1990 se perdieron 75 millones de hectáreas de bosques. Una parte importante de esta área fue utilizada para la ganadería extensiva (FAO, 1993). En Costa Rica entre 1950 y 1990, se deforestaron 1.3 millones de hectáreas, que fueron convertidas plenamente en pasturas (Sader y Joyce, 1988). Se considera que una de las razones para que esto ocurra es el bajo cambio tecnológico en el manejo de la ganadería, lo cual favorece los sistemas de explotación extensivos (Serrão y Toledo, 1992). Sin embargo, el aumento de la población y las fuerzas del mercado de la carne principalmente, han hecho que la población ganadera haya pasado de 0.6 a 1.7 millones de cabezas entre 1950 y 1992 en Costa Rica (Kaimowitz, 1996). Para esta época, se implementaron políticas por parte del estado para favorecer la ganadería, por ejemplo: tasas de interés nominal más baja que las tasas de interés real y créditos de capital disponibles solo para el sector de la ganadería, lo cual motivó a los productores a producir carne y leche (Kaimowitz, 1996).

La degradación de las pasturas es el problema básico de la falta de sostenibilidad en los sistemas de producción animal en los trópicos (Toledo, 1994). La falta de implementar tecnologías adecuadas en el manejo de especies forrajeras (gramíneas) exigentes principalmente en nutrientes, ha conllevado a que en estos terrenos desarrollen pasturas degradadas (Toledo y Serrão, 1984).

Cuando la capacidad de carga de las pasturas está adaptada a la capacidad natural que tiene el sistema de soportar animales (determinado por el clima, el suelo y la entrada natural de nutrientes), los niveles de producción de pastos pueden ser sostenidos por largos períodos de tiempo y los ingresos de los productores pueden ser estables. Sin embargo, cuando la

carga a la cual se someten las pasturas es mayor que la que puede sostener el sistema, la remoción de nutrientes del suelo a través de los productos animales, y por procesos como la lixiviación, la volatilización y la desnitrificación pueden ser mayores que las entradas; en este momento el contenido de minerales en el suelo empieza a ser disminuido. Este proceso determina que con el transcurso del tiempo, la productividad de la pastura disminuya y el sistema se transforme en insostenible.

Una pastura degradada se define como una área utilizada en ganadería generalmente con una cobertura de gramíneas o ciperáceas, con grados de enmalezamiento, de compactación del suelo y de erosión tales, que su productividad biológica y económica es inadecuada. En este marco general, este tipo de terrenos no responden en productividad, a las prácticas de manejo normales, para la especie principal de la pradera (Argel, 1992). La degradación se define como un cambio negativo en la condición de la pastura, o en forma más simple como un descenso en la calidad de la pastura. La calidad o la condición de la pastura es la suma de varios parámetros, tales como, composición botánica, reducción de la cobertura vegetal, disminución de la fertilidad del suelo, pérdida de especies deseables y aparición de especies indeseables con relación a un óptimo económico o ambiental. (Mannetje e Ibrahim, 1989). El parámetro más importante en la degradación de la pastura es su pérdida o disminución de su productividad biológica.

En las zonas húmedas tropicales, como la Zona Atlántica de Costa Rica, con la degradación se obtiene un descenso gradual en la capacidad de carga de la pastura. Mientras en los primeros años de establecimiento de la pastura un productor puede mantener un animal en cada hectárea, después de cinco o siete años él necesitará dos o tres hectáreas para mantener el mismo animal. Esto es debido a que el periodo de recuperación de la especie forrajera se aumenta de 45-55 días a 90 días, además a que ocurre un descenso en la cantidad de forraje producido por unidad de área como consecuencia de la menor cantidad de plantas que existen (Heckadon, 1984; Hordward, 1988). Se puede llegar a una reducción del 65% de la capacidad de carga cuando se pasa de una pastura de buena calidad a una pastura en estado avanzado de degradación, proceso que ocurre en el transcurso de 10 años (Hordward, 1988).

En Costa Rica, durante la década de los ochenta ha sucedido una rápida expansión del *Ischaemun ciliare*, comúnmente llamado Ratana, a expensas de pasturas más productivas. Esta especie tiene un limitado valor nutricional y es la principal responsable de un marcado descenso de la producción de leche por hectárea en la Zona Atlántica de Costa Rica (Holmann *et al*, 1992a; Morales, 1992; Pijnenburg y Martínez, 1992).

La Zona Atlántica de Costa Rica, durante los últimos cuarenta años, ha sido deforestada y el uso de la tierra ha cambiado rápidamente; actualmente predomina el uso en pasturas extensivas, que ocupaban para 1992, 200000 ha; los cultivos anuales y perennes (maíz, yuca, palmito y ñame) ocupaban 15000 ha; el banano, ocupaba para 1992, 40342 ha de suelos fértiles bien drenados principalmente (CATIE, 1987; Huising, 1993; Leeuwen y Hofstede, 1995; Bouman *et al*, 1998b).

Para Bouman y Nieuwenhuyse (1998), los sistemas de producción animal de engorde actuales en la Zona Atlántica de Costa Rica son insostenibles, ya que con niveles de producción de 10-15 t de MS ha⁻¹año⁻¹ de las pasturas naturales, se están perdiendo del suelo 50-65 kg. de N ha⁻¹año⁻¹. Esto traerá como consecuencia que los sistemas de producción se harán más extensivos, los ingresos netos de los finqueros disminuyan y menos área será usada con pasturas (Bouman *et al*, 1998c).

La disminución anual de N en pasturas tropicales es entre 65 y 94 kg. ha⁻¹año⁻¹ (Keller *et al*, 1993). Para detener esta disminución de nutrientes en el suelo se hace necesario implementar tecnologías que sean viables económicamente. La principal vía de entrada extra de N en las pasturas es a través de fijación simbiótica de microorganismos con leguminosas o a través de fertilizantes. Los fertilizantes son la opción más viable para aumentar las entradas de fósforo y potasio al sistema.

Recientes estudios sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno desde el suelo concluyen que el cambio en el uso de la tierra en los trópicos tendrá efectos atmosféricos importantes a nivel regional y mundial. La conversión de bosques tropicales hacia pasturas para ganadería pueden contribuir con emisiones de N₂O de 1 Tg hacia la atmósfera; una cuarta parte de todo el N₂O de origen antropogénico (Keller *et al*, 1994). En la zona Atlántica de

Costa Rica se ha encontrado que las emisiones de N_2O disminuyen con el tiempo después de tumbado el bosque para establecer pasturas (Keller *et al*, 1993).

En un estudio realizado en la Zona Atlántica de Costa Rica se encontró que el flujo de N_2O desde el suelo hacia la atmósfera tiene un patrón estacional en las pasturas fertilizadas y se encontró que es mayor cuando los suelos están húmedos (Veldkamp, 1993). También se encontró que la cantidad de nitrógeno que se perdía como gas fue de $0.94 \text{ ng de N cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ que correspondió a un 1.3% del fertilizante aplicado.

Según Veldkamp (1993), las especies forrajeras con alta productividad (especies mejoradas) son buenas competidoras por N mineral en el suelo, lo cual puede disminuir el N disponible para la nitrificación y denitrificación realizada por los microorganismos. Con esto será posible disminuir la liberación de gases hacia la atmósfera.

Sin embargo, es posible disminuir las pérdidas de nutrientes por lixiviación con la utilización de sistemas que permitan manejar dos estratos radicales con diferentes profundidades. Los sistemas silvopastoriles con árboles leguminosos pueden ser una opción que disminuya la cantidad de nutrientes lixiviados a través de los macroporos.

Una opción biológicamente viable para el manejo sostenible de la ganadería en estos terrenos, son los sistemas silvopastoriles, de los cuales se ha realizado mayor investigación en los últimos años han sido los bancos forrajeros, el pastoreo bajo plantaciones forestales, los árboles dispersos en potreros, las cercas vivas y las pasturas en callejones. Para definir cual de los posibles sistemas silvopastoriles es el más adecuado para la recuperación de pasturas degradadas, se hace necesario definir, cuales son sus potencialidades económicas y sus limitaciones de implementación. Con esta información se podrá determinar para una situación específica, cual es la opción económicamente factible para la producción ganadera con base en pasturas.

En Costa Rica a partir de la década de los ochenta, las políticas proteccionistas asociado con un incremento del 221% en el precio interno nominal de la leche; hacen más atractiva la producción de leche que la de carne (Kaimowitz, 1996; Montenegro y Abarca, 1998). El número de hembras bajo el sistema de doble propósito paso de representar el 14.5% en

1982 a ser el 24.7% de las hembras totales del país en 1988; al contrario en el mismo periodo de tiempo la hembras de carne pasaron del 68.7 al 56.7% del hato hembra nacional y en el número de hembras de lechería especializada se produjo un aumento del 2% para el mismo periodo (French, 1994). Estos datos muestran la importancia que adquiere la producción de leche en el país y principalmente con base en sistemas de doble propósito.

En las zonas húmedas tropicales es difícil producir leche con razas especializadas debido a problemas de adaptación de los animales; por ello se utilizan sistemas de doble propósito en los cuales se combinan características productivas de razas adaptadas a las condiciones ambientales (principalmente *Bos indicus*) con razas con alto potencial de producción (por ejemplo: Holstein, Jersey, Pardo suizo, etc.), logrando niveles adecuados de producción. En este sistema, además de la extracción de la leche, se producen terneros que generalmente son vendidos a otros productores para su engorde.

Un gran porcentaje del ganado en Centro América está siendo explotado bajo el sistema de producción del doble propósito; esto debido a que la leche genera utilidades y proporciona flujo constante de caja para el funcionamiento de la empresa o de la finca (Kaimowitz, 1996).

Es relevante conocer el comportamiento de los diferentes escenarios de uso de la tierra desde el punto de vista biofísico y socioeconómico, que permita decidir en un momento determinado, cual es la opción de producción más adecuada. Es necesario comparar ganadería con silvopastoreo vs ganadería con las pasturas tradicionales.

La programación lineal es una rama de las matemáticas desarrollada para solucionar problemas complejos sobre el uso, asignación y distribución de recursos con restricciones. Para ello es necesario que los sistemas sean descritos en forma cuantitativa (Hillier y Liebezman, 1986). Durante la última década un gran número de modelos de simulación han sido desarrollados, para describir y simular los procesos agro-ecológicos a diferentes niveles de detalle (Nicholson *et al*, 1994; Paz, 1996; Bouman *et al*, 1988a; Bouman y Nieuwenhuys, 1988). Un modelo es una relación formal entre el ingreso de parámetros externos y la salida de parámetros internos (Stoorvogel, 1995). La programación lineal es una herramienta que puede ser usada para analizar diferentes escenarios de usos de la

tierra, con lo cual se genera información para la planificación del uso de espacios en forma óptima desde el punto de vista económico y de la sostenibilidad. SOLUS (Sustainable Options for Land Use), se define como una metodología desarrollada para explorar opciones de uso de la tierra en el ámbito regional, para lo cual integra algunas técnicas y modelos. Esta metodología fue desarrollada por el programa REPOSA (REsearch Program On Sustainability in Agriculture) e integra herramientas para el análisis de escenarios y diferentes modelos de simulación (Bouman *et al*, 1998a).

La estructura de los modelos de optimización permiten cuantificar el intercambio entre los componentes y las restricciones, seleccionar la mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios y mostrar cuanto se puede pagar por una unidad adicional de un recurso que se agota. En esta investigación se identifican opciones silvopastoriles biológicamente viables que permitan reemplazar las pasturas degradadas que se han desarrollado en la Zona Atlántica de Costa Rica. Además permitirá identificar restricciones de tipo biofísico y socioeconómico para cada una de las alternativas (escenarios).

En este sentido el presente trabajo de investigación tiene como objetivo general: Determinar cuales de los sistemas silvopastoriles son los óptimos para ser utilizados en ganadería de doble propósito en el Trópico húmedo de Costa Rica. También se ha propuesto establecer diferencias económicas y ecológicas entre sistemas silvopastoriles y pastoreo de gramíneas naturales y mejoradas; desarrollar un modelo de maximización a través de programación lineal que contribuya a evaluar permanentemente los sistemas de uso de la tierra bajo ganadería en la Zona Atlántica de Costa Rica; identificar restricciones biofísicas y socioeconómicas de los sistemas silvopastoriles a nivel de finca en el trópico húmedo de Costa Rica a la vez que se generen coeficientes técnicos de los sistemas silvopastoriles y para el sistema de doble propósito.

BIBLIOGRAFIA

- ARGEL, P. J.** 1992. Problemática del pasto ratana en Costa Rica. *In* Seminario Taller El Pasto Ratana (*Ischaemum ciliare*) en Costa Rica, Alternativa o Problemática en Nuestra Ganadería? (1992, San Carlos, Costa Rica). San José, Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. P. 11-17.
- CATIE.** 1987. Agricultural research programme in the Atlantic Zone of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 16 p. (Atlantic Zone Programme Paper no 2)
- BOUMAN, B. A. M.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H.** 1998a. PASTOR: A technical coefficient generator for pasture and livestock systems in the humid tropics, version 2.0. A user's guide. Guápiles, Costa Rica, REPOSA. 59 p.
- _____ ; **SCHIPPER, R. A.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H.; JANSEN, H: P. G.** 1998b. Quantifying economic and biophysical sustainability trade-offs in land use exploration at the regional level: a case study for the Northern Atlantic Zone of Costa Rica. Ecological Modeling (in press)
- _____ ; **NIEUWENHUYSE, A.; IBRAHIM, M.** 1998c. Pasture degradation and its restoration by legumes in humid tropical Costa Rica. Tropical Grasslands (in press)
- _____ ; **NIEUWENHUYSE, A.** 1998. Exploring sustainable beef cattle farming options in the humid tropics; a case study for the Atlantic Zone of Costa Rica. In International Seminar on Agrarian Policies: 'A Decision Making Opportunity' (1998, Heredia, Costa Rica). Pre-proceedings. Heredia, Universidad Nacional. 23 p.
- FAO.** 1993. Forest resources assesement 1990, tropical countries. FAO Forestry Paper no 112. 68 p.
- FRENCH, J. B.** 1994. Current status and trends in animal agriculture in Central America. *In* Animal agriculture an natural resources in Central America: strategies for sustainability. Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 9-22.
- HECKADON, S.** 1984. Panama's expanding cattle front: The Santeño campesinos and the colonization of the forest. Ph. D. thesis. Essex, UK, University of Essex. 297 p.
- HILLIER, P. B. R.; LIEBEZMAN, G. J.** 1986. Introduction to operations research. 4 ed. Hoden Day, EE.UU. 887 p.
- HOLMANN, F.; ESTRADA, R. D.; ROMERO, F.; VILLEGAS, L. E.** 1992a. Technology adoption and competitiveness in small milk producing farms in Costa Rica; 1. a case of study [en línea]. Journal Livestock Research for Rural Development. 4 (1): Disponible en <http://www.cipav.org.co>

- HORDWARD, P.** 1988. Cattle subsystem expansion in Honduras and Nicaragua: The creation of a relative surplus population as a primordial cause of deforestation. In World Rural Sociology Congress (7, 1988, Bologna, Italy). Proceedings. p: 45-70.
- HUISING, J.** 1993. Land uses zones and land use patterns in the Atlantic Zone of Costa Rica a pattern recognition approach to land use inventory at the sub-regional scale, using remote sensing and GIS, applying an object-oriented and data-driven strategy. Ph.D. thesis. Wageningen, Netherlands, Wageningen Agricultural University. 222 p.
- KAIMOWITZ, D.** 1996. Livestock and deforestation Central America in the 1980s: A policy perspective. Jakarta, Indonesia. Center for International Forestry research. 88 p.
- KELLER, M.; VELDKAMP, E.; WEITZ, A. M.; REINERS, W. A.** 1993. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. *Nature* 365: 244-246.
- _____; **REINERS, W. A.** 1994. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biochemical Cycles*. 8 (4): 399-409.
- LEEUWEN, A. C. J. VAN; HOFSTEDE, A. M.** 1995. Forest, trees and farming in the Atlantic Zone of Costa Rica. An evaluation of the current and future integration of trees and forest in farming systems in the Atlantic Zone of the Costa Rica. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico no 257. 48 p.
- MANNETJE, L. T'; IBRAHIM, M.** 1989. Pasture degradation and restoration in Costa Rica in relation to production and biodiversity. (En prensa)
- MONTENEGRO, J.; ABARCA, S.** 1998. La ganadería en Costa Rica: Tendencias y proyecciones, 1984-2005. San José, C.R., Ministerio de Agricultura y Ganadería. 70p
- MORALES, J. L.** 1992. Distribución del pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en las tierras de pastoreo de Costa Rica. In Seminario Taller El Pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en Costa Rica, Alternativa o Problemática en Nuestra Ganadería? (1992, San Carlos, Costa Rica). San José, Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. P. 1-10.
- NICHOLSON, C. F.; LEE, D. R.; BOISVERT, R. N.** 1994. An optimization model of the dual purpose cattle production system in the humid lowlands of Venezuela. *Agricultural Systems*. 46: 311-334.
- PAZ, N.** 1996. Optimización de sistemas de producción animal de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 132p.

- PIJNEBURG, T. ; MARTINEZ, P.** 1992. PRODES, Nueva Guinea, Diagnóstico socio-económico. documento No 1. Nueva Guinea. Programa de Cooperación técnica Nicaragüense - Holandés. 30p.
- SADER, S. A.; JOYCE, A. T.** 1988. Deforestation rates and trend in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20: 11-19.
- SERRÃO, E. A.; TOLEDO, J. M.** 1992. Sustaining pasture based production system for the humid tropics. *In* Development or destruction, the conversion of tropical forest to pasture in Latin America. Eds. S. Downing H. Pearson C. Garcia Downing. Boulder, Westview Press. p. 257-280.
- STOORVOGEL, J. J.** 1995. Linking GIS and models: Structure and operationalisation for a Costa Rica case study. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 43: 19-30.
- TOLEDO, J. M.; Y SERRÃO, A.** 1984. Proyecto de investigación en pasturas y ganadería. Lima, Perú, REDINA. 71p.
- TOLEDO, J. M.** 1994. Livestock productions on pasture: parameters for sustainability. *In* Animal agriculture an natural resources in Central America: strategies for sustainability; Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 125-136.
- VELDKAMP, E.** 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Agriculture University of Wageningen. 117 p.
- _____ ; **KELLER, M.; NUÑEZ, M.** 1998. Effects of management on N₂O and NO emissions from passture soils in the humid tropics of Costa Rica. (Submitted to Global Biogeochemical Cycles)

CAPITULO II

COLECCIÓN Y ANALISIS DE DATOS BIOLÓGICOS Y SOCIOECONÓMICOS PARA MODELAR SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE DOBLE PROPÓSITO EN EL TROPICO HUMEDO

INTRODUCCION

La Zona Atlántica de Costa Rica, durante los últimos cuarenta años, ha sido deforestada y el uso de la tierra ha cambiado rápidamente; actualmente predomina el uso en pasturas extensivas, que ocupaban para 1992, 200000 ha; los cultivos anuales y perennes (maíz, yuca, palmito y ñame) ocupaban 15000 ha, el banano, ocupaba para 1992, 40342 ha de suelos fértiles bien drenados principalmente, pero siempre cercanos a los ríos y las vías de acceso (CATIE, 1987; Leeuwen y Hofstede, 1995; Bouman y Nieuwenhuys, 1998).

En Costa Rica, durante la década de los ochenta ha sucedido una rápida expansión del *Ischaemun ciliare*, comúnmente llamado Ratana, a expensas de pasturas más productivas. Esta especie tiene un limitado valor nutricional y es la principal responsable de un marcado descenso de la producción de leche por hectárea en la Zona Atlántica de Costa Rica (Holmann *et al*, 1992a; Morales, 1992; Pijnenburg y Martínez, 1992).

Una opción biológicamente viable para el manejo sostenible de la ganadería en estos terrenos, son los sistemas silvopastoriles, de los cuales se ha realizado mayor investigación en los últimos años han sido principalmente los bancos forrajeros, el pastoreo bajo plantaciones forestales, los árboles dispersos en potreros, las cercas vivas con especies de valor nutritivo y las pasturas en callejones. Para definir cual de los posibles sistemas silvopastoriles es el más adecuado para la recuperación de pasturas degradadas, se hace necesario definir, cuales son sus potencialidades económicas y sus limitaciones de implementación. Con esta información se podrá determinar para una situación específica, cual es la opción económicamente factible para la producción ganadera con base en pasturas.

La programación lineal es una rama de las matemáticas desarrollada para solucionar problemas complejos sobre el uso, asignación y distribución de recursos con restricciones. Para ello es necesario que los sistemas sean descritos en forma cuantitativa (Hillier y Liebezman, 1986). Durante la última década un gran número de modelos de simulación han sido desarrollados, para describir y simular los procesos agro-ecológicos a diferentes niveles de detalle (Nicholson *et al*, 1994; Paz, 1996; Bouman *et al*, 1988; Bouman y Nieuwenhuys, 1988). Un modelo es una relación formal entre el ingreso de parámetros externos y la salida de parámetros internos (Stoorvogel, 1995). Los modelos de programación lineal pueden ser usados para analizar diferentes escenarios de usos de la tierra, con lo cual se genera información para la planificación del uso de espacios en forma óptima desde el punto de vista económico y de sostenibilidad. La estructura de los modelos de optimización permiten cuantificar el intercambio entre los componentes y las restricciones, seleccionar la mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios y mostrar cuanto se puede pagar por una unidad adicional de un recurso que se agota. En esta investigación se identifican opciones silvopastoriles biológicamente viables que permitan reemplazar las pasturas degradadas que se han desarrollado en la Zona Atlántica de Costa Rica. Además permitirá identificar restricciones de tipo biofísico y socioeconómico para cada una de las alternativas

Para desarrollar los modelos se hace necesaria poseer la mayor cantidad de información posible de cada uno de los aspectos relacionados con los sistemas de producción. La precisión en la información y el nivel de detalle, están relacionados con la eficiencia de los modelos para predecir el comportamiento de los escenarios. En este sentido la parte inicial del presente trabajo de investigación consistió en recopilar la información necesaria y lo más ajustada a las condiciones de producción posibles.

Para ello se realizaron cincuenta entrevista en la zona de estudio y análisis de laboratorio, que permitió cuantificar los sistemas para ser incorporados a los modelos. La información que no puede ser suministrada por los propietarios o no puede ser adquirida en campo, por razones de tiempo y dinero, fue recopilada en fuentes bibliográficas.

En los modelos de maximización se utilizó información referente a la forma de utilización del sistema de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica, la manera de explotar

diferentes tipos de pasturas y de sistemas silvopastoriles y la cantidad, calidad y precios de diferentes tipos de suplementos.

Las fuentes de la información fueron primarias y secundarias dependiendo de la posibilidad de producirla directamente en el transcurso de la investigación y de la falta de disponibilidad de ella en fuentes secundarias confiables. Según lo anterior, se describirá la forma como se obtuvieron los datos y los valores obtenidos de cada uno de ellos.

Esta información fue procesada de tal forma que pudiera ser ingresada a los formatos del modelo PASTOR, de manera que este pudiera generar los coeficientes técnicos que posteriormente ingresan al modelo de maximización en GAMS 3.86.

DESCRIPCION CUANTITATIVA DEL DOBLE PROPOSITO EN LA ZONA ATLANTICA DE COSTA RICA.

Para describir cuantitativamente el sistema de doble propósito en la Zona de estudio, se utilizó el sistema de entrevista. Para ello se consultó a cincuenta productores de la zona (en las regiones de Cariari, Guácimo, Palmitas y Guápiles) seleccionados al azar de una lista facilitada por los empleados del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica de la oficina de Guápiles. Además se utilizó información secundaria sobre la zona. Se corroboró la información reproductiva del hato a partir de la palpación rectal de aquellos animales a los cuales el productor conocía la fecha de parto. También fue utilizada la información básica de las encuestas obtenidas en otro trabajo de investigación en la misma zona y con el mismo sistema de producción (Paz, 1996).

Es importante resaltar que la información recolectada fue orientada a obtener los datos indispensables para que el modelo PASTOR pueda generar los coeficientes técnicos de cada parte del modelo. Esto es cierto para el sistema de producción animal de doble propósito (APSTs: Animal Production System at a defined Technology), para las pasturas naturales, mejoradas y sistemas silvopastoriles (PASTs: PASTure production Systems at a defined Technology) y para los suplementos (FAST: Feed Aquisition System at a defined Technology).

El modelo PASTOR requiere información en dos archivos diferentes referentes al hato: uno relacionado con las características biológicas (en la investigación se ha llamado DOBLEHRD.DAT) y otro relacionado con el manejo del hato, el cual incluye datos socioeconómicos (en la investigación se ha llamado DOBLEMAN.DAT). El resumen de la información obtenida y que fue utilizada por el modelo PASTOR en el archivo DOBLEHRD.DAT se puede ver en la tabla 1.

Tabla 1. Información cuantificada sobre el hato en sistemas de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica.

PARAMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
Tamaño del hato, No animales	142	Encuestas
Tipo de raza	pequeña	Encuestas
Peso edad madura de machos (kg.)	450	Encuestas
Peso edad madura hembras (kg.)	435	Encuestas Datos de subasta de Guápiles.
Edad máxima de reproducción, años	8	Promedio de vida útil del hato.
Peso vivo del animal al nacimiento, kg.	28	Encuestas.
Edad de destete y venta de machos, meses	8.5	Encuestas
Edad de destete y venta de hembras, meses	8.5	Encuestas
Ganancia de peso vivo (Gdp) de 0-1 año, g animal ⁻¹ d ⁻¹ (machos)	478	Cálculo ((150-28)/(8.5*30). El cálculo se realiza sobre datos de las encuestas.
Gdp de 1-2 año, g animal ⁻¹ d ⁻¹ (machos)	301	Cálculo ((260-202)/365). Encuestas.
Gdp de 2-3 años, g animal ⁻¹ d ⁻¹ (machos)	247	Cálculo ((350-260)/365). Encuestas.
Gdp de hembras		Cálculo: 90% de la ganancia de peso de los machos para cualquier grupo de edad.
Tasa de mortalidad de 0-1 año, %	11	Encuestas.
Tasa de mortalidad de 1-2 año, %	2	Encuestas.
Tasa de mortalidad de 2-3 año, %	2	Encuestas.
Tasa de abortos, %	0	Aunque en las encuestas algunos productores reportaron algún suceso, es muy bajo y se consideró 0%.
Edad al primer parto, meses	42	Encuestas.
Intervalo entre partos, meses	14	Encuestas y fue corroborado por palpación rectal.
Duración de la lactancia, meses	8.5	Igual a la edad de destete. Encuestas.
Producción de leche, kg. vaca ⁻¹ d ⁻¹ .	6.0	Encuestas.
Fracción de leche vendible, %	80	Encuestas.

Existen otros valores que son necesarios para los cálculos internos del modelo PASTOR en DOBLEHRD.DAT pero que por su naturaleza no pueden ser calculados ni obtenidos en campo. Para esta información se ha recurrido a la literatura y discusión con expertos del CATIE. Estos datos se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Datos aplicables al archivo DOBLEHRD.DAT que no son obtenidos en campo.

PARAMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
Factor de corrección en la energía de mantenimiento según sistema de pastoreo	1.2	Se utiliza el mayor, ya que el sistema de pastoreo exige bastante ejercicio del animal.
Factor de corrección por efecto de raza sobre los requerimientos de mantenimiento	1.2	Es el mayor valor, ya que el costo de adaptación de los cruces con alto porcentaje de razas europeas implica mayor consumo de energía.
Duración de la gestación, meses	9.5	Es el valor medio usado para cruces en el trópico*.
Grasa en leche, %	3.6	Valor encontrado en análisis de leche.
Peso específico de la leche	1.03	
Factor de corrección para la concentración de energía en la dieta.	0.9	Se elige el menor valor, ya que la ración es de baja cantidad de concentrados y mediana digestibilidad.

* Porte, *et al*, 1985; Leite *et al*, 1986; Pelegrino, 1986; Montoni, *et al*, 1990.

El archivo DOBLEMAN.DAT hace referencia a los costos, tipo de insumos y cantidad de mano de obra consumidos en actividades del hato. Los insumos son descritos cuantitativamente en forma más detallada, en otros dos archivos que son MATER.ATF y CATTLE. ATF. La información necesaria en el modelo, referente al doble propósito, almacenada en los tres archivos se presentan en la tabla 3.

DESCRIPCION CUANTITATIVA DE LOS PASTs.

En la investigación sobre el uso de la tierra en el Trópico Húmedo de Costa Rica, se consideran tres sistemas principales: 1. Pastura natural, 2. Pastura mejorada y 3. Sistemas silvopastoriles. La pastura natural se caracteriza por especies de baja productividad y que son sometidas a sistemas de manejo poco intensivos, tales como: *Ischaemun ciliare*, *Axonopus sp* y *Paspalum notatum*.

Tabla 3. Valores de las variables sobre costos de producción relacionadas con el manejo del hato de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica.

PARAMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
Cantidad y Tipo de Corral necesario para el manejo del hato. Equipos para suministro de sal mineralizada	Un Corraldp, su valor es 1500000 colones. 3 botes de madera	Su duración es 20 años. Entrevistas. La duración es de 5 años y su costo 3000 colones*
Herramientas (incluye 3 tarros necesarios para el ordeño)	5 herramientas clasificadas como pequeñas. 5 herramientas medianas	El tiempo de uso es 5 años. Sus costos son 650 y 1700 colones respectivamente.*
Herramientas mayores (para el doble propósito incluye el equipo de ordeño)	560000 colones	
Tiempo para aplicar drogas a los animales	18 jornales año ⁻¹ .	Entrevistas.
Cantidad y tipo de droga	700 cc de oxitetraciclina año ⁻¹ . 10 dosis de antimastitis	Entrevistas.
Tiempo requerido para la asistencia al parto.	1.5 horas ternero ⁻¹ que nace en el hato.	Entrevistas.
Cantidad de sal y minerales suministrados al hato (gr.)	Sal común=28 minerales =7.6. sal mineral compuesta= 8.5	Entrevistas.
Tiempo requerido para el suministro de Sal.	10 jornales año ⁻¹ .	Entrevistas.
Drogas suministradas al animal una vez en la vida y a todos los animales, cc animal ⁻¹	Vacuna brucelosis= 5 Doramectina = 1	Entrevistas.
Drogas suministradas en forma repetida a todos los animales, cc animal ⁻¹ año ⁻¹	Vacuna triple= 10. Parasiticida externo= 0.11. Cloro= 438. Yodo al 15%=365 Parasiticida interno= 20.	Entrevistas.
Tiempo para suministro de los insumos suministrados a los animales en forma repetida.	0.7 , h aplicación ⁻¹ insumo ⁻¹ .	Entrevistas.
Tiempo requerido por litro de leche vendido.	0.027 horas	Entrevistas.
Tiempo requerido para poner los animales en el corral para ser ordeñados.	0.5 horas.	Encuestas.

*Bouman *et al*, 1998.

En las pasturas mejoradas se consideran especies de gramíneas genéticamente más productivas y que son sometidas a un plan de manejo más intensivo en términos de uso de fertilizantes y de herbicidas; en esta categoría se consideran *Cynodon nlemfuensis*, *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria radicans*. Aunque la asociación *Brachiaria brizantha*-*Arachis pintoi* son especies mejoradas son menos intensivas en el uso de insumos, ya que la leguminosa tiene la capacidad de fijar nitrógeno en el sistema. En los sistemas silvopastoriles evaluados, los árboles tienen varias funciones: forraje y fijación de nitrógeno (banco de proteína de *Erythrina berteroana* y pastura en callejones de *Brachiaria brizantha* y *Erythrina berteroana*) y para producción de madera y fijación de CO₂ (pastoreo bajo plantaciones de *Tectona grandis*).

Para obtener la información referente a estos tipos de pasturas se recurrieron principalmente a las bases de datos de PASTOR (parte de la información referente a pasturas naturales tales como *Ischaemun ciliare* y *Paspalum notatum*, pasturas mejoradas como *Cynodon nlemfuensis*, *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria radicans* y sobre la asociación de *Brachiaria brizantha* y *Arachis pintoi*). Con las encuestas realizadas a los productores del doble propósito se recolectó parte de la información referente a insumos de las pasturas como cercas, herbicidas y utilización de mano de obra en desmalezadas químicas y manuales. En los trabajos de investigación realizados en la zona se recopiló información técnica sobre producción y estructura de costos de los sistemas silvopastoriles considerados.

La información sobre los sistemas de pasturas se dispuso en los archivos de PASTOR (cada tipo de pastura tiene un archivo .DAT), en los archivos de materiales, biocidas, equipo, tracción y fertilizantes que se encuentran en el archivo de atributos.

Cada uno de los sistemas de pasturas fue desarrollado con dos tipos de cercas vivas (sistemas silvopastoril) y con cercas muertas. En los dos sistemas se encuentran diferencias importantes en cuanto al uso de mano de obra, producción de biomasa y uso de capital.

Sin embargo, independiente de la especie o del tipo de pastura a establecer o establecida, se suponen igual los costos de establecimiento de cualquiera de los tres tipos de cerca. Por

ello se presentan los datos de cada tipo de cerca aparte. Cuando la pastura se encuentra con cerca viva, la producción de forraje se incrementa en 1350 kg. de materia seca $\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ que puede ser utilizada en la alimentación de los animales. De otro lado la cerca viva exige mayor utilización de mano de obra para labores como poda (Holmann *et al*, 1992b). De tal forma el modelo puede elegir de cada tipo de pastura dos opciones: con cerca viva o con cerca muerta.

La especie utilizada en la mayoría de las cercas vivas de la Zona Atlántica de Costa Rica es la *Erythrina berteroana* cuyo nombre común es poró, debido a sus adecuadas características reproductivas (fácil de reproducir por estaca), buen valor nutricional, buena aceptabilidad por el ganado y relativo fácil manejo. La información de los tres tipos de cerca se puede observar en la tabla 4. La cerca viva puede ser de poró solo o enriquecida con *Tectona grandis* (Teca). para esto cada 5 metros se siembra un árbol de teca para ser cosechado a los doce años. El incremento medio anual en el volumen de madera fue diferente según el tipo de suelo; así en suelos fértiles bien drenados en pasturas fertilizadas: $2.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$; en los mismos suelos pero con pasturas sin fertilizar 2.2 m^3 , en suelos infértiles bien drenados con pasturas fertilizadas 2.2 m^3 y en pasturas no fertilizadas 2 m^3 . Sobre suelos fértiles mal drenados la teca no crece. Cuando la cerca es enriquecida con teca, la producción de materia seca de la pasturas es disminuida en un 10% y se incrementan los costos de establecimiento de la cerca.

Debido a que las cercas son lineales, la gran mayoría de información se reporta en unidades de distancia (Km, principalmente). El modelo PASTOR requiere toda la información de las pasturas con base en hectáreas para realizar los cálculos. Por ello fue necesario convertir la información recolectada de kilómetros a hectáreas. Para la conversión se hicieron los cálculos que se explican a continuación

Se parte de una finca de 24 ha, en las cuales se maneja el pasto en rotación para su mejor producción. La rotación es de 5 días de ocupación y 35 días de descanso. Aplicando la fórmula $\text{No de potreros} = (\text{días de descanso} / \text{días de ocupación}) + 1$; se obtiene que el número de potreros es igual a ocho. Así, cada potrero mide 3.0 ha, ósea, potreros rectangulares con un lado de 200 m y otro de 150.

Con esta situación se tiene que:

Un potrero se le deben cercar los 4 lados, el perímetro cercado es 700 metros.

Cuatro potreros se le deben cercar 3 lados, el perímetro cercado es 2150 metros.

Tres potreros se le deben cercar dos lados, el perímetro cercado es 1100 metros.

La suma da 3950 metros, los cuales son para 24 ha. Así por cada ha son: 164 metros.

En a figura 1 se muestra gráficamente la situación.

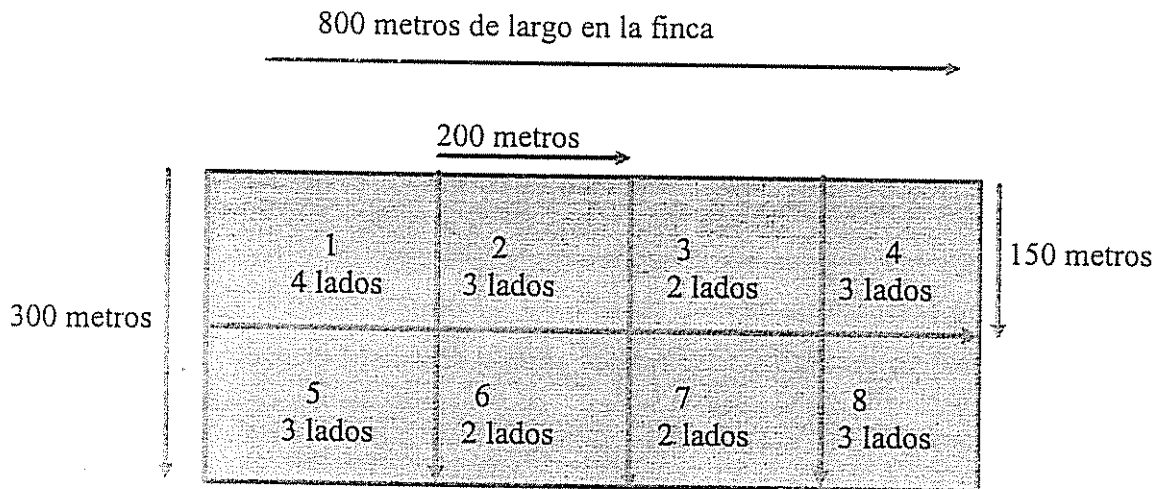


Figura 1. Cálculo del perímetro de los potreros.

Tabla 4. Información acerca de los tres tipos de cercas utilizadas en la Zona Atlántica de Costa Rica

PARAMETRO	VALOR			OBSERVACIONES
	VIVA	MUERTA	TECA	
Mano de obra para establecimiento en jornales ha ⁻¹	1.25	3	4	Encuestas y revisión bibliográfica*
Alambre de púas en metros (supone 4 hilos de alambre)	650	650	650	Encuestas.
Postes muertos	9	50	9	Encuestas y revisión bibliográfica
Arboles de teca	0	0	30	
Estacas de poró	90	0	60	Encuestas y revisión bibliográfica
Grapas en kg. ha ⁻¹	2	1.2	1.2	Encuestas y revisión bibliográfica
Mano de obra para el mantenimiento de la cerca en jornales año ⁻¹	0.25	0.25	1	Encuesta y revisión bibliográfica

* Romero *et al*, 1991; Romero *et al*, 1993; Holmann y Estrada, 1997.

En la tabla 5 se presentan los datos sobre establecimiento y manejo que son comunes para todos aquellos sistemas de pasturas mejoradas. En la tabla 6 se muestra la información relacionada con las pasturas mejoradas que requieren ser fertilizadas todos los años. En la tabla 7 se presentan los datos sobre las pasturas mejoradas que no son fertilizadas (asociación y sistemas silvopastoriles) y en la tabla 8, sobre las pasturas con especies naturales. Para cada uno de los sistemas de pasturas se presenta su potencial de producción en suelos fértiles bien drenados (SFW), suelos fértiles mal drenados (SFP) y en suelos infértiles bien drenados (SIW).

El pastoreo bajo plantaciones es muy particular, debido a que en este sistema de pastura se realizan actividades principalmente para la plantación. No es claro hasta que punto estas prácticas pueden mejorar la calidad y la cantidad de forraje disponible bajo la plantación. Sin embargo, se utiliza las experiencias de investigaciones sobre el efecto de la sombra sobre la calidad de la planta forrajera. La gran mayoría de información proviene de datos de literatura del proyecto Madeleña y otras fuentes del CATIE sobre plantaciones de teca en Costa Rica.

Tabla 5. Cuantificación de la información para el establecimiento y manejo de pasturas mejoradas.

PARAMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
Herbicidas necesarios para el establecimiento de la pastura (1 ha ⁻¹)	2,4-D + picloram=1 2-4D= 4 Glyphosato= 4	Entrevistas y revisión bibliográfica*
Fertilizantes requeridos para el establecimiento (kg. ha ⁻¹)	P=27 (en forma de P ₂ O ₃). N=25 K= 9	Revisión bibliográfica*
Insumos necesarios para el establecimiento de la pastura.	Herramientas pequeñas=5. Arado= 4 horas ha ⁻¹ Rastra=2 horas ha ⁻¹ Con tractor de 60-100 HP.	Entrevistas. Revisión bibliográfica
Cantidad de fertilizante anual	150 kg. de N ha ⁻¹	Cantidad igual al cálculo de remoción del nutriente. PASTOR**
Uso de mano de obra. (jornales ha ⁻¹)	Establecimiento= 8.5 Fertilización anual de mantenimiento = 0.5	Encuestas y base de datos de PASTOR.

* Joenje, 1996a; Holmann y Estrada, 1997.

** PASTOR: Bouman *et al*, 1998.

Generalmente en plantaciones puras, no es necesario tener en cuenta la construcción de cercas. Sin embargo, es necesario construir divisiones, que permitan un pastoreo rotacional para lograr un uso más eficiente del forraje con menos daños para los árboles.

Para el análisis de la información del pastoreo bajo plantaciones de *Tectona grandis* (Teca), se asumió un turno de 25 años. Además se supuso que la finca o la plantación se encuentra en equilibrio, es decir, el terreno bajo plantación tiene árboles de todas las edades. Esto permite que el propietario corte todos los años la misma cantidad de terreno que siembra y permite hacer los cálculos promediando todo en los 25 años (Holmann y Estrada, 1997). Los resultados del pastoreo bajo plantaciones se encuentra en la tabla 9. En esta información no se tienen en cuenta costos de cosecha, pues para el análisis de maximización los precios de la madera son en pie.

Tabla 6. Información sobre pasturas mejoradas que son fertilizadas en la Zona Atlántica de Costa Rica.

PARAMETRO	VALOR		
	BRIZANTHA	ESTRELLA	TANNER
*Producción de materia seca en kg. MS ha ⁻¹ año ⁻¹	24000	28000	21000
*Parámetros nutricionales			
PC, %	8.5 y 14	9.8 y 12	11
EM, Mcal kg ⁻¹ MS	2.16 y 2.5	1.96 y 2.5	2.3
P, %	0.25 y 0.	0.3 y 0.35	0.35
K, %	2.27 y 3.5	1.8 y 3.5	3.7
(El primer valor es en época seca y el segundo en época húmeda)			
**Respuesta a diferentes tipos de suelos, %			
SFW	100	100	0
SIW	70	70	0
SFP	0	40	100
**Periodo de depredación de la pastura (años)	10	15	15
***Cantidad de semilla o material vegetativo.	4 kg. ha ⁻¹	0.06 m ⁻² (estolones)	0.06 m ⁻² (estolones)
***Mano de obra para la siembra (jornales ha ⁻¹)	3	4	4

* Análisis de laboratorio. **PASTOR: Bouman *et al*, 1998. ***Holmann y Estrada, 1997.

DESCRIPCIÓN CUANTITATIVA DE LOS INSUMOS REQUERIDOS POR LOS PASTs Y APSTs EN LA ZONA ATLANTICA DE COSTA RICA.

Todas la información de los anteriores archivos están relacionadas con otros archivos que contienen datos sobre las características propias de cada uno de los insumos: precios, duración o tiempo de depreciación y cantidades. Esta información le permite al modelo de maximización obtener los costos de cada uno de los insumos utilizados por el sistema de producción en cada unidad de tiempo (para nuestro caso un año). Por ello en la tabla 10 se dan a conocer todos los atributos de los insumos utilizados por las pasturas y por el hato de doble propósito.

Para algunos insumos su duración es cero, esto significa que es necesario comprarlo cada vez que se utiliza. Todos los datos fueron obtenidos a través de entrevistas en los almacenes veterinarios y personas que prestan los servicios en el municipio de Guápiles (provincia de Limón, Costa Rica). Todos los precios son de marzo a junio de 1998, momento en el cual el cambio del dólar se encuentra a 250 colones por 1 dólar.

En las actividades relacionadas con los PASTs, tanto en establecimiento como en mantenimiento se utilizan herbicidas. Para el cálculo de optimización, el modelo requiere información acerca de precios. En PASTOR, esta información se encuentra en un archivo especial llamado BIOCID:ATF. Para esto también fueron consultados los vendedores de insumos del municipio de Guápiles, al cual llegan principalmente los productores de la zona. La información se presenta en la tabla 11.

Tabla 7. Información sobre pasturas que son mejoradas sin fertilizante.

PARAMETRO	VALOR		
	ASOCIACION BRIZANTHA-MANI	PASTURA EN CALLEJONES	BANCO DE PROTEINA
*Producción en kg. de MS comestible ha ⁻¹ año ⁻¹ .	20000	24000; no existe esta con cercas muertas.	12000
*Parámetros nutricionales			
PC, %	12 y 15	12 y 15	22
EM, Mcal kg ⁻¹ MS	2.0 y 2.1	2.0 y 2.1	2 y 2.1
P, %	0.20	0.23 y 0.15	0.2
K, %	2.5	2.27	1.25
(El primer valor es en época seca y el segundo en época húmeda).			
**Respuesta a diferentes tipos de suelos, %			
SFW	100	100	100
SIW	60	70	60
SFP	0	0	0
**Fijación de Nitrógeno según el tipo de suelo, kg. de N ha ⁻¹ año ⁻¹			
SFW	150	160	150
SIW	100	100	100
***Periodo de depredación de la pastura (años)	10	10	10
***Cantidad de semilla o material vegetativo (kg ha ⁻¹)	0.06 m ⁻² de <i>A. pintoi</i> y 3 kg. de semilla de <i>B. brizantha</i> .	1200 estacas de poró y 3 kg. de <i>B. brizantha</i> .	6667 estacas de poró
***Mano de obra para la siembra (jornales ha ⁻¹)	10	9	10

* Russo, 1984; Rodríguez, 1985; Benavides, 1993; Romero *et al*, 1993; Ibrahim, 1994; Ibrahim *et al*, 1997; Abarca, 1998 (datos sin publicar).

** Fassbender, 1993; Ibrahim, 1994; Ibrahim *et al*, 1997; Abarca, 1998 (datos sin publicar); PASTOR: Bouman *et al*, 1998.

*** Holmann, *et al*, 1992; Joenje, 1996a; Joenje, 1996b; Jansen *et al*, 1997.

Tabla 8. Información sobre pasturas no mejoradas o naturales.

PARAMETRO	VALOR	OBS
Producción, kg. de MS ha ⁻¹ año ⁻¹ .	13000	Mediciones de campo.
Parámetros nutricionales		
PC, %	9.0 y 10.0	Laboratorio.
EM, Mcal kg ⁻¹ MS	1.0 y 2.1	
P, %	0.15 y 0.23	
K, %	2.5 y 1.5	
(El primer valor es en época seca y el segundo en época húmeda)		
Respuesta a diferentes tipos de suelos, %		Pastor*
SFW	100	
SIW	80	
SFP	100	
Periodo de depredación de la pastura (años)	100	Pastor

PASTOR: Bouman, 1998.

Tabla 9. Información cuantificada sobre el pastoreo bajo plantaciones.

PARAMETRO	VALOR	OBS
Producción en kg. de MS ha ⁻¹ año ⁻¹ .	1500.	Mediciones de campo
Parámetros nutricionales		Datos propios
PC, %	9.0 y 10.0	
EM, Mcal Kg ⁻¹ MS	1.9 y 2.1	
P, %	0.15 y 0.23	
K, %	2.5 y 1.5	
(El primer valor es en época seca y el segundo en época húmeda)		
Respuesta a diferentes tipos de suelos, %		Para el nivel de producción el suelo no es limitante.
SFW	100	Turno de la plantación.
SIW	100	
Periodo de depredación de la pastura (años)	25	Son espontáneos
Mano de obra para la siembra (jornales ha ⁻¹)	0	
Mano de obra para siembra de la plantación, jornales ha ⁻¹	90	Revisión bibliográfica
Herbicidas de establecimiento, l	6	Revisión bibliográfica
Fertilizante en tres primeros años, kg.	162	Revisión bibliográfica
Arboles para plantar, No	1309	Revisión bibliográfica
Producción de madera según suelo (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	10 y 8	Revisión bibliográfica*

* Keogh, 1987; Gómez y Reiche, 1996; Chavarria *et al*, 1997; Floors, 1997; Holmann y Estrada, 1997.

Tabla 10. Características de los insumos utilizados por el hato de doble propósito y por los diferentes sistemas de pasturas.

PARAMETRO	UNIDAD	PRECIO (colones)	DURACION (años)
Tractor entre 40-100 HP	Hora	4000	Variable
Bomba de fumigar	Hora	6	0
Fertilizantes- N	kg.	110	0
Fertilizantes-P ₂ O ₃	kg.	143	0
Fertilizantes-K	kg.	134	0
Doramectina	ml	143	0
Parasitocida oral	ml	15	0
Antiparasitario externo	l	20800	0
Bacterina triple	ml	13	0
Vacuna de brucelosis	dosis	386	8
Oxitetraciclina (antibiótico)	ml	16	0
Antimastíticos	dosis	553	0
Cloro para el lavado de ubres	ml	0.115	0
Yodo para lavado de equipos	ml	0.8	0
Palpación	unidad	400	0
Estolones de pasto estrella	ha	8750	15
Estolones de pasto tanner	ha	8750	10
Estolones de maní forrajero	ha	15625	10
Semilla sexual de brizantha	kg.	7400	10
Postes vivos de poró	unidad	10	10
Postes muertos para cercas	unidad	800	6
Alambre de púas	m	13	6
Grapas	kg.	250	6
Herramientas pequeñas	unidad	600	0
Herramientas medianas	unidad	1000	3
Herramientas grandes	unidad	2000	5
Corral para doble propósito	unidad	1500000	20
Equipo de ordeño y tarros	unidad	600000	10
Arboles de teca en vivero	unidad	25	25

Tabla 11. Información relacionada con los herbicidas utilizados por los productores en la Zona Atlántica de Costa Rica.

PRODUCTO	NOMBRE COMERCIAL	CODIGO SEVERIDAD	DURACION (DÍAS)	PRECIO (colones)
Picloram +metasulfuron	Combo	II	0.61	2912/ envase
Paraquat	Gramoxone	II	700	1390/1
Glyphosato	Round-up	V	12	2420/1
Picloram + 2,4-D	Tordon-101	V	0.61	2800/1
Chlorpyrifos	Lorsban	II	0.32	3000/1

INFORMACION REFERENTE A LOS FASTs

Para completar los requerimientos de los animales, el sistema PASTOR tiene la posibilidad de utilizar diferentes suplementos. La cantidad y tipo de suplementos dependen de las necesidades de los usuarios. Para ello es necesario que se le provea información referente a su calidad en términos concentración en la materia seca de proteína cruda (PC), fósforo (P), potasio (K) y energía metabolizable (EM); también información referente a los costos del insumo en la finca o en el momento de suministrar a los animales y consumo de mano de obra en el suministro del alimento a los animales. Esta información fue recopilada de la base de datos de REPOSA y se actualizaron los precios con entrevistas en fincas y en centros de insumos.

En esta investigación se le ofreció al modelo los suplementos más comúnmente usados en la Zona Atlántica de Costa Rica. La información referente a los FASTs se presenta en la tabla 12.

Tabla 12. Información cuantificada de los suplementos comúnmente utilizados en la Zona Atlántica de Costa Rica.

NOMBRE SUPLEMENTO	MS %	PC %	P %	K %	EM Mcal Kg MS ⁻¹	PRECIO Colones	MANO DE OBRA horas kg. de MS ⁻¹
Melaza	77	9.6	0.06	2.5	2.7	45.45	0.01
Banano de rechazo	17	4.5	0.1	2.82	2.4	41	0.003
Gallinaza engorde	87	15	0.8	0.	1.63	75.5	0.007
Sal de mar	100	0	0.	0	0.	21.5	0.001
Minerales	100	0	18	0	0	254.4	0.0
Sal mineral	100	0	8	0	0	61	0

BIBLIOGRAFIA

- CATIE. 1987. Agricultural research programme in the Atlantic Zone of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 16 p. (Atlantic Zone Programme Paper no 2)
- BENAVIDES, J. 1993. Utilización del poró (*Erythrina sp*) en sistemas agroforestales con rumiantes menores. In *Erythrina in the New and Old Worlds.* Eds: S. Westley; M. Powell. Hawaii, USA, Nitrogen fixing tree research reports. p. 237-249. (Special Issue).
- BOUMAN, B. A. M.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H. 1998a. PASTOR: A technical coefficient generator for pasture and livestock systems in the humid tropics, version 2.0. A user's guide. Guápiles, Costa Rica, REPOSA. 59 p.
- _____; NIEUWENHUYSE, A. 1998. Exploring sustainable beef cattle farming options in the humid tropics; a case study for the Atlantic Zone of Costa Rica. In International Seminar on Agrarian Policies: 'A Decision Making Opportunity' (1998, Heredia, Costa Rica). Pre-proceedings. Heredia, Universidad Nacional. 23 p.
- CHAVARRIA, M. I. *et al.* 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto MADELEÑA en Costa Rica. Ed: L. Ugalde. Turrialba, Costa Rica CATIE/DGF-MIRENEM. 162 p.
- FASSBENDER, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2 ed.. Turrialba, Costa Rica, CATIE/GTZ. 530 p.
- FLOORS, A. 1997. Plantations forestry in Guanacaste, Costa Rica. A LUST description of plantation forestry (teak and melina) in Guanacaste, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 28 p. (Field Report No 121).
- FRENCH, J. B. 1994. Current status and trends in animal agriculture in Central America. In Animal agriculture and natural resources in Central America: strategies for sustainability. Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 9-22.
- GOMEZ, M.; REICHE, C. 1997. Costos de establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Costa Rica. CATIE/GTZ/IICA. 49 p.
- HILLIER, P. B. R.; LIEBEZMAN, G. J. 1986. Introduction to operations research. 4^a ed. Holden Day., EE.UU. 887 p.
- HOLMANN, F.; ESTRADA, R. D.; ROMERO, F.; VILLEGAS, L. E. 1992a. Technology adoption and competitiveness in small milk producing farms in Costa Rica; 1. a case of study [en línea]. Journal Livestock Research for Rural Development. 4 (1): Disponible en <http://www.cipav.org.co>

- _____ ; ROMERO, F.; MONTENEGRO, J.; CHANA, C.; OVIEDO, E.; BAÑOS, A. 1992b. Rentabilidad de sistemas silvopastoriles con pequeños productores de leche en Costa Rica: Primera aproximación. *Revista Turrialba*. 42 (1): 79-89.
- _____ ; ESTRADA, R. D. 1997. Alternativas agropecuarias en la región Pacífico Central de Costa Rica: Un modelo de simulación aplicable a sistemas de doble propósito. *In* Conceptos y metodologías de investigación en fincas con sistemas de producción animal de doble propósito. Eds. C. Lascano; F. Holmann. Cali, Colombia, CIAT/CONSORCIO TROPILECHE. p.: 134-152.
- IBRAHIM, M.; BOTERO, J. A.; CAMERO, A. 1997. Pastura en callejones. ¿Cómo hacerlo?. *Revista Agroforestería en las Américas*. 4 (15): 23-25.
- _____. 1994. Productivity, persistence and compatibility of grass-legume mixtures for sustainable animal production in the Atlantic Zone of Costa Rica. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Wageningen Agricultural University. 129 p.
- JANSEN, H.; NIEUWENHUYSE, A.; IBRAHIM, M.; ABARCA, S. 1997. Evaluación económica de la incorporación de leguminosas en pasturas mejoradas, comparada con sistemas tradicionales de alimentación en la Zona Atlántica de Costa Rica. *Revista Agroforestería en las Américas*. 4 (15): 9-13
- JOENJE, M. 1996a. A cost-benefit analysis for the establishment of mixed pastures with and without two species of legume trees, in the humid tropical of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 51 p. (Field Report No 100).
- _____. 1996b. Adoption of improved pastures technologies in the Atlantic Zone of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 37 p. (Field Report No 103).
- KAIMOWITZ, D. 1996. Livestock and deforestation Central America in the 1980s: A policy perspective. Jakarta, Indonesia. Center for International Forestry research. 88 p.
- KEOGH, R. M. 1987. The care and management of teak (*Tectona grandis* L. f) plantations. A practical field guide for foresters in the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 48 p.
- LEITE, P. R.; BELLIDO, M. M.; PACA, F. R.; SANTOS, E. S.; MIRANDA, L.; ROMEO, F.; SOARES DOS SANTOS, E. 1986. Factors affecting gestation length and calving interval in Gir cows in north-east Brazil. *Pesquisa agropecuaria Brasileira*. 21(1): 87-92.
- MONTENEGRO, J.; ABARCA, S. 1998. La ganadería en Costa Rica: Tendencias y proyecciones, 1984-2005. San José, C.R., Ministerio de Agricultura y Ganadería. 70p.

- LEEUWEN, A. C. J. VAN; HOFSTEDE, A. M.** 1995. Forest, trees and farming in the Atlantic Zone of Costa Rica. An evaluation of the current and future integration of trees and forest in farming systems in the Atlantic Zone of the Costa Rica. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico no 257. 48 p.
- MONTONI, D.; VERDE, O.; ROJAS, G.; ARRIOJAS DE CARETON, M. Y SILVA, J.** 1990. Production of Brahman herd in the moist tropics of a Tachira State, Venezuela. I. Duration of gestation. VI Congreso Venezolano de Zootecnia. San Cristobal. GR-19.
- MORALES, J. L.** 1992. Distribución del pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en las tierras de pastoreo de Costa Rica. In Seminario Taller El Pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en Costa Rica, Alternativa o Problemática en Nuestra Ganadería? (1992, San Carlos, Costa Rica). San José, Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. P. 1-10.
- NICHOLSON, C. F.; LEE, D. R.; BOISVERT, R. N.** 1994. An optimization model of the dual purpose cattle production system in the humid lowlands of Venezuela. Agricultural Systems. 46: 311-334.
- PAZ, N.** 1996. Optimización de sistemas de producción animal de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 132 p.
- PELEGRINO, F.** 1986. Reproductive performance of breeding cows in mountainous a region of Granma Province. 1. Gestation length. Ciencias de la agricultura. 28: 110-118.
- PIJNEBURG, T. ; MARTINEZ, P.** 1992. PRODES, Nueva Guinea, Diagnóstico socio-económico: documento No 1. Nueva Guinea. Programa de Cooperación técnica Nicaragüense - Holandés. 30 p.
- PORTE, I.; MANSILLA, M. A.; CASTRO, M.; COQUELET, M. P.** 1985. Gestation length and age distribution of cows at different parting in a hereford herd. Avances en Producción Animal. 10 (1): 145-153.
- RODRIGUEZ, R.** 1985. Producción de biomasa de poró gigante (*Erythrina poeppigiana* (Walpers), O, F, COOK) y king grass (*Pennisetum purpureum X Pennisetum typhoides*) intercaladas en función de la densidad de siembra y frecuencia de poda del poró. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE 96 p.
- ROMERO, F.; CHANA, C.; MONTENEGRO, J; SANCHEZ, L. A.; GUEVARA, G.** 1991. Productividad de *Gliricidia sepium* y *Erythrina berterona* en cercas vivas manejadas bajo tres frecuencias de poda en la Zona Atlántica de Costa Rica. Revista Agroforestería. (5): 4.
- ROMERO, F.; MONTENEGRO, J.; CHANA, C.; PEZO, D.; BOREL, R.** 1993. Cercas vivas y bancos de proteína manejados para la producción de biomasa comestible en el trópico húmedo de Costa Rica.. In *Erythrina* in the New and Old Worlds.. Eds: S. Westley; M. Powell. Hawaii, USA, Nitrogen fixing tree research reports p. 237-249. (Especial Issue)

RUSSO, R. O. 1984. Studies on *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook, a versatile tree in Costa Rican farms. Ph. D. Thesis, New Orleans, Louisiana, EE. UU., University of New Orleans. 145 p.

STOORVOGEL, J. J. 1995. Linking GIS and models: Structure and operationalisation for a Costa Rica case study. Netherlands Journal of Agricultural Science. 43: 19-30.

CAPITULO III

EXPLORACION DE OPCIONES SILVOPASTORILES PARA LA SOSTENIBILIDAD ECONOMICA DE LA GANADERIA DE DOBLE PROPOSITO EN EL TROPICO HUMEDO

Palabras Claves: Bancos forrajeros, árboles en líneas, cercas vivas, pasturas degradadas, programación lineal, trópico húmedo, pasturas mejoradas, maximización, economía, rentabilidad.

INTRODUCCION

En Latinoamérica, la expansión de la ganadería está fuertemente asociada con la deforestación. El más importante cambio en el uso de la tierra en los últimos treinta años ha sido la conversión de bosques en pasturas, y se considera que entre 1981 y 1990 se perdieron 75 millones de hectáreas de bosques. Una parte importante de esta área fue utilizada para la ganadería extensiva (FAO, 1993). En Costa Rica entre 1950 y 1990, se deforestaron 1.3 millones de hectáreas, que fueron convertidas plenamente en pasturas (Sader y Joyce, 1988). Se considera que una de las razones para que esto ocurra es el bajo cambio tecnológico en el manejo de la ganadería, lo cual favorece los sistemas de explotación extensivos (Serrão y Toledo, 1992). Sin embargo, el aumento de la población y las fuerzas del mercado de la carne principalmente, han hecho que la población ganadera haya pasado de 0.6 a 1.7 millones de cabezas entre 1950 y 1992 en Costa Rica (Kaimowitz, 1996). Para esta época, se implementaron políticas por parte del estado para favorecer la ganadería, por ejemplo: tasas de interés nominal más baja que las tasas de interés real y créditos de capital disponibles solo para el sector de la ganadería, lo cual motivó a los productores a producir carne y leche (Kaimowitz, 1996).

La degradación de las pasturas es el problema básico de la falta de sostenibilidad en los sistemas de producción animal en los trópicos (Toledo, 1994). La falta de implementar tecnologías adecuadas en el manejo de especies forrajeras (gramíneas) exigentes principalmente en nutrientes, ha conllevado a que en estos terrenos desarrollen pasturas degradadas (Toledo y Serrão, 1984).

Una pastura degradada se define como una área utilizada en ganadería generalmente con una cobertura de gramíneas o ciperáceas, con grados de enmalezamiento, de compactación del suelo y de erosión tales, que su productividad biológica y económica es inadecuada. En este marco general, este tipo de terrenos no responden en productividad, a las prácticas de manejo normales, para la especie principal de la pradera (Argel, 1992). La degradación se define como un cambio negativo en la condición de la pastura, o en forma más simple como un descenso en la calidad de la pastura. La calidad o la condición de la pastura es la suma de varios parámetros, tales como, composición botánica, reducción de la cobertura vegetal, disminución de la fertilidad del suelo, pérdida de especies deseables y aparición de especies indeseables con relación a un óptimo económico o ambiental. (Mannetje e Ibrahim, 1989). El parámetro más importante en la degradación de la pastura es su pérdida o disminución en su productividad biológica.

En las zonas húmedas tropicales, como la Zona Atlántica de Costa Rica, con la degradación se obtiene un descenso gradual en la capacidad de carga de la pastura. Mientras en los primeros años de establecimiento de la pastura un productor puede mantener un animal en cada hectárea, después de cinco o siete años, él necesitará dos o tres hectáreas para mantener el mismo animal. Esto es debido a que el período de recuperación de la especie forrajera se aumenta de 45-55 días a 90 días, además a que ocurre un descenso en la cantidad de forraje producido por unidad de área como consecuencia de la menor cantidad de plantas que existen (Heckadon, 1984; Hordward, 1988). Se puede llegar a una reducción del 65% de la capacidad de carga cuando se pasa de una pastura de buena calidad a una pastura en estado avanzado de degradación, proceso que ocurre en el transcurso de 10 años (Hordward, 1988).

En Costa Rica, durante la década de los ochenta ha sucedido una rápida expansión del *Ischaemun ciliare*, comúnmente llamado Ratana, a expensas de pasturas más productivas. Esta especie tiene un limitado valor nutricional y es la principal responsable de un marcado descenso de la producción de leche por hectárea en la Zona Atlántica de Costa Rica (Holmann *et al*, 1992a; Morales, 1992; Pijenburg y Martínez, 1992).

La Zona Atlántica de Costa Rica, durante los últimos cuarenta años, ha sido deforestada y el uso de la tierra ha cambiado rápidamente; actualmente predomina el uso en pasturas

extensivas, que ocupaban para 1992, 200000 ha; los cultivos anuales y perennes (maíz, yuca, palmito y ñame) ocupaban 15000 ha, el banano ocupaba para 1992, 40342 ha de suelos fértiles bien drenados principalmente (CATIE, 1987; Huising, 1993; Leeuwen y Hofstede, 1995; Bouman y Nieuwenhuys, 1998).

Una opción biológicamente viable para el manejo sostenible de la ganadería en estos terrenos, son los sistemas silvopastoriles, de los cuales se ha realizado mayor investigación en los últimos años han sido principalmente los bancos forrajeros, el pastoreo bajo plantaciones forestales, los árboles dispersos en potreros, las cercas vivas con especies de valor nutritivo y las pasturas en callejones. Para definir cual de los posibles sistemas silvopastoriles es el más adecuado para la recuperación de pasturas degradadas, se hace necesario definir, para cada uno de estos, cuales son sus potencialidades económicas y sus limitaciones de implementación. Con esta información se podrá determinar para una situación específica, cual es la opción económicamente factible para la producción ganadera con base en pasturas.

En Costa Rica a partir de la década de los ochenta, las políticas proteccionistas asociado con un incremento del 221% en el precio interno nominal de la leche; hacen más atractiva la producción de leche que la de carne (Kaimowitz, 1996; Montenegro y Abarca, 1998). El número de hembras bajo el sistema de doble propósito paso de representar el 14.5% en 1982 a ser el 24.7% de las hembras totales del país en 1988; al contrario en el mismo periodo de tiempo la hembras de carne pasaron del 68.7 al 56.7% del hato hembra nacional y en el número de hembras de lechería especializada se produjo un aumento del 2% para el mismo periodo (French, 1994). Estos datos muestran la importancia que adquiere la producción de leche en el país y principalmente con base en sistemas de doble propósito. En las zonas húmedas tropicales es difícil producir leche con razas especializadas debido a problemas de adaptación de los animales; por ello se utilizan sistemas de doble propósito en los cuales se combinan características productivas de razas adaptadas a las condiciones ambientales (principalmente *Bos indicus*) con razas con alto potencial de producción (por ejemplo: Holstein, Jersey, Pardo suizo, etc.), logrando niveles adecuados de producción. En este sistema, además de la extracción de la leche, se producen terneros que generalmente son vendidos a otros productores para su engorde.

Un gran porcentaje del ganado en Centro América está siendo explotado bajo el sistema de producción del doble propósito; esto debido a que la leche genera utilidades y proporciona flujo constante de caja para el funcionamiento de la empresa o de la finca (Kaimowitz, 1996).

Es relevante conocer el comportamiento de los diferentes escenarios de uso de la tierra desde el punto de vista biofísico y socioeconómico, que permita decidir en un momento determinado, cual es la opción de producción más adecuada. Es necesario comparar ganadería con silvopastoreo vs ganadería con las pasturas tradicionales.

La programación lineal es una rama de las matemáticas desarrollada para solucionar problemas complejos sobre el uso, asignación y distribución de recursos con restricciones. Para ello es necesario que los sistemas sean descritos en forma cuantitativa (Hillier y Liebezman, 1986). Durante la última década un gran número de modelos de simulación han sido desarrollados, para describir y simular los procesos agro-ecológicos a diferentes niveles de detalle (Nicholson *et al*, 1994; Paz, 1996; Bouman *et al*, 1988a; Bouman *et al*, 1988b). Un modelo es una relación formal entre el ingreso de parámetros externos y la salida de parámetros internos (Stoorvogel, 1995). Los modelos de programación lineal pueden ser usados para analizar diferentes escenarios de usos de la tierra, con lo cual se genera información para la planificación del uso de espacios en forma óptima desde el punto de vista económico y de la sostenibilidad.

La estructura de los modelos de optimización permiten cuantificar el intercambio entre los componentes y las restricciones, seleccionar la mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios y mostrar cuanto se puede pagar por una unidad adicional de un recurso que se agota. En esta investigación se identifican opciones silvopastoriles biológicamente viables que permitan reemplazar las pasturas degradadas que se han desarrollado en la Zona Atlántica de Costa Rica y permitirá identificar restricciones de tipo biofísico y socioeconómico para cada una de las alternativas.

MATERIALES Y METODOS

La investigación fue realizada con información referente al trópico húmedo de Costa Rica, fundamentalmente en la vertiente del Océano Atlántico. La región tiene una elevación sobre el nivel del mar de 0-200 m, con una pluviosidad que varía entre 3000 y 6000 mm/año y una temperatura promedio de 26 °C con una variación máxima de 2°C y humedad relativa de 85-90%. Los meses menos húmedos están entre diciembre y abril, sin embargo, en todos los meses del año existe un superávit de agua, es decir, el balance hídrico es positivo para las plantas (Bouman y Nieuwenhuys, 1998).

Los suelos de la Zona Atlántica, en general se dividen en tres clases principales: 1. Suelos jóvenes aluviales, volcánicos, bien drenados, con una relativa alta fertilidad (Inceptisoles y Andosoles) encontrados solamente en algunas áreas planas. Son desarrollados de depósitos aluviales jóvenes del holoceno (SFW); 2. Suelos relativamente viejos, bien drenados, desarrollados del pleistoceno a partir de sedimentos con una relativa baja fertilidad, con pendientes entre el 10 y el 20% principalmente Oxisoles e Inceptisoles (SIW); 3. Suelos jóvenes, volcánicos, pobremente drenados del grupo aquico y con una relativa alta fertilidad, solo en regiones planas, generalmente de los géneros Entisoles e Inceptisoles (SFP) (Nieuwenhuys, 1996).

En el presente trabajo se hacen análisis de posibles escenarios de producción animal a nivel de finca que sean alternativos a la producción sobre pasturas degradadas que ocurre actualmente. Se desarrolla un modelo determinístico en programación lineal que permita explorar alternativas sostenibles de sistemas de producción de doble propósito (**APTSs: Animal Production System at a defined Technology**). Los sistemas de producción animal en el modelo, obtienen sus nutrientes de diferentes opciones de pasturas (**PASTs: PASTure production Systems at a defined Technology**), los cuales se muestran en la tabla 13. Para completar la cantidad de nutrientes requerida por cada uno de los sistemas de producción animal, se tendrá en cuenta la suplementación (**FAST: Feed Aquisition System at a defined Technology**), los cuales se muestran en la tabla 13.

La función objetivo maximiza el total de entradas económicas, obteniendo esta cifra de la resta entre el valor de los productos menos los costos de los insumos y el costo de la mano de obra requerida en las diferentes actividades de los procesos productivos.

Tabla 13. Opciones para producir nutrientes necesarios para el sistema de producción animal.

PASTs				FASTs
PASTOS NATURALES	PASTURAS MEJORADAS		SISTEMAS SILVO-PASTORILES*	
	MEJORADAS FERTILIZADAS	SIN FERTILIZAR	SIN FERTILIZAR	
Ratana, principal (N-M)	<i>Brachiaria brizantha</i> (Bb)	Asociación <i>B brizantha</i> - <i>Arachis pintoi</i> (Bb-Ap)	Banco de proteína de <i>Erythrina berteroana</i> (B)	Banano verde de rechazo
<i>Axonopus sp.</i> (N-M)	<i>Cynodon nlemfuensis</i> (E)	<i>Brachiaria brizantha</i> (Bb)	Pastoreo bajo plantaciones de <i>Tectona grandis</i> (P)	Melaza
<i>Paspalum conjugatum</i> (N-M)	<i>Brachiaria radicans</i> (T)	<i>Cynodon nlemfuensis</i> (E) <i>Brachiaria radicans</i> (tanner) (T)	Pastura en callejones de <i>Erythrina berteroana</i> con <i>B. brizantha</i> (C)	Gallinaza

*Todos los PASTs se usan con cercas vivas y con cercas muertas. Las cercas muertas pueden ser de dos tipo: 1. *Erythrina berteroana* o 2. *Erythrina berteroana* con árboles de teca (sus siglas serán: N-PT, E-PT, BbAp-PT, B-PT). Excepto tanner, el cual por el tipo de suelo es inadecuado para plantar teca.

Toda la información base de los sistemas de pasturas, del hato y de los suplementos se encuentra en el capítulo I. En el presente caso, se modelará una finca de 70 ha (resultados encontrados con entrevistas) con un 43% de SFW, 43% de SIW y 14% de SFP ((Bouman y Nieuwenhuyse, 1998).

La función objetivo de este trabajo de investigación está dada por una maximización de los ingresos netos del productor en el modelo. Esta función se puede describir de la siguiente

$$\text{Max } Z = \sum_{j,h} y_j A_h P_j - \sum_h c_h A_h - \sum_h l_h A_h w - \sum_{s,p,r} c_{spr} P_{spr} - \sum_{s,p,r} l_{spr} P_{spr} w - \sum_f c_f F_f - \sum_{f,m} l_f F_{fm} w \quad (\text{eq.1})$$

$$- \sum_{s,p,r} n_{sprm} P_{spr} - \sum_f n_{fm} F_{fm} + \sum_h n_{ham} A_h \leq 0 \quad \forall n, m \quad (\text{eq. 2})$$

$$\sum_{s,p,r} sr_{spr} P_{spr} - \sum_h h_h A_h = 0 \quad (\text{eq.3})$$

$$\sum_{p,r} P_{spr} \leq s_s \quad \forall s \quad (\text{eq.4})$$

$$- \sum_{s,p,r} d_{spr\delta} A_{spr} \leq 0 \quad \forall \delta \quad (\text{eq.5})$$

$$h \sum l_h A_h + \sum_{s,p,r} l_{spr} P_{spr} + \sum_{f,m} l_f F_{fm} \geq 0 \quad (\text{eq 6})$$

Eq 1: La función objetivo, o función de maximización, es igual a la sumatoria del precio de los productos multiplicada por la cantidad de cada uno de los productos, menos: los costos por los insumos del hato, costos de mano de obra del hato, el valor de los insumos para un sistema de pasturas multiplicado por el número de hectáreas en esa pastura, mano de obra requerida por cada uno de los sistemas de pasturas, costos debidos a los suplementos y valor de la mano de obra requerida para suministrar los suplementos.

Eq 2: La sumatoria de la cantidad de nutrientes aportados por las pasturas más los nutrientes aportados por los suplementos deben ser mayores o iguales a los nutrientes requeridos por los animales en el sistema.

Eq 3: La sumatoria de la capacidad de carga de cada uno de los sistemas de pasturas o sistemas silvopastoriles multiplicado por el número de ha en ese sistema debe ser mayor o igual al número de unidades animales del sistema de producción animal.

Eq 4: La sumatoria de cantidad de suelos con un sistema de pasturas o un sistema silvopastoril sembrado no debe ser mayor a la cantidad de tierra o suelo disponible en un momento determinado.

Eq 5: La sumatoria de la cantidad de nutrientes que aportan las pasturas más los nutrientes que aportan los suplementos, debe ser mayor o igual a la cantidad de nutrientes requeridos por el hato.

Eq 6 La sumatoria de la mano de obra necesaria para el manejo del hato más la mano de obra requerida para el establecimiento y manejo de los sistemas de pasturas más la sumatoria de la mano de obra requerida para el suministro de suplementos debe ser menor o igual a la mano de obra disponible

Ver anexo 1.

PASTOR (**PAST**ure and livestock technical coefficients generat**OR**) genera gran parte de los coeficientes técnicos que son necesarios para desarrollar el modelo de maximización. Este es un programa diseñado en Fortran77, que permite mediante ecuaciones, obtener todos los coeficientes técnicos de sistemas de producción bovina de carne en el trópico húmedo y que son utilizados en modelos de programación lineal para explorar y optimizar sistemas de uso de la tierra. Los coeficientes técnicos son entradas y salidas cuantificadas del sistema de producción (Bouman *et al*, 1998a).

El sistema de ganadería de carne consiste de tres componentes: 1). El hato que genera productos para la venta como carne y leche y que tiene requerimientos nutricionales (**APTSs: Animal Production System at a defined Technology**); 2). Pasturas para suplir los nutrimentos del hato y se relaciona con el crecimiento y manejo de pasturas (**PASTs: PASTure System a defined Technology**); y 3). Suplementos alimenticios que proveen una fuente adicional de alimento para los animales pero que provienen de lugares externos a la finca (**FASTs: Feed Animal Supplement a defined Technology**). Para ello PASTOR requiere información cuantificada que caracterice cada una de las partes del sistema (Bouman *et al*, 1998a; Bouman *et al*, 1998b).

En el presente trabajo se utiliza PASTOR para generar los coeficientes técnicos el doble propósito (APTS), nuevos PASTs, principalmente sistemas silvopastoriles y de algunos FASTs. La información necesaria para que el sistema PASTOR pueda generar los coeficientes fue obtenida a través de 50 entrevistas a productores de la Zona Atlántica de Costa Rica y a partir de fuentes secundarias, principalmente investigaciones realizadas en CATIE.

SOFTWARE

El modelo de programación lineal es desarrollado en GAMS 2.25 (Paquete para microcomputadoras desarrollado por el Banco Mundial en 1988) (Brooke *et al*, 1992). Todos los software corren en microcomputadoras bajo ambientes de D.O.S.

ESCENARIOS

Los escenarios corridos se desarrollan sobre una finca de 70 ha (promedio encontrado en las entrevistas en la zona), de las cuales el 43% es de SFW, el 43% es de SIW y el 14% es de SFP. Solo se modela la finca con sistema de doble propósito. El engorde y la cría sin ordeño han sido exploradas por otros autores (Bouman y Nieuwenhyse, 1998). El precio base de la leche es 60 colones/litro vendido en la finca; el precio de la carne de vacas adultas es de 210 colones/kg y el de ternero destete es de 260 colones/kg en la finca (precio de subasta menos los costos de transporte). El precio base de la madera es de 17500 colones el m³, vendiendo el árbol en pié (precio de la zona; se hace así para facilidad de cálculos, aunque los productores pueden obtener mayor beneficio con el aprovechamiento de la madera).

La finca cuenta con 25 jornales/mes (300 jornales/año) a un precio base de 2000 colones/jornal. Estos jornales son utilizados para las labores de manejo de los animales, la siembra y manejo de las pasturas y el suministro de suplementos.

Para cada uno de los productos se construyeron cinco escenarios. El escenario base que se corre con los precios actuales del mercado de los productos y de los insumos. Estos precios fueron obtenidos a través de las entrevistas en la Zona, en almacenes de venta de insumos y en la subasta ganadera de Guápiles. Con base en estos precios se obtuvieron los otros cuatro escenarios. Se disminuyó un 10 y un 25%, el precio de cada uno de los productos. Con estos escenarios se explora el uso de la tierra, cuando las condiciones del mercado son difíciles. Es decir, en estos escenarios se obtiene respuesta de una sostenibilidad económica de mediano plazo. El valor intermedio se utiliza para mostrar tendencia. Sobre el valor base, se construyen los dos escenarios faltantes que son un 10 y un 25% por encima del valor actual de los productos.

Se construyen escenarios sobre el precio de los suplementos hasta encontrar el precio en el cual es usado cada uno de los suplementos con los precios de mercado de los productos. Se corren escenarios para determinar el precio de la mano de obra en el cual se utiliza todo el recurso. También se corren escenarios de precios de mano de obra para determinar en cual momento el precio de la mano de obra no es limitante para utilizar toda la tierra. Estos escenarios ayudan a explicar el comportamiento económico de los otros escenarios.

No se hacen combinaciones de escenarios por que dificulta excesivamente el análisis del efecto de cada uno de los productos.

RESULTADOS

Se modelaron cuatro aspectos importantes en los sistemas de producción de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica: El precio de venta de la leche, el precio de venta de la carne, el precio de venta de la madera y el costo de la mano de obra. El precio de los suplementos fue considerado, pero solo para definir a que precio pueden ser utilizados por los productores en este momento en la zona (anexo 2)

De cada uno de los anteriores aspectos se parte de un modelo base, es decir, el precio que actualmente se está pagando por cada uno de los productos o por los insumos (mano de obra y suplementos). A partir de este modelo base se construyeron escenarios con aumentos y disminuciones del 10 y del 25% del precio en el escenario base. Se eligieron estos porcentajes porque es el rango en el cual se considera que pueden fluctuar los precios. El precio base de los productos fue obtenido en el proceso de entrevistas a los productores de la zona y en la subasta ganadera de Guápiles, Costa Rica.

Después de definir los precios elegidos para cada uno de los productos y de los insumos se cambian en el parámetro correspondiente en el modelo de maximización, en el software de programación lineal.

1. Efecto del precio de la leche.

En la tabla 14 se observa que en todos los escenarios de precios de leche evaluados por el modelo, la función objetivo fue positiva, es decir, en las condiciones dadas para el modelo, el sistema de doble propósito es una actividad que tiene ingresos positivos. Además aumentaron en forma lineal cuando el precio de la leche varió entre 45 y 75 colones.

Sin embargo, la cantidad de carne y leche producida solo aumento cuando el precio de la leche se incrementó en un 10 a 25% del precio del escenario base (60 colones l⁻¹). Por el contrario, no se notan efectos del precio de la leche sobre la cantidad de madera producida; esto es debido a que el área que se elige en plantaciones es muy baja y gran parte de la

madera producida proviene de las cercas vivas de las pasturas, lo cual se mantiene constante independiente del tipo de PAST que elija el modelo.

Tabla 14. Efecto del precio de la leche sobre los ingresos netos o función objetivo, los productos, el consumo de mano de obra y el precio sombra de algunos insumos.

PARAMETRO	ESCENARIOS (CAMBIOS EN EL PRECIO DE LA LECHE)				
	-25%*	-10%	BASE	+10%	+25%
Precio de la leche (colones/litro)	45	54	60	66	75
Función objetivo (miles de colones ha ⁻¹ año ⁻¹)	32.8	39.6	44.0	48.7	57.5
Cantidad de leche (kg. año ⁻¹)	52274	52274	52274	59801	73773
Cantidad de carne (kg. año ⁻¹)					
vacas	4040.84	4040.84	4040.8	4622.7	5702.7
terneros	3703.01	3703.01	3703.0	4236.2	5226.0
Volumen de madera (m ³ año ⁻¹)	140	140	140	130	140
mano de obra usada (jornales año ⁻¹)	110	140	140	157	195
Precios sombra					
tierra					
SFW	39085	46821	52048	57383	65117
SIW	34357	42093	47320	52655	60389
SFP	0	0	0	0	15622
mano de obra	0	0	0	0	0

*El porcentaje corresponde a la disminución o aumento en el precio base de cada producto.

*El precio base del producto es 60 colones l⁻¹, precio de junio de 1998 (tasa de cambio 1 dólar = 250 colones)

Aunque la actividad resultó en ingresos positivos en todos los escenarios, se encuentra que solo hay aumentos en la cantidad de leche producida cuando el precio pasa de 60 a 66 colones l⁻¹, datos que concuerdan con lo encontrado en la distribución de la tierra en los diferentes PASTs. En la figura 2 se nota que solo a partir de 66 colones en el precio de la leche se da un cambio en la forma de utilizar la tierra y se empieza a utilizar el SFP (8 ha) con N-M, cuando la leche valió 75 colones se utilizó todo el suelo disponible. A este

precio se presentan por primera vez pasturas mejoradas con altos insumos (tanner con cercas vivas de poró, fertilizantes y herbicidas) sobre los SFP, se elige N-PT en SFW y SIW, BbAp-PT en SFW (Tabla 18). Este último PASTs aumentó un 20%, cuando el precio pasó de 66 a 75 colones l⁻¹.

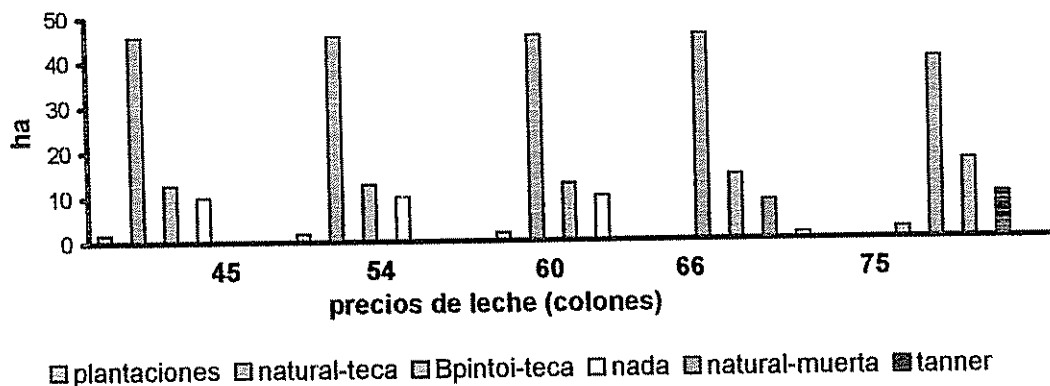


Figura 2. Efecto de la variación del precio de la leche sobre el uso de la tierra con pasturas (precio de la leche en junio de 1998).

2. Efecto del precio de la carne.

La cantidad de carne producida tiene un comportamiento muy similar al de la leche, por las características propias del sistema de doble propósito. En la tabla 15 se determina que el precio de la carne al igual que el precio de la leche, incrementaron el valor objetivo (beneficios), el consumo de mano de obra y la producción de carne y leche, sin embargo, el nivel fue menor. En las figuras 2 y 3 se observa que la distribución de los diferentes tipos de suelos es igual, con incrementos en el precio de la carne o de la leche. Solo en el máximo precio de los dos productos se encuentra que el modelo no elige plantaciones y se cambian por pasturas de naturales con cercas vivas de poró.

Los principales PASTs seleccionados fueron N-PT y BbAp-PT, los cuales representan el 64 y 21% de las 70 hectáreas que mide la finca modelada. El área bajo plantaciones siempre fue menor de 5 ha y solo dejó de ser una forma de uso de la tierra cuando la carne alcanzó un precio de 325 colones (25% del precio base); esta parte de suelo fue utilizada con N-PT (ver tabla 8).

El volumen de madera producido en la finca fue constante, excepto cuando el precio de la carne incrementó en un 25% sobre el precio base, escenario en el cual el volumen de madera producido disminuyó (130 m³) comparadas con precios menores de la carne (140 m³) (tabla 15). La variación del precio de la carne no tiene un efecto importante en el uso de la mano de obra que varió entre 140 y 161 jornales año⁻¹.

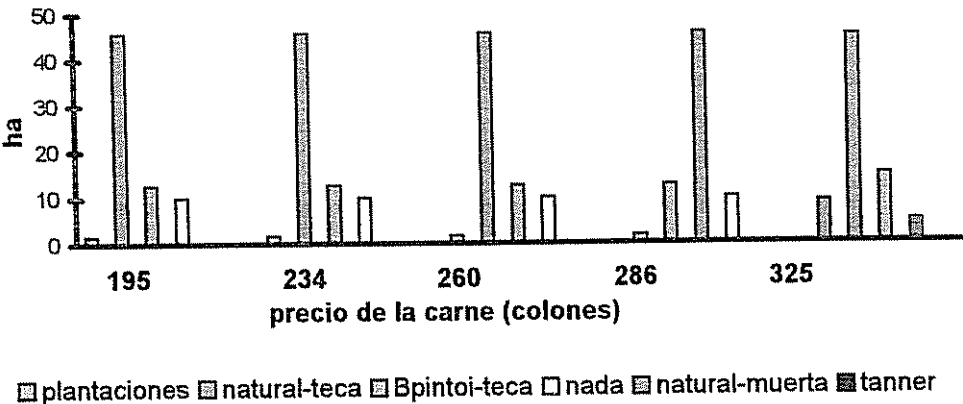


Figura 3. Efecto de la variación del precio de la carne sobre el uso de la tierra con pasturas (precio de la carne en junio de 1998)

3. Efecto del precio de la madera

El comportamiento de los escenarios en los cuales se incrementó el precio de la madera es contrario a los escenarios de precios de leche y carne. En la tabla 16 se puede observar que a medida que se aumenta el precio de la madera la cantidad de leche y de carne producida disminuye, al contrario la de madera aumenta. Aunque el beneficio neto obtenido cuando el precio de la madera es un 25% superior al precio base, es el mayor en todos los escenarios analizados el precio sombra de la mano de obra continua siendo cero al igual que el precio sombra de los SFP. Esto último debido a que en estos suelos no se puede

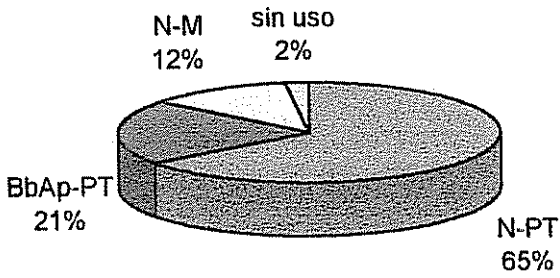
plantar teca como plantaciones ni como cerca viva. Al contrario, el precio sombra del SFW es el mayor en todos los escenarios analizados.

Tabla 15. Efecto del precio de la carne sobre los beneficios, los productos, el consumo de mano de obra y el precio sombra de algunos insumos.

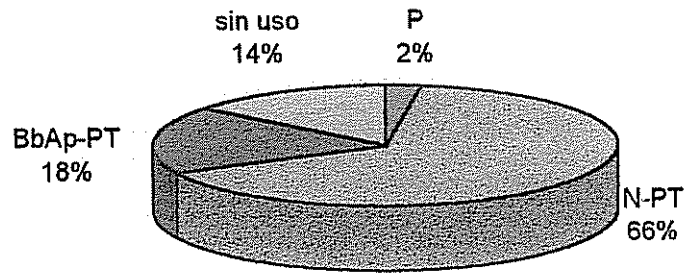
PARAMETRO	ESCENARIOS (CAMBIOS EN EL PRECIO DE LA CARNE)				
	-25%	-10%	BASE	+10%	+25
Precio de la carne de ternero (colones/kg.)	195	234	260	286	325
Precio de la carne de vaca (colones/kg.)	157.5	189	210	213	262.5
Función objetivo (miles de colones ha ⁻¹ año ⁻¹)	37.6	41.5	44.0	46.6	51.0
Cantidad de leche (kg. año ⁻¹)	52274	52274	52274	52274	62271
Cantidad de carne (kg. año ⁻¹)					
vacas	4040	4040	4040	4040	4813
terneros	3703	3703	3703	3703	4411
Volumen de madera (m ³ año ⁻¹)	140	140	140	140	130
Mano de obra usada (jornales año ⁻¹)	157	140	140	140	161
Precios sombra					
tierra					
SFW	44501	49030	52048	55067	59709
SIW	39773	44302	47320	50339	54981
SFP	0	0	0	0	2277
mano de obra	0	0	0	0	0

Cuando el precio de la madera estuvo un 10% o un 25% superior al precio base (17500 colones m⁻³), el área bajo plantaciones representó un 43% de la tierra utilizada comparada con un 2% del área cuando el precio fue menor. Con precios inferiores a 17500 colones m⁻³ de la madera, el principal PAST fue N-PT (66%) seguido de BbAp-PT (18%). Sin embargo, es importante anotar que BbAp-PT tuvo mayor importancia cuando el precio de la madera fue un 25% superior al precio base (ver tabla 18 y figura 4).

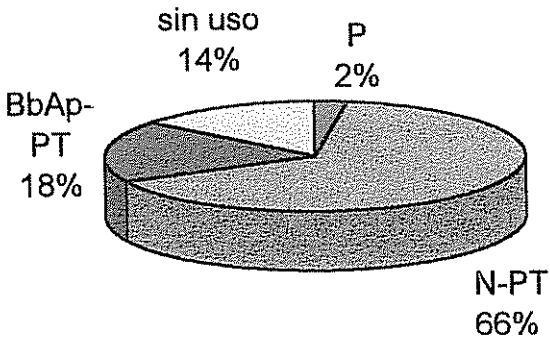
Precio de la madera de 13125



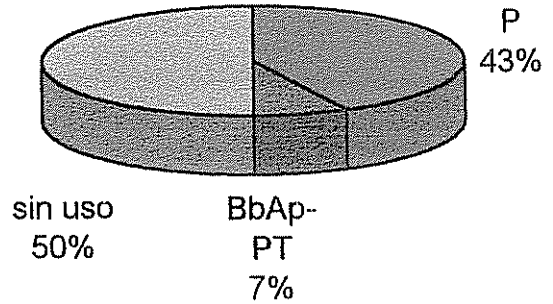
Precio de la madera de 15750



Precio de la madera de 17500



Precio de la madera de 19250



Precio de la madera de 21875

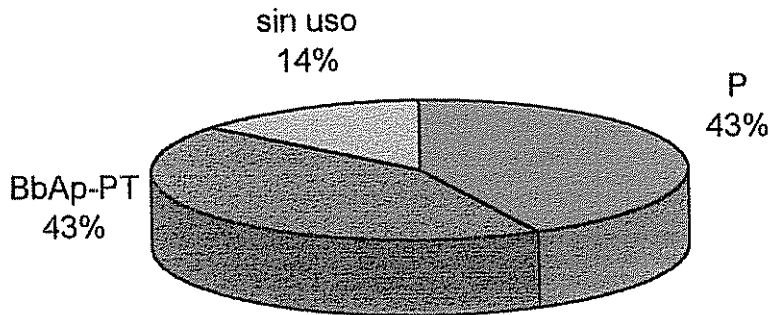


Figura 4. Distribución de la tierra en los diferentes PASTs, según el precio de la madera. (Precio en colones m⁻³; junio de 1988).

4. Análisis de la mano de obra.

En todos los escenarios corridos, se encuentra que el precio de la mano de obra es un limitante para la explotación de toda el área de la finca, ya que el precio relativo del insumo con relación la producto es bastante alto. Solo cuando se tiene un precio de la leche o de la carne 25% superior al precio base, el modelo utiliza todo el suelo. En estos dos escenarios resulta rentable utilizar el SFP para la producción. Al contrario, cuando este incremento sucede en el precio de la madera, este suelo queda sin uso ya que la teca no se adapta a estas condiciones ecológicas; por esta razón las 10 ha de SFP no son explotadas (figura 4).

Tabla 16. Efecto del precio de la madera sobre los beneficios, los productos, el consumo de mano de obra y el precio sombra de algunos insumos.

PARAMETRO	ESCENARIOS				
	-25%	-10%	BASE	+10%	+25%
Precio de la madera (colones/m ³)	13125	15750	17500	19250	21875
Función objetivo (miles de colones ha ⁻¹ año ⁻¹)	35.7	40.6	44.0	48.0	61.1
Cantidad de leche (kg. año ⁻¹)	59801	52274	52274	46377	43202
Cantidad de carne (kg. año ⁻¹)					
vacas	4622	4040	4040	3585	3339
terneros	4236	3703	3703	3285	3060
Volumen de madera (m ³ año ⁻¹)	140	140	140	140	163
Mano de obra usada (jornales año ⁻¹)	140	140	140	140	163
Precios sombra					
tierra	41778	47813	52048	60175	87083
SFW	37925	43435	47320	49989	54064
SIW	0	0	0	0	0
SFP	0	0	0	0	0
Mano de obra					

De lo anterior se desprende que el precio sombra de la mano de obra en todos los escenarios corridos fue siempre cero (ver tablas 14, 15 y 16). Con los modelos se encontró que es necesario rebajar el costo de la mano de obra a 1600 colones (6.4 dólares) para que sea utilizado toda el área de suelo, en aquellos escenarios en los cuales quedaron suelos sin uso (ver figura 5).

El hecho de que se aumenten el área bajo plantaciones no tiene un efecto importante sobre la mano de obra utilizada. La cantidad de jornales utilizados tiene un comportamiento similar a los escenarios de precios de carne y son inferiores a los utilizados cuando se aumenta el precio de la leche.

En la tabla 17 se nota que con el menor precio de la mano de obra se aumenta la cantidad de pasturas mejoradas en los SFW y SFP. En la tabla 18 se puede observar el efecto que tuvo la variación del precio de la mano de obra en la producción de la finca. Es importante resaltar que solo ocurre un aumento en la cantidad de producción cuando el precio del jornal es inferior a 1600 colones jornal⁻¹; esto como consecuencia de la utilización de toda el suelo (inclusive el SFP, el cual no es utilizado con valores de mano de obra superiores a 1600 colones) (tabla 17).

Tabla 17. Uso del suelo con pasturas para los escenarios en los cuales el precio de la mano de obra no es limitante.

PASTURAS	PRECIO DE LA MANO DE OBRA (COLONES)					
	1600			1400		
	SFW (ha)	SIW (ha)	SFP (ha)	SFW(ha)	SIW (ha)	SFP (ha)
N-PT	14.99	30	-	10.18	30	-
BbAp-PT	15.01	-	-	17.47	-	-
T-P	-	-	1.11	-	-	10
N-M	-	-	8.89	-	-	-
P	-	-	-	2.36	-	-

Tabla 18. Efecto del precio de la mano de obra sobre la producción de la finca.

PARAMETRO	ESCENARIOS Precios de la mano de obra en colones jornal ⁻¹					
	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Función objetivo (miles de colones ha ⁻¹ año ⁻¹)	53.9	49.3	45.9	42.60	39.3	36.3
Cantidad de leche (kg. año ⁻¹)	73848	62469	52326	52326	52326	52326
Cantidad de carne (kg. año ⁻¹)						
vacas	5703	4824	4041	4041	4041	4041
terneros	5228	4423	3705	3705	3705	3705
Volumen de madera (m ³ año ⁻¹)	148	126	139	139	139	139
mano de obra usada (jornales año ⁻¹)	195	163	140	140	140	140
Precios sombra						
tierra						
SFW	63448	59665	55835	52028	48222	44415
SIW	58852	55025	51151	47300	43450	39599
SFP	10169	1278	0	0	0	0
mano de obra	0	0	0	0	0	0

Como consecuencia de lo anterior, cuando el precio del jornal es igual o menor a 1600 colones, aparece precio sombra del SFP, sin embargo, es un valor muy bajo y lejano del precio sombra de los otros dos tipos de suelos. El precio sombra de todos los tipos de suelos disminuye como consecuencia del aumento en el dinero que hay que pagar por la mano de obra, al igual que los beneficios. A partir de los 1800 colones, el uso de los suelos no varía y se usan las mismas pasturas que en los escenarios bases de leche o carne (tabla 18).

En la figura 5 se pueden observar las relaciones existentes entre el incremento en los precios de los productos y el beneficio. Es claro que la relación del precio de los tres productos es lineal, sin embargo, se ve en las ecuaciones que la pendiente de la recta del precio de leche es mucho mayor que el de los otros dos.

De lo anterior se desprende que es mucho mayor el efecto del incremento en el precio de la leche que los otros dos productos sobre el beneficio total

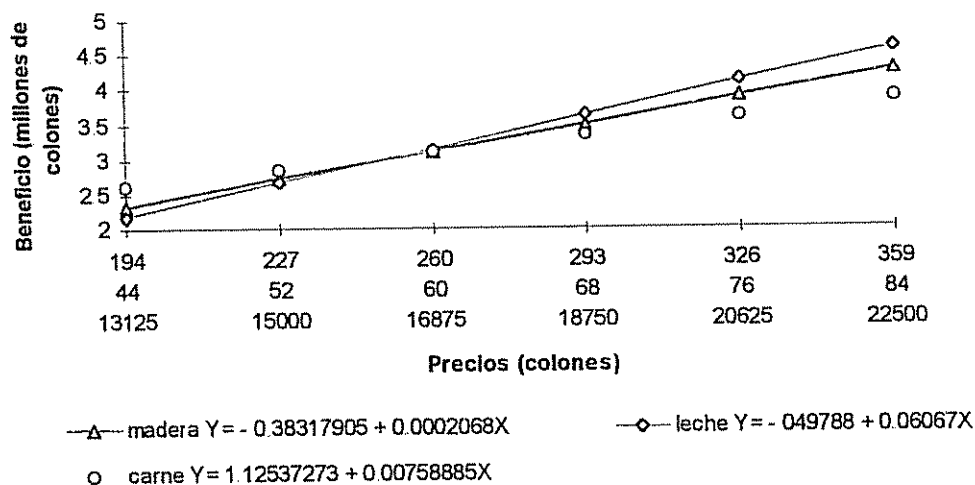


Figura 5. Relación entre los precios de los productos y el beneficio

Los resultados encontrados con el modelo sobre los PASTs coinciden con lo encontrado en la zona en la cual la mayoría de suelos dedicados a ganadería se encuentran bajo ratana con cercas vivas de poró (tabla 19). Sin embargo en la zona utilizan cantidades importantes de suplementos como banano, melaza, minerales y concentrado. En los escenarios analizados, el modelo solo elige concentrado de 16% de proteína cruda (con base en gallinaza), cuando la maderá tiene un precio superior al 10% del precio base, es decir, 19250 colones m^{-3} . En este caso el modelo indica suplementar con 1.86 Kg de concentrado $UA^{-1}día^{-1}$, cuando la maderá tiene un precio del 25% por encima del precio base (17500 colones m^{-3}), el modelo indica suplementar con 2.37 kg. de concentrado $UA^{-1}día^{-1}$.

Con relación al banano y la melaza se encontró que es necesario disminuir su costo al 50% para que el modelo los elija como forma de suplementar los animales. Esto es poco probable a pesar de que el banano no tiene costo *per se*, sin embargo, sus altos contenidos de agua hacen que los costos de manipulación y transporte sean importantes.

Tabla 19. Distribución de las pasturas seleccionada por el modelo en los diferentes tipos de suelos según el escenario,

ESCENARIOS (PRECIO DE LOS PRODUCTOS EN COLONES	SFW (ha)	SIW (ha)	SFP (ha)
BASE	P=1.69; L=15.71; G=12.6	L=30	S.U=10
LECHE			
45; 54	P=1.69; L=15.71; G=12.6	L=30	S.U=10
66	L=15.59; G=14.41	L=30	M=8.64; S.U=1.36
75	P=2.39; L=10.15; G=17.46	L=30	T=10
CARNE			
195; 234; 286	P=1.69; L=15.71; G=12.6	L=30	S.U=10
325	L=15.02; G=14.98	L=30	T=1.0; M=9.0
MADERA			
15750	P=1.69; L=15.71; G=12.6	L=30	S.U=10
13125	L=15.6; G=14.4	L=30	S.U=10
19250	P=25.6; G=4.4	L=30	S.U=10
21875	P=30	L=30	S.U= 10

DISCUSION

Aunque en todos los escenarios modelados se obtuvo un beneficio (valor objetivo) positivo, cuando se compara con los datos reportados con engorde de bovinos en la misma zona, la rentabilidad es muy inferior (Bouman y Nieuwenhuyse, 1998), o con otros cultivos de otras zonas (Holmann y Estrada, 1997).

En Costa Rica los precios de la leche son relativamente altos comparados con los precios de la carne. Además la variación en los precios de la leche tienen efectos más fuertes sobre el beneficio generado en las fincas de doble propósito, lo cual hace que las explotaciones se inclinen más hacia la producción de leche. Para Holmann y Estrada (1997), cuando la relación entre el precio de la carne y la leche es de 4.3:1 o inferior, la lechería especializada es más viable que el sistema de doble propósito o los sistemas de cría sin ordeño. Sin embargo, muchos productores no tienen acceso a las cooperativas lecheras, por lo cual se ven obligados a vender la leche a menores precios, comparado con el que pagan las cooperativas (60 colones lt⁻¹). Bajo esta perspectiva la producción bajo el sistema de doble propósito es más atractiva, ya que la venta de terneros (carne) genera ingresos adicionales.

De otro lado las limitaciones biofísicas restringen el desarrollo de lechería especializada en muchas áreas de la Zona Atlántica de Costa Rica. Esto puede explicar el incremento de fincas de doble propósito en la zona en los años anteriores (French, 1994; Huising, 1993).

La proyección de precios reportada por The World Bank (1996) muestra que los precios de la carne en el año 2000 se incrementarán en un 32%, lo cual es superior al rango de precios modelado en este estudio.

En ninguno de los escenarios corridos se utilizó toda la mano de obra disponible (300 jornales año⁻¹), y se encuentra que la mayor cantidad de jornales utilizados fue de 195 jornales cuando la leche tuvo un valor de 75 colones (ver tabla 14). Según esto la relación

mano de obra/tierra es solo de 2.8 jornales ha⁻¹ año⁻¹, lo cual es muy bajo comparado con otros cultivos como caña de azúcar, mango, banano y marañón (Holmann y Estrada, 1997).

Con relación a las pasturas utilizadas se puede observar que en todos los escenarios, el modelo elige el PAST BbAp-PT, lo cual es concordante con lo encontrado por Holmann *et al* (1992b). Esta es una pastura mejorada, aunque no requiere altos niveles de insumos por la capacidad demostrada de fijación de nitrógeno de la leguminosa en niveles suficientes para mantener niveles de producción adecuados (Ibrahim, 1994; Hernández *et al*, 1995). En términos de rentabilidad, algunos autores reportan que sin restricciones de sostenibilidad, este tipo de pastura es menos rentable que las pasturas naturales (Bouman *et al*, 1998c). Sin embargo, la rentabilidad de esta forma de uso de la tierra es mejorada por el enriquecimiento con teca en las cercas vivas.

Los resultados de este estudio muestran que plantar teca en líneas de cercas vivas de pasto natural y en pasturas de *Brachiaria brizantha* asociada con *Arachis pintoii* sobre SFW y SIW, fue el uso de la tierra con sistema silvopastoril más atractivo comparado con bancos de proteína y pastura en callejones. Esto demuestra la importancia que tiene los árboles maderables preciosos en incrementar la sostenibilidad económica de las fincas ganaderas en Costa Rica. En la Zona Atlántica, los ganaderos tienen la tradición de plantar poró (*Erythrina berteroana*) y *Gliricidia sepium* como cercas vivas (Budowski, 1992), pero este estudio muestra que los propietarios necesitan diversificar las cercas vivas incluyendo especies maderables valiosas para generar ingresos adicionales, esto considerando los altos costos de mano de obra que tiene el mantenimiento de cercas vivas de poró, que se puede convertir en una limitante para su uso. Holmann *et al* (1992a), mostraron anteriormente que los pequeños finqueros con lechería (10 ha) disminuyeron el uso de forraje de poró en la alimentación de los animales debido al incremento en el precio de la mano de obra. Sin embargo, esta situación no aplica para otros países de Latino América en los cuales el precio de la mano de obra es más barato.

En las figuras se observa que en todos los suelos en los que es biológicamente viable plantar teca, las pasturas elegidas por el modelo siempre tuvieron cercas vivas enriquecidas. Es decir, la teca fue una opción que mejoró la rentabilidad del sistema en todos los escenarios. Del mismo modo se observa que las pasturas naturales siempre

fueron la forma de uso de la tierra más importante en términos de área, mientras el precio de la madera sea inferior a 19250 colones. Esto es consistente con lo reportado por otros autores para la misma zona (Jansen *et al*, 1997). La razón para esto se fundamenta en el hecho de que la producción se mantiene a través de la disminución de los minerales del suelo (nitrógeno, fósforo y potasio) (Bouman y Nieuwenhuyse, 1998). Sin embargo, se pone en duda la sostenibilidad biológica y productiva de este tipo de sistemas. Aparte de la disminución de los nutrientes en el suelo, la capacidad de carga de las pasturas naturales fue solo de 1 UA ha⁻¹, lo cual a medida que se requiera una intensificación en el uso de la tierra, las pasturas mejoradas pueden empezar a ser más importantes, ya que esas pasturas pueden soportar cargas de 2.5 UA ha⁻¹ (Ibrahim, 1994; Hernández *et al*, 1995).

Sin embargo, la mezcla *Brachiaria brizantha-Arachis pintoii* (Bb-Ap) tuvo una mayor importancia para optimizar el beneficio en las fincas, comparado con bancos de proteína y pasturas en callejones. Estudios realizados por Jansen *et al* (1997) muestran que el retorno de Bb-Ap fue mayor que el de pastura en callejones plantadas con poró. Esos autores calcularon una tasa interna de retorno con cargas animales altas de 117 y 15% para la mezcla y la pastura en callejones respectivamente. La mezcla de Bb-Ap tiene una demanda de mano de obra inferior a que los otros dos sistemas, lo cual puede ser una de las razones por las cuales la mezcla ha sido seleccionada (Estrada *et al*, 1995; Jansen *et al*, 1997; Ibrahim *et al*, 1998).

Holmann y Estrada (1997) encontraron que la mezcla Bb-Ap y bancos de proteína de *Cratylia argentea* solo fueron viables cuando el precio de la leche fue de 0.3 dólares kg⁻¹, con lo cual se obtuvo una rentabilidad de la pastura de 59 y 47% respectivamente. De otro lado, cuando los precios de la leche fueron 0.2 dólares kg⁻¹, la rentabilidad marginal fue de 39 y 3% para la asociación y el banco respectivamente. En este estudio el banco de proteína no fue seleccionado aunque la leche se modeló a un precio de 0.3 dólares kg⁻¹, lo cual es debido al hecho de que la mezcla pudo tener teca en sus cercas vivas, lo cual la hace más rentable. Un área de 1-2 ha fue seleccionada para plantaciones de teca, excepto cuando el precio de la carne y de la madera incrementaron. Cuando el precio de la carne fue incrementado un 25%, el modelo no seleccionó área para plantaciones, mostrando que los altos precios del producto animal pueden ser una limitante para la reforestación en las fincas ganaderas. Holmann y Estrada (1997) notaron que la reforestación con teca no fue

atractiva cuando el precio de la leche fue alto (USD \$ 0.3 l^{-1}) y solo fue seleccionada cuando el precio de la leche estuvo inferior a USD \$ 0.19. Sin embargo, el presente estudio mostró un área bajo plantaciones de teca de 1-2 ha, incluso con precios de leche de USD \$ 0.3 l^{-1} . La diferencia radica en el incremento medio anual utilizado en los modelos; en este estudio fue de 10 $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ (Briscoe, 1995; Vásquez y Ugalde, 1995; Luján *et al*, 1997; Chavarría *et al*, 1997), mientras que en el de Holmann y Estrada (1997) fue de 5 $m^3 ha^{-1} año^{-1}$. Además el tamaño de las fincas modelado fue de 70 ha comparado con 30 en el estudio de Holmann y Estrada (1997), lo cual puede explicar en parte la diferencia.

Algunos finqueros del trópico húmedo están empezando a plantar 1 a 2 ha de teca o melina (*Gmelina arborea*), pero es más evidente en fincas con tamaños medianos o grandes (Godoy, 1997). Además, visitas recientes a la Zona de Guanacaste muestran que muchos ganaderos están sembrando teca en linderos de cercas vivas, consecuente con lo que el modelo seleccionó.

La actividad ganadera puede empezar a disminuir cuando los precios de la madera se incrementen lo cual es evidente cuando un alto porcentaje del área (43%) fue seleccionada para pastoreo bajo plantaciones de teca, cuando el precio de la madera se incrementó un 10% (19250 colones m^{-3} , es decir, USD \$ 77). Las proyecciones de los estudios del banco mundial muestran incrementos en el precio de la madera muy superiores a los analizados en este estudio (World Bank, 1996). Como se mencionó anteriormente, el área bajo plantaciones depende además del precio de la madera, del tamaño de la finca. La producción de madera es a largo tiempo y los ganaderos están más inclinados a seleccionar un uso de la tierra que les garantice ingresos en el corto plazo; principalmente los pequeños finqueros. Sin embargo, este escenario puede ser diferente con mezclas de sistemas de cultivo (ganadería y agricultura), la cual tiene una mayor demanda de mano de obra. Estrada *et al* (1995) encontraron que con restricción en la disponibilidad de mano de obra, la reforestación fue atractiva en fincas con sistemas mixtos de cultivos de yuca y producción de leche.

Un alto porcentaje de la tierra no fue usada cuando el precio de la madera incrementó hasta un 25% del precio del escenario base (17500 colones m^{-3}). Esta área está representada principalmente por SFP, en el cual no es posible plantar teca. La teca crece bien en SFW

((Briscoe, 1995; Vásquez y Ugalde, 1995; Luján *et al*, 1997; Chavarría *et al*, 1997). El volumen de madera producido no fue afectado por el precio de la leche y esto puede ser explicado por el hecho de que el modelo seleccionó un pequeño porcentaje del área para plantaciones y un alto volumen de madera proviene de líneas de las cercas vivas. La producción de forraje de las plantaciones es muy baja y por tanto su capacidad de carga, por esta razón otros PASTs son seleccionados.

En este estudio los animales tuvieron un relativo alto valor genético para la producción de leche (6 lt vaca⁻¹ día⁻¹) y la importancia de la pastura de Bb-Ap incrementó cuando incrementaron los precios, principalmente de leche y de madera. Esto, sin embargo, no debe ser igual para escenarios en los cuales el potencial genético sea más bajo. En los estudio de Holmann y Estrada (1997) se obtuvo que con vacas de menos de 1000 lt/lactancia, el modelo seleccionó pasturas naturales de *Hyparrhenia rufa* si el precio de la mano de obra estuvo por debajo de USD \$13 jornal⁻¹; pero con vacas de alto potencial (1500 lt/lactancia), el modelo seleccionó mezclas de gramíneas-leguminosas mejoradas en todos los precios de mano de obra modelados (desde 10 hasta USD \$18 jornal⁻¹). Esto indica que los precios de mano de obra modelados en esos trabajos fue mucho mayor que los utilizados en el presente estudio (1400 hasta 2400 colones jornal⁻¹ = 5.6 a USD \$9.6 jornal⁻¹).

La disponibilidad de mano de obra no fue considerada como un factor limitante para las opciones de uso de la tierra, ya que todos los escenarios modelados utilizaron entre 110 y 195 jornales al año de 300 jornales que se le dieron al modelo como disponibles, es decir solo se utilizó entre un 37 y 65% de la mano de obra disponible. Otros estudios conducidos por Estrada *et al* (1995) también mostraron que la disponibilidad de mano de obra no fue una limitante para el uso de tierra con producción ganadera. Como es de esperarse, la utilización de mano de obra fue mayor cuando el precio de la leche se incrementó, ya que esto estimula aumentos en la producción, que requieren mayor cantidad de mano de obra. Al precio de mano de obra modelado (USD \$8 jornal⁻¹), la intensidad de uso de la mano de obra fue de 2.8 jornales ha⁻¹ año⁻¹, lo cual es inferior a 25.5 en caña de azúcar, 4 en arroz, 79 en mango, 36 en marañón y 10 en teca (Holmann y Estrada, 1997).

Con los escenarios de precios de mano de obra corridos se detectó que un precio de mano de obra superior a 1600 colones (USD \$6.4) fue un limitante para la explotación del total de área de suelos disponible. El precio sombra de la mano de obra fue siempre cero, y se debe disminuir del valor actual (2000 colones) a 1600 colones para que toda el área sea explotada. Estudios realizados con pequeños productores de leche (10 ha) en la región de Río Frío, Costa Rica, muestran que un incremento en el precio de la mano de obra con relación al precio de la leche representa un limitante importante para la producción de leche (Estrada *et al.*, 1995). En esta región, los pequeños finqueros venderán su mano de obra a las plantaciones de banano y cambiarán el sistema de su finca por producción de carne, la cual requiere menos mano de obra (Holmann, comunicación personal).

En general los suplementos no fueron de mucha importancia para el balance de los nutrientes requeridos por los animales y fueron usados solo cuando el precio de la madera se incrementó un 10 y un 25%; en estos escenarios se usaron 1.86 y 2.37 Kg de concentrado con base en gallinaza como suplemento, respectivamente. En este estudio, las cargas seleccionadas por el modelo son relativamente bajas (1 UA ha⁻¹, 2 UA ha⁻¹ y 2.5 UA ha⁻¹, para pasturas naturales, asociación Bb-Ap y Tanner, respectivamente); esto hace posible que el animal pueda seleccionar una dieta de una calidad suficiente para soportar los niveles de producción modelados (6 lt de leche vaca⁻¹ día⁻¹). Entre 4.5 y un 43% del área, dependiendo del escenario, fue seleccionada para Bb-Ap, caracterizada por su alta calidad (DIVMS de 65% y proteína de 15%), con ello se permite estratificar el hato, de tal forma que los animales con alta producción y alta demanda de nutrientes pastoreen esta zona, mientras que los animales con bajos requerimientos pastoreen las zonas establecidas con pasturas naturales. Estudios conducidos con Bb-Ap muestran que es posible mantener producciones de 8 a 9 litros de leche sin el uso de suplementos (González, 1992).

En este estudio se encontró que los precios de los suplementos deben disminuir más de un 50% del precio actual para que sea rentable su uso. Lo mismo fue reportado por Estrada *et al.* (1995). Esto podría indicar que la mayoría de los finqueros de la Zona Atlántica están utilizando melaza y banano como suplementos para las vacas en producción, ya que sus fincas tienen más de un 90% del área bajo pastos naturales (Paz, 1996; Montenegro y Abarca, 1998).

CONCLUSIONES

Se deben obtener mejores precios de la carne y de la leche, para que los productores se sientan motivados a establecer toda el área de su finca en pasturas mejoradas o sistemas silvopastoriles con pasturas mejoradas que intensifiquen la producción. Mientras esto no suceda, la capacidad de carga de la zona se mantendrá en niveles bajos (1 UA ha^{-1}), con un avance en la cantidad de pasturas degradadas en la zona.

El precio sombra de la tierra con la actividad de doble propósito es muy inferior al precio comercial de esta en la zona. De esto se concluye que muy pocas personas comprarán tierra para establecer este sistema.

Se considera que el área que el modelo elige de plantaciones es bastante adecuado y puede estar acorde con lo que los productores de sistemas de doble propósito estarán dispuestos a plantar.

Aunque en la zona existe la tradición de las cercas vivas de poró, se requiere que los productores utilicen el material de poda en forma sistemática para suplementar a sus animales. Además se debe mejorar el sistema introduciendo en las cercas vivas maderables de alto valor que permitan mejorar la rentabilidad del sistema.

La asociación Bb-Ap es una pastura mejorada más productiva y que puede ser mucho más sostenible en el tiempo, por ello se debe hacer transferencia de tecnología para lograr que los productores hagan uso de esta tecnología.

En la región, los costos de mano de obra se tornan limitantes para establecer pasturas mejoradas e intensificar la producción de doble propósito en la Zona Atlántica, esto por el efecto que tienen los cultivos como el banano, que consumen bastante de este insumo y el sistema permite pagarlo bien. Esta situación no es reproducible para otros países de América Latina, en los cuales puede haber desempleo.

BIBLIOGRAFIA

- ARGEL, P. J.** 1992. Problemática del pasto ratana en Costa Rica. *In* Seminario Taller El Pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en Costa Rica, Alternativa o Problemática en Nuestra Ganadería? (1992, San Carlos, Costa Rica). San José, Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. P. 11-17.
- CATIE.** 1987. Agricultural research programme in the Atlantic Zone of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 16 p. (Atlantic Zone Programme Paper no 2)
- BOUMAN, B. A. M.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H.** 1998a. PASTOR: A technical coefficient generator for pasture and livestock systems in the humid tropics, version 2.0. A user's guide. Guápiles, Costa Rica, REPOSA. 59 p.
- _____ ; **SCHIPPER, R. A.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H.; JANSEN, H. P. G.** 1998b. Quantifying economic and biophysical sustainability trade-offs in land use exploration at the regional level: a case study for the Northern Atlantic Zone of Costa Rica. *Ecological Modeling* (in press)
- _____ ; **NIEUWENHUYSE, A.; IBRAHIM, M.** 1998c. Pasture degradation and its restoration by legumes in humid tropical Costa Rica. *Tropical Grasslands* (in press)
- _____ ; **NIEUWENHUYSE, A.** 1998. Exploring sustainable beef cattle farming options in the humid tropics; a case study for the Atlantic Zone of Costa Rica. *In* International Seminar on Agrarian Policies: 'A Decision Making Opportunity' (1998, Heredia, Costa Rica). Pre-proceedings. Heredia, Universidad Nacional. 23 p.
- BRISCOE, C.** 1995. Silvicultura y manejo de teca, melina y pochote. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico N 270. 44 p.
- BROOKE, A.; HENDRICK, D.; MEERAUS, A.** 1992. GAMS. Release 2.25. A user's guide. Boyd & Fraser publishing company. Estados Unidos. 289 p.
- BUDOWSKI, G.** 1992. La agroforestería al servicio de un país en desarrollo. San José, Costa Rica, 2 congreso Forestal Nacional. p: 81-86.
- CHAVARRIA, M. I. et al.** 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto MADELEÑA en Costa Rica. Ed: L. Ugalde. Turrialba, Costa Rica CATIE/DGF-MIRENEM. 162 p.
- ESTRADA, R. D.; HOLMANN, F.; RUIZ, M.** 1995. Alternativas de producción en la Zona Atlántica de Costa Rica. *In* Proyecto Sistemas Silvopastoriles. Informe final. Fase III. Turrialba, Costa Rica, Convenio CATIE/CIID. p: 24-59.
- FAO.** 1993. Forest resources assesement 1990, tropical countries. FAO Forestry Paper no 112. 68 p.

- FRENCH, J. B.** 1994. Current status and trends in animal agriculture in Central America. *In* Animal agriculture and natural resources in Central America: strategies for sustainability. Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 9-22.
- GODOY, J. C.** 1997. Análisis económico y financiero de los incentivos a la reforestación otorgados por el gobierno de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 94 p.
- GONZALEZ, M. S.** 1992. Selectividad y producción de leche de pasturas de estrella (*Cynodon nlemfuensis*) solo y asociado con leguminosas forrajeras *Arachis pintoi* CIAT 17434 y *Desmodium ovalifolium* CIAT 350. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 142 p.
- HECKADON, S.** 1984. Panama's expanding cattle front: The Santeño campesinos and the colonization of the forest. Ph. D. thesis. Essex, UK, University of Essex. 297 p.
- HERNANDEZ, M; ARGEL, P. J; IBRAHIM, M. A.; MANNETJE, L. T.** 1995. Pasture production, diet selection and live weight gains of cattle grazing *Brachiaria brizantha* with or without *Arachis pintoi* at two different stocking rates in the Atlantic Zone of Costa Rica. *Tropical Grasslands*. 29: 134-141.
- HILLIER, P. B. R.; LIEBEZMAN, G. J.** 1986. Introduction to operations research. 4^a ed. Hoden Day, EE.UU. 887 p.
- HOLMANN, F.; ESTRADA, R. D.; ROMERO, F.; VILLEGAS, L. E.** 1992a. Technology adoption and competitiveness in small milk producing farms in Costa Rica; 1. a case of study [en línea]. *Journal Livestock Research for Rural Development*. 4 (1): Disponible en <http://www.cipav.org.co>
- _____; **ROMERO, F.; MONTENEGRO, J.; CHANA, C.; OVIEDO, E.; BAÑOS, A.** 1992b. Rentabilidad de sistemas silvopastoriles con pequeños productores de leche en Costa Rica: Primera aproximación. *Revista Turrialba*. 42 (1): 79-89.
- _____; **ESTRADA, R. D.** 1997. Alternativas agropecuarias en la región Pacífico Central de Costa Rica: Un modelo de simulación aplicable a sistemas de doble propósito. *In* Conceptos y metodologías de investigación en fincas con sistemas de producción animal de doble propósito. Eds. C. Lascano; F. Holmann. Cali, Colombia, CIAT/CONSORCIO TROPILECHE. p.: 134-152.
- HORDWARD, P.** 1988. Cattle subsystem expansion in Honduras and Nicaragua: The creation of a relative surplus population as a primordial cause of deforestation. *In* World Rural Sociology Congress (7, 1988, Bologna, Italy). Proceedings. p: 45-70.

- HUISING, J.** 1993. Land uses zones and land use patterns in the Atlantic Zone of Costa Rica a pattern recognition approach to land use inventory at the sub-regional scale, using remote sensing and GIS, applying an object-oriented and data-driven strategy. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Wageningen Agricultural University. 222 p.
- IBRAHIM, M.** 1994. Productivity, persistence and compatibility of grass-legume mixtures for sustainable animal production in the Atlantic Zone of Costa Rica. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Wageningen Agricultural University. 129 p.
- _____.; **HOLMANN, F.; HERNANDEZ, M.; CHANA, C.** 1998. Forage yield and live weight gains of steers of grazing unimproved pastures with daily browsing of *Erythrina* protein banks and or supplementation of green bananas of the humid tropics of Costa Rica. Aprobado en Agroforestry Systems.
- JANSEN, H. G. P.; IBRAHIM, M. A.; NIEUWENHUYSE, A.; MANETJE, L.; JOENJE, M.; ABARCA, S.** 1997. The economics of improved pasture and silvopastoral technologies in the Atlantic Zone of Costa Rica. *Tropical Grasslands*. 31: 588-598.
- KAIMOWITZ, D.** 1996. Livestock and deforestation Central America in the 1980s: A policy perspective. Jakarta, Indonesia. Center for International Forestry research. 88 p.
- LEEUWEN, A. C. J. VAN; HOFSTEDE, A. M.** 1995. Forest, trees and farming in the Atlantic Zone of Costa Rica. An evaluation of the current and future integration of trees and forest in farming systems in the Atlantic Zone of the Costa Rica. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico no 257. 48 p.
- LUJAN, R.; BEER, J.; KAPP, G.** 1997. Manejo y crecimiento de linderos de tres especies maderables del distrito de Changuinola, Panamá. CATIE (C. R.). Serie técnica. Informe Técnico no 242. 41 p.
- MANNETJE, L. T'; IBRAHIM, M.** 1989. Pasture degradation and restoration in Costa Rica in relation to production and biodiversity. (En prensa)
- MONTENEGRO, J.; ABARCA, S.** 1998. La ganadería en Costa Rica: Tendencias y proyecciones, 1984-2005. San José, C.R., Ministerio de Agricultura y Ganadería. 70p.
- MORALES, J. L.** 1992. Distribución del pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en las tierras de pastoreo de Costa Rica. In Seminario Taller El Pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en Costa Rica, Alternativa o Problemática en Nuestra Ganadería? (1992, San Carlos, Costa Rica). San José, Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. P. 1-10.
- NICHOLSON, C. F.; LEE, D. R.; BOISVERT, R. N.** 1994. An optimization model of the dual purpose cattle production system in the humid lowlands of Venezuela. *Agricultural Systems*. 46: 311-334.

- PAZ, N.** 1996. Optimización de sistemas de producción animal de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 132 p.
- PIJNEBURG, T. ; MARTINEZ, P.** 1992. PRODES, Nueva Guinea, Diagnóstico socio-económico. documento No 1. Nueva Guinea. Programa de Cooperación técnica Nicaragüense - Holandés. 30p.
- SADER, S. A.; JOYCE, A. T.** 1988. Deforestation rates and trend in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20: 11-19.
- SERRÃO, E. A.; TOLEDO, J. M.** 1992. Sustaining pasture based production system for the humid tropics. *In* Development or destruction, the conversion of tropical forest to pasture in Latin America. Eds. S. Downing H. Pearson C. Garcia Downing. Boulder, Westview Press. p. 257-280.
- STOORVOGEL, J. J.** 1995. Linking GIS and models: Structure and operationalisation for a Costa Rica case study. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 43: 19-30.
- TOLEDO, J. M.; Y SERRÃO, A.** 1984. Proyecto de investigación en pasturas y ganadería. Lima, Perú, REDINA. 71p.
- TOLEDO, J. M.** 1994. Livestock productions on pasture: parameters for sustainability. *In* Animal agriculture an natural resources in Central America: strategies for sustainability; Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 125-136.
- VASQUEZ, W.; UGALDE, L.** 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribea* en Guanacaste, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, IDA/FAO/HOLANDA. Proyecto Madeleña-3 (CATIE). 33 p.
- WORLD BANK.** 1996. Commodity markets and the developing countries. A World Bank quarterly. 42 p.

CAPITULO IV

EXPLORACION DE OPCIONES SILVOPASTORILES PARA LA SOSTENIBILIDAD BIOFISICA DE LA GANADERIA DE DOBLE PROPOSITO EN EL TROPICO HUMEDO

Palabras Claves: Pasturas degradadas, programación lineal, pasturas mejoradas, maximización, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, óxido nitroso, oxido nítrico, rentabilidad.

INTRODUCCION

En Latinoamérica, la expansión de la ganadería está fuertemente asociada con la deforestación. El más importante cambio en el uso de la tierra en los últimos treinta años ha sido la conversión de bosques en pasturas, y se considera que entre 1981 y 1990 se perdieron 75 millones de hectáreas de bosques. Una parte importante de esta área fue utilizada para la ganadería extensiva (FAO, 1993). En Costa Rica entre 1950 y 1990, se deforestaron 1.3 millones de hectáreas, que fueron convertidas plenamente en pasturas (Sader y Joyce, 1988). Se considera que una de las razones para que esto ocurra es el bajo cambio tecnológico en el manejo de la ganadería, lo cual favorece los sistemas de explotación extensivos (Serrão y Toledo, 1992). Sin embargo, el aumento de la población y las fuerzas del mercado de la carne principalmente, han hecho que la población ganadera haya pasado de 0.6 a 1.7 millones de cabezas entre 1950 y 1992 en Costa Rica (Kaimowitz, 1996).

Con el uso continuado de las pasturas, el sistema puede convertirse en insostenible. Cuando la capacidad de carga de las pasturas está adaptada a la capacidad natural que tiene el sistema de soportar animales (determinado por el clima, el suelo y la entrada natural de nutrientes), los niveles de producción de pastos pueden ser sostenidos por largos periodos de tiempo y los ingresos de los productores pueden ser estables. Sin embargo, cuando la carga a la cual se someten las pasturas es mayor que la que puede sostener el sistema, la remoción de nutrientes del suelo a través de los productos animales, y por procesos como la lixiviación, la volatilización y la denitrificación pueden ser mayores que las entradas; en este momento el contenido de minerales en el suelo empieza a ser disminuido. Este

proceso determina que con el correr del tiempo, la productividad de la pastura disminuya y el sistema se transforme en insostenible.

La degradación de las pasturas es el problema básico de la falta de sostenibilidad en los sistemas de producción animal en los trópicos (Toledo, 1994). La falta de tecnologías adecuadas en el manejo de especies forrajeras (gramíneas) exigentes principalmente en nutrientes, ha conllevado a que en estos terrenos desarrollen pasturas degradadas (Toledo y Serrão, 1984).

Una pastura degradada se define como una área utilizada en ganadería generalmente con una cobertura de gramíneas o ciperáceas, con grados de enmalezamiento, de compactación del suelo y de erosión tales, que su productividad biológica y económica es inadecuada. En este marco general, este tipo de terrenos no responden en productividad, a las prácticas de manejo normales, para la especie principal de la pradera (Argel, 1992). La degradación se define como un cambio negativo en la condición de la pastura, o en forma más simple como un descenso en la calidad de la pastura. La calidad o la condición de la pastura es la suma de varios parámetros, tales como, composición botánica, reducción de la cobertura vegetal, disminución de la fertilidad del suelo, pérdida de especies deseables y aparición de especies indeseables con relación a un óptimo económico o ambiental. (Mannetje e Ibrahim, 1989).

Con la degradación se obtiene un descenso gradual en la capacidad de carga de la pastura. Mientras en los primeros años de establecimiento de la pastura un productor puede mantener un animal en cada hectárea, después de cinco o siete años él necesitará dos o tres hectáreas para mantener el mismo animal. Esto es debido a que el periodo de recuperación de la especie forrajera se aumenta de 45-55 días a 90 días, además a que ocurre un descenso en la cantidad de forraje producido por unidad de área como consecuencia de la menor cantidad de plantas que existen (Heckadon, 1984; Hordward, 1988). Se puede llegar a una reducción del 65% de la capacidad de carga cuando se pasa de una pastura de buena calidad a una pastura en estado avanzado de degradación, proceso que ocurre en el transcurso de 10 años (Heckadon, 1984).

La disminución anual de N en pasturas tropicales es entre 65 y 94 kg. ha⁻¹ año⁻¹ (Keller *et al*, 1993). Para detener esta disminución de nutrientes en el suelo se hace necesario implementar tecnologías que sean viables económicamente. La principal vía de entrada extra de N en las pasturas es a través de fijación simbiótica de microorganismos con leguminosas o a través de fertilizantes. Los fertilizantes son la opción más viable para aumentar las entradas de fósforo y potasio al sistema.

Sin embargo, es posible disminuir las pérdidas de nutrientes por lixiviación con la utilización de sistemas que permitan manejar dos estratos radicales con diferentes profundidades. Los sistemas silvopastoriles con árboles leguminosos pueden ser una opción que disminuya la cantidad de nutrientes lixiviados a través de los macroporos.

Para Bouman y Nieuwenhuyse (1998), los sistemas de producción animal de engorde actuales en la Zona Atlántica de Costa Rica son insostenibles, ya que con niveles de producción de 10-15 t de MS ha⁻¹año⁻¹ de las pasturas naturales, se están perdiendo del suelo 50-65 kg de N ha⁻¹año⁻¹. Esto traerá como consecuencia que los sistemas de producción se harán más extensivos, los ingresos netos de los finqueros disminuyan y menos área será usada con pasturas.

Recientes estudios sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno desde el suelo concluyen que el cambio en el uso de la tierra en los trópicos tendrá efectos atmosféricos importantes a nivel regional y mundial. La conversión de bosques tropicales hacia pasturas para ganadería pueden contribuir con emisiones de N₂O de 1 Tg hacia la atmósfera; una cuarta parte de todo el N₂O de origen antropogénico (Keller *et al*, 1994). En la zona Atlántica de Costa Rica se ha encontrado que las emisiones de N₂O disminuyen con el tiempo después de tumbado el bosque para establecer pasturas (Keller *et al*, 1993).

En un estudio realizado en la Zona Atlántica de Costa Rica se encontró que el flujo de N₂O desde el suelo hacia la atmósfera tiene un patrón estacional en las pasturas fertilizadas y se encontró que es mayor cuando los suelos están húmedos (Veldkamp, 1993). También se encontró que la cantidad de nitrógeno que se perdía como gas fue de 0.94 ng de N cm⁻²h⁻¹ que correspondió a un 1.3% del fertilizante aplicado.

Según Veldkamp (1993), las especies forrajeras con alta productividad (especies mejoradas) son buenas competidoras por N mineral en el suelo, lo cual puede disminuir el N disponible para la nitrificación y denitrificación realizada por los microorganismos. Con esto será posible disminuir la liberación de gases hacia la atmósfera.

La Zona Atlántica de Costa Rica, durante los últimos cuarenta años, ha sido deforestada y el uso de la tierra ha cambiado rápidamente; actualmente predomina el uso en pasturas extensivas, que ocupaban para 1992, 400000 ha; los cultivos anuales y perennes (maíz, yuca, palmito y ñame) ocupaban 4000 hectáreas; el banano ocupaba para 1992, 40342 ha de suelos fértiles mal drenados (CATIE, 1987; Leeuwen y Hofstede, 1995; Bouman y Nieuwenhuys, 1998).

Se piensa que los sistemas silvopastoriles sean una opción viable para el manejo sostenible de la ganadería en estos terrenos. Para definir cual de los posibles sistemas silvopastoriles es el más adecuado para la recuperación de pasturas degradadas, se hace necesario definir, para cada uno de estos, cuales son sus potencialidades económicas, biológicas y sus limitaciones de implementación. Con esta información se podrá determinar para una situación específica, cual es la opción económicamente factible para la producción ganadera sostenible con base en pasturas.

En las zonas húmedas tropicales es difícil producir leche con razas especializadas de leche debido a problemas de adaptación de este tipo de animal; por ello se utilizan sistemas de doble propósito en los cuales se combinan características productivas de razas adaptadas a las condiciones ambientales (principalmente *Bos indicus*) con razas con alto potencial de producción (por ejemplo Holstein, Jersey, Pardo suizo, etc.), logrando niveles adecuados de producción. En este sistema, además de la extracción de la leche, se producen terneros que generalmente son vendidos a otros productores para su engorde.

Un gran porcentaje del ganado en Centro América está siendo explotado bajo el sistema de producción del doble propósito; esto debido a que la leche genera utilidades y proporciona flujo constante de caja para el funcionamiento de la empresa o de la finca (Kaimowitz, 1996).

Es relevante conocer el comportamiento de los diferentes escenarios de uso de la tierra desde el punto de vista biofísico y socioeconómico, que permita decidir en un momento determinado, cual es la opción de producción más adecuada. Es necesario comparar ganadería con silvopastoreo vs ganadería con las pasturas tradicionales.

La programación lineal es una rama de las matemáticas desarrollada para solucionar problemas complejos sobre el uso, asignación y distribución de recursos con restricciones. Para ello es necesario que los sistemas sean descritos en forma cuantitativa (Hillier y Liebezman, 1986). Durante la última década un gran número de modelos de simulación han sido desarrollados, para describir y simular los procesos agro-ecológicos a diferentes niveles de detalle (Nicholson *et al*, 1994; Paz, 1996, Bouman *et al*, 1988a; Bouman *et al*, 1988b). Un modelo es una relación formal entre el ingreso de parámetros externos y la salida de parámetros internos (Stoorvogel, 1995). Los modelos de programación lineal pueden ser usados para analizar diferentes escenarios de usos de la tierra, con lo cual se genera información para la planificación del uso de espacios en forma óptima desde el punto de vista económico.

La estructura de los modelos de optimización permiten cuantificar el intercambio entre los componentes y las restricciones, seleccionar la mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios y mostrar cuanto se puede pagar por una unidad adicional de un recurso que se agota. En esta investigación se identifican opciones silvopastoriles viables económicamente que permitan reemplazar las pasturas degradadas que se han desarrollado en la Zona Atlántica de Costa Rica por un sistema de producción sostenible biológicamente. Además permitirá identificar restricciones de tipo biofísico y socioeconómico para cada una de las alternativas (escenarios).

MATERIALES Y METODOS

La investigación fue realizada con información referente al bosque tropical húmedo de Costa Rica, fundamentalmente en la vertiente del Océano Atlántico. La región tiene una elevación sobre el nivel del mar de 0-200m, con una pluviosidad que varía entre 3000 y 6000 mm/año y una temperatura promedio de 26 °C con una variación máxima de 2°C y humedad relativa de 85-90%. Los meses menos húmedos están entre diciembre y abril, sin embargo, en todos los meses del año existe un superávit de agua, es decir, el balance hídrico es positivo para las plantas (Bouman y Nieuwenhuys, 1998).

Los suelos en general se dividen en tres clases principales: 1. Suelos jóvenes aluviales, volcánicos, bien drenados, con una relativa alta fertilidad (Inceptisoles y Andosoles) encontrados solamente en algunas áreas planas. Son desarrollados de depósitos aluviales jóvenes del holoceno (SFW); 2. Suelos relativamente viejos, bien drenados, desarrollados del pleistoceno a partir de sedimentos con una relativa baja fertilidad, con pendientes entre el 10 y el 20% (Oxisoles e Inceptisoles) (SIW); 3. Suelos jóvenes, volcánicos, pobremente drenados del grupo aquico y con una relativa alta fertilidad, solo en regiones planas (Entisoles e Inceptisoles) (SFP) (Nieuwenhuys, 1996).

En el presente trabajo se hacen análisis de posibles escenarios de producción animal a nivel de finca que sean alternativos a la producción sobre pasturas degradadas que ocurre actualmente. Se desarrolla un modelo determinístico en programación lineal que permita explorar alternativas sostenibles de pasturas para sistemas de producción de doble propósito (APTS: **A**nimal **P**roduction **S**ystems at a defined **T**echnology).

El sistema de producción animal en el modelo, obtiene sus nutrientes de diferentes opciones de pasturas (PASTs: **P**ASTure production systems at a defined **T**echnology), los cuales se muestran en la tabla 20. Para completar la cantidad de nutrientes requerida por cada uno de los sistemas de producción animal, se tendrá en cuenta la suplementación (FAST: **F**eed **A**cquisition **S**ystem at a defined **T**echnology), los cuales se observan en la tabla 20.

La función objetivo maximiza el total de entradas económicas, obteniendo esta cifra de la resta entre el valor de los productos menos los costos de los insumos y el costo de la mano de obra requerida en las diferentes actividades de los procesos productivos.

Tabla 20. Opciones para producir nutrientes necesarios para el sistema de producción animal.

PASTs				FASTs
PASTOS NATURALES	PASTURAS MEJORADAS		SISTEMAS SILVO PASTORILES*	
	MEJORADAS FERTILIZADAS	SIN FERTILIZAR	SIN FERTILIZAR	
Ratana, principal (N-M)	<i>Brachiaria brizantha</i> (Bb)	Asociación <i>B. brizantha</i> - <i>Arachis pintoi</i> (Bb-Ap)	Banco de proteína de <i>Erythrina berteroana</i> (B)	Banano verde de rechazo
<i>Axonopus sp.</i> (N-M)	<i>Cynodon nlemfuensis</i> (E)	<i>Brachiaria brizantha</i> (Bb)	Pastura en callejones de <i>Erythrina berteroana</i> con <i>B. brizantha</i> . (C)	Melaza
<i>Paspalum conjugatum</i> (N-M)	<i>Brachiaria radicans</i> (T)	<i>Cynodon nlemfuensis</i> (E) <i>Brachiaria radicans</i> (T)		Gallinaza

*Todos los PASTs se usan con cercas vivas y con cercas muertas. Las cercas muertas pueden ser de dos tipo: 1. *Erythrina berteroana* o 2. *Erythrina berteroana* con árboles de teca (sus siglas serán: N-PT; E-PT, BbAp-PT, B-PT, C-PT). Excepto tanner, el cual por el tipo de suelo es inadecuado para plantar teca.

La función objetivo de este trabajo de investigación está dada por una maximización de los ingresos netos del productor en el modelo. Esta función se puede describir de la siguiente

$$Max Z = \sum_{j,h} y_j A_h P_j - \sum_h c_h A_h - \sum_h l_h A_h w - \sum_{s,p,r} c_{spr} P_{spr} - \sum_{s,p,r} l_{spr} P_{spr} w - \sum_f c_f F_f - \sum_{f,m} l_f F_{fm} w \quad (\text{eq.1})$$

$$- \sum_{s,p,r} n_{sprnm} P_{spr} - \sum_f n_{fn} F_{fm} + \sum_h n_{hnm} A_h \leq 0 \quad \forall n, m \quad (\text{eq. 2})$$

$$\sum_{s,p,r} sr_{spr} P_{spr} - \sum_h h_h A_h = 0 \quad (\text{eq.3})$$

$$\sum_{p,r} P_{spr} \leq s_s \quad \forall s \quad (\text{eq.4})$$

$$- \sum_{s,p,r} d_{spr\delta} A_{spr} \leq 0 \quad \forall \delta \quad (\text{eq.5})$$

$$\sum_{s,p,r} g_{spr\delta} A_{spr} \geq 0 \quad (\text{eq 6})$$

$$h \sum l_h A_h + \sum_{s,p,r} l_{spr} P_{spr} + \sum_{f,m} l_f F_{fm} \geq 0 \quad (\text{eq 7})$$

Eq 1: La función objetivo, o función de maximización, es igual a la sumatoria del precio de los productos multiplicada por la cantidad de cada uno de los productos, menos: los costos por los insumos del hato, costos de mano de obra del hato, el valor de los insumos para un sistema de pasturas multiplicado por el número de hectáreas en esa pastura, mano de obra requerida por cada uno de los sistemas de pasturas, costos debidos a los suplementos y valor de la mano de obra requerida para suministrar los suplementos.

Eq 2: La sumatoria de la cantidad de nutrientes aportados por las pasturas más los nutrientes aportados por los suplementos deben ser mayores o iguales a los nutrientes requeridos por los animales en el sistema.

Eq 3: La sumatoria de la capacidad de carga de cada uno de los sistemas de pasturas o sistemas silvopastoriles multiplicado por el número de ha en ese sistema debe ser igual al número de unidades animales del sistema de producción animal.

Eq 4: La sumatoria de cantidad de suelos con un sistema de pasturas o un sistema silvopastoril sembrado no debe ser mayor a la cantidad de tierra o suelo disponible en un momento determinado.

Eq 5: La sumatoria de cantidad de minerales disminuidos en el suelo por un sistema de producción de pasturas o un sistema silvopastoril, multiplicado por tipo de sistema de producción animal debe ser mayor o igual que cero.

Eq 6: La sumatoria de la cantidad de gases (NO y N₂O) enviados a la atmósfera por un sistema de pasturas o un sistema silvopastoril, multiplicado por el tipo de sistema de producción animal tiene que ser mayor o igual que cero

Eq 7 La sumatoria de la mano de obra necesaria para el manejo del hato más la mano de obra requerida para el establecimiento y manejo de los sistemas de pasturas más la sumatoria de la mano de obra requerida para el suministro de suplementos debe ser menor o igual a la mano de obra disponible

Ver anexo 1.

En el presente trabajo, la restricción de la Eq 5 y la Eq 6. sirven para poner los límites en la pérdida de nutrientes y en la emisión de gases (parámetros de sostenibilidad) para la construcción de escenarios.

PASTOR (PASTure and livestock technical coefficients generatOR) genera gran parte de los coeficientes técnicos que son necesarios para desarrollar el modelo de maximización. Este es un programa diseñado en Fortran77, que permite mediante ecuaciones, obtener todos los coeficientes técnicos de sistemas de producción bovina de carne en el trópico húmedo y que son utilizados en modelos de programación lineal para explorar y optimizar sistemas de uso de la tierra. Los coeficientes técnicos son entradas y salidas cuantificadas del sistema de producción (Bouman et al, 1998a).

La información necesaria para que el sistema PASTOR pueda generar los coeficientes fue obtenida a través de 50 entrevistas a productores de la Zona Atlántica de Costa Rica y a partir de fuentes secundarias, principalmente investigaciones realizadas en CATIE.

Una pastura (PAST) para PASTOR es definida como una combinación de una especie, un tipo de suelo y un manejo específico. Las especies pueden incluir pasturas mejoradas, pasturas nativas, asociaciones de gramíneas y leguminosas y sistemas silvopastoriles. Las variables de manejo son capacidad de carga a la cual se somete las pastura, , aplicación de fertilizantes y uso de herbicidas. La capacidad de carga es tenida en cuenta porque tiene implicaciones sobre la producción de pastos y el balance de nutrientes en el suelo (remoción por material forrajero consumido e ingresos en orina y heces).

El nivel de producción de la pastura puede variar desde una situación ilimitada de nutrientes para la pastura hasta una situación de bajos niveles de producción con suelos pobres. En el primer caso se requiere de altos insumos como fertilizantes y agentes químicos protectores. Según el sistema elegido, PASTOR calcula el balance de nutrientes en el suelo (Bouman *et al*, 1998a, Bouman y Nieuwenhuyse, 1998; Bouman *et al*, 1998b).

El balance de nitrógeno (N) en el suelo es calculado usando una versión de NUTMOM (Stoorvogel, 1993). En este modelo las principales entradas son: deposición atmosférica, fijación por microorganismos y entradas por heces y orina (dependientes de la capacidad de carga), fertilizantes. Las salidas principales son la cantidad del nutriente que es removida por el forraje consumido por los animales en el pastoreo y las pérdidas por lixiviación, volatilización y denitrificación/nitrificación. El balance solo puede ser negativo o cero, cuando ocurre un balance negativo indica que el suelo es disminuido en ese nutriente en esa cantidad.

El balance del potasio (K), considera como entradas: deposición atmosférica, meteorización del material parental del suelo, entrada en orina y heces de los animales, fertilizantes. Las salidas son: cantidad de nutriente en el forraje consumido por los animales y lixiviación. El fósforo tiene estas mismas entradas y salidas, pero además se considera la fijación del nutriente como una salida más del sistema de producción. Las cifras usadas para estos datos son tomadas de Bouman *et al*, (1998a).

La información de entrada y salida de nutrientes del sistema, se especifican por tipos de suelo. Además para esta investigación se estimó que el banco de proteína, la pastura en callejones y la asociación *B. brizantha* - *A. pintoi*, disminuyen en un 70% la lixiviación de los nutrientes provenientes de la orina y de las heces de los animales en pastoreo.

La emisión de gases como N_2O y NO son calculados usando el modelo de simulación del DNDC (DeNitrification -DeComposition) (Lie *et al*, 1992). Las emisiones de gases de este modelo se soportan en que las emisiones de gases (N_2O y NO) de pasturas naturales en la Zona Atlántica de Costa Rica fueron constantes después de 25 años

SOFTWARE

PASTOR fue desarrollado en FORTRAN77 (Bouman *et al*, 1998a) y el modelo de programación lineal es desarrollado en GAMS 2.25 (Paquete para microcomputadoras desarrollado por el Banco Mundial en 1988) (Brooke *et al*, 1992). Todos los software corren en microcomputadoras bajo ambiente de D.O.S.

ESCENARIOS

Los escenarios corridos se desarrollan sobre una finca de 70 ha (promedio encontrado en las entrevistas en la zona), de las cuales el 43% es de SFW, el 43% es de SIW y el 14% es de SFP. Solo se modela la finca con sistema de doble propósito. El engorde y la cría sin ordeño han sido exploradas por otros autores (Bouman y Nieuwenhyse, 1998). El precio base de la leche es 60 colones/litro de leche líquida vendida en la finca; el precio de la carne de vacas adultas es de 210 colones/kg y el de ternero destete es de 260 colones/kg en la finca (precio de subasta menos los costos de transporte). El precio base de la madera es de 17500 colones el m³, vendiendo el árbol en pié (precio de la zona; se hace así para facilidad de cálculos, aunque los productores pueden obtener mayor beneficio con el aprovechamiento de la madera).

La finca cuenta con 25 jornales/mes (300 jornales/año) a un precio base de 2000 colones/jornal. Estos jornales son utilizados para las labores de manejo de los animales, la siembra y manejo de las pasturas y el suministro de suplementos.

La disminución de nutrientes en el suelo es uno de los factores que más inciden en la degradación de las pasturas. Por ello, la sostenibilidad de las pasturas de la Zona, se analiza en términos de disminución de los nutrientes en el suelo. Los más estudiados y que más fuertemente afectan la producción por sus costos y su efecto biológico son los elementos mayores (N, P, K). Sobre esta base se construyeron escenarios para analizar el impacto de cada uno de los tres elementos.

Con base en el escenario base se determinó la cantidad de nutriente que se pierde del sistema cuando no ocurre ninguna restricción. Se creó un escenario en el cual solo se permite perder entre el 40 y 50% de la cantidad perdida en el escenario base (N y K). Luego se construyó un escenario en el que se permitió perder solo entre el 25 y el 35% de lo perdido en el escenario base en cada uno de los elementos; otro escenario en el cual solo se permitió perder entre el 5 y el 15% de cada elemento y por último un escenario en el

cual no se permitió perder nada del elemento. El último escenario permite determinar escenarios con mayor capacidad para permanecer en el tiempo.

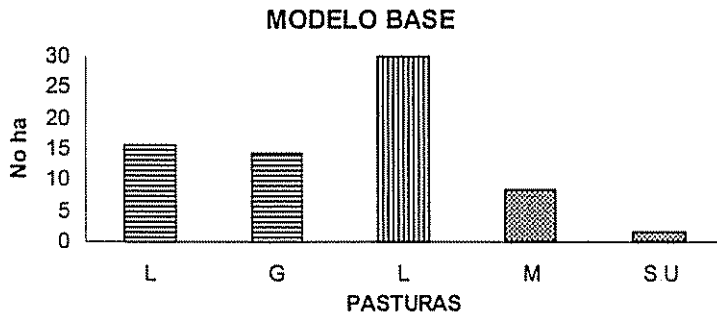
De igual manera se construyeron escenarios para la emisión de gases. Se construyeron varios escenarios para comparar el efecto de cada uno de los parámetros de sostenibilidad sobre la función de maximización.

RESULTADOS

En la figura 5 se pueden observar los tipos de pasturas que elige el modelo cuando no se le impone ninguna restricción ambiental. Solo una pequeña parte del suelo (SFP) se deja sin utilizar (1.5 ha). La gran mayoría del suelo se usa con N-PT; solo en aquellos suelos en los cuales no se puede plantar teca (SFP), el modelo elige pasturas N-M. Una parte del SFW se planta con la asociación BbAp-PT, la cual es un sistema de pasturas mejoradas.

Como es de esperarse, los beneficios son los más altos de todos los modelos corridos, al igual que el precio sombra de los SFW y de SIW. Excepto en algunos escenarios en los cuales se hace restricción de K y se utiliza todo el SFP, el precio sombra de este siempre fue cero.

Figura 6. Uso del suelo con diferentes tipos de pasturas cuando no se hace ninguna restricción.



L: Pasturas de pastos naturales con cercas vivas de poró enriquecidas con Teca.

G: Pasturas de asociación de *B. brizantha* y *Arachis pintoi* con cercas vivas de poró enriquecidas con Teca (BbAp-PT).

T: Pasturas de Tanner con cercas vivas de Poró.

M: Pasturas de pastos naturales con cercas muertas.

H: Pastura de estrella fertilizada.

K: Pastura en callejones (*B. brizantha* con Poró con cercas vivas de poró y teca)

S.U: Terrenos que quedan sin ser usados.

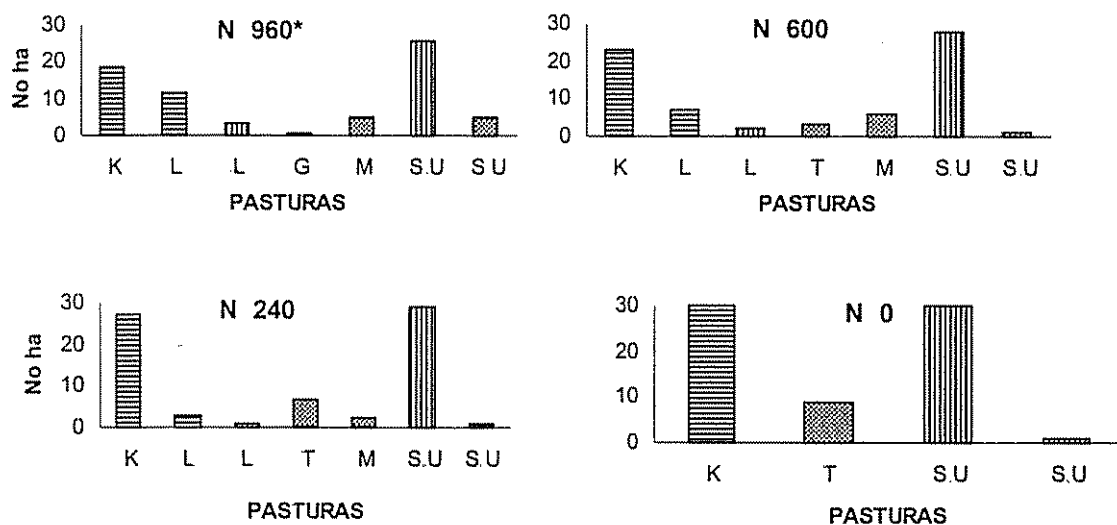
▨ SUELO FERTIL BIEN DRENADO (SFW). ▩ SUELO INFERTIL BIEN DRENADO (SIW). ▤ SUELO FERTIL MÁL DRENADO (SFP).

NITROGENO

El efecto más importante que tiene una restricción sobre la pérdida de N del suelo, es el cambio en el uso del SIW. Este suelo es utilizado con pasturas naturales cuando no hay

ninguna restricción, sin embargo, cuando se limita la cantidad de pérdida a 960 kg. de N/año, estos suelos dejan de ser utilizados en su gran mayoría. A medida que la cantidad de N que se puede perder es menor, la cantidad de SIW que se deja sin utilizar es mayor (pasa de 4.1 ha con 960 kg. de N/año a 0 cuando se limita la pérdida de N a 0 kg.) (ver figura 7).

Figura 7. Efecto de la restricción en la cantidad de N que puede ser disminuida en el suelo, sobre el tipo de pasturas a utilizar.



*El título de la figura indica la cantidad máxima del elemento que puede ser disminuido el suelo de toda la finca por año. En el caso de los gases es la cantidad máxima de gas que puede ser emitido a la atmósfera por año en toda la finca.

Lo contrario sucede con el SFP, el cual empieza a ser utilizado con mayor intensidad a medida que la cantidad de N perdida en el suelo es menor. Para esto el modelo elige Tanner con la mayor dosis posible de fertilizante (T99). Todo el SFW es utilizado con C-PT en todas las restricciones de pérdida de N; lo cual es debido a la capacidad que tiene el poró de fijar N en el suelo. Según Abarca (datos sin publicar), en SFW se puede lograr una fijación simbiótica de 150 kg. de N/ha/año en uan pastura en callejones de poró con *B. brizantha*.

Con la utilización de Pasturas en callejones y tanner fertilizado, la finca puede mantener niveles adecuados de producción de leche, carne y madera, aunque el ingreso neto se reduce a un 21% del obtenido cuando no hay restricción (tabla 21). Además, con esto el

modelo libera 30 ha de SIW, que podrían eventualmente ser liberados para otros usos como regeneración natural de bosque que aporte otros ingresos a la finca (ver figura 7).

El precio sombra de la tierra disminuye a medida que el ingreso neto disminuye, lo cual es consecuencia de la menor cantidad de tierra usada en producción (tabla 21). Sin embargo, el precio sombra de los tres tipos de suelo es muy inferior al precio comercial actual de la tierra en la zona (entrevistas a productores). Este precio sombra tan bajo con la restricción en la cantidad de N que se puede perder en el suelo, probablemente indica que bajo estas condiciones, se deban implementar otras actividades productivas más rentables.

Tabla 21. Parámetros productivos de la finca según las restricciones de disminución de N.

PARAMETRO	DISMINUCION DE NITROGENO EN EL SUELO kg./AÑO/70 ha)				
	0	240	600	960	30000 (BASE)
Cantidad real de N disminuido (kg./año)	0	240	590	758	2072
Beneficio (millones de colones/año)	0.6323	0.8416	1.1511	1.389	3.0476
Productos					
leche (kg./año)	48611	45758	41283	35146	59743
carne (kg./año)					
terneros	3442	3240	2923	2489	4230
vacas	3755	3534	3189	2715	4614
madera (m ³ /año)	70	72	74	78	130
Mano de obra usada (jornales/año)	157	146	130	111	154
Precios sombra de la tierra (colones/ha).					
SFW	21078	21078	25084	25455	53158
SIW	0	0	0	0	48430
SFP	0	0	0	0	0

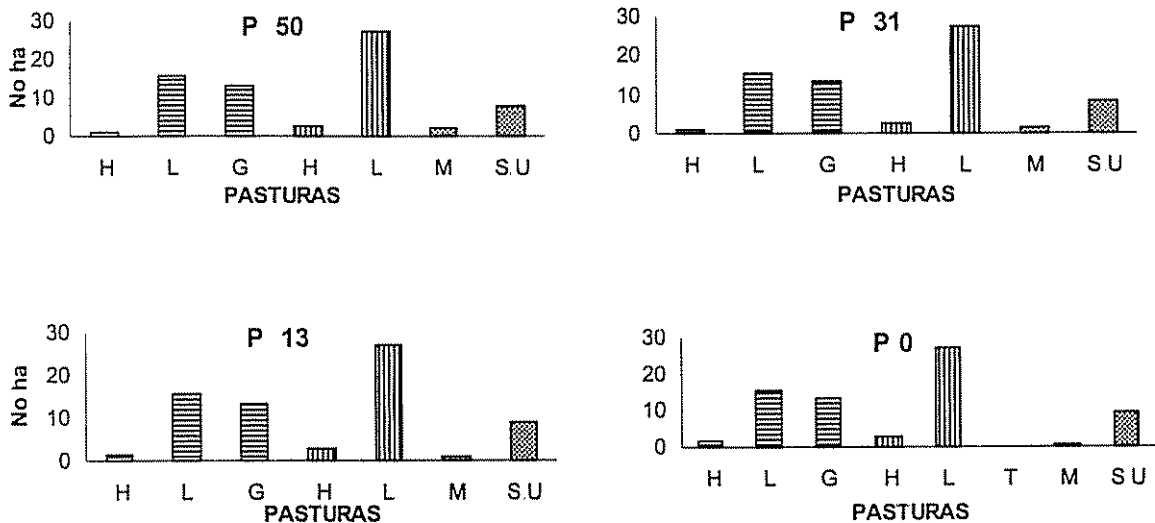
FOSFORO

Según los resultados encontrados al correr los diferentes modelos, se nota que el P no tiene mucho efecto en el tipo de pasturas a utilizar. Solo se encuentra un cambio importante en el patrón de usos del uso entre el modelo base (se pierden 150 kg. de P/año) y el primer escenario con restricción (se pierden 32 kg. de P/año).

Este cambio implica que parte del SFW y SIW que era utilizado con naturales se plante con E-PT. Al contrario el SFP que fue explotado con N-M deja de ser sembrado. La cantidad de suelo bajo asociación de BbAp-PT se mantiene constante en todos los modelos relacionados con P. El poco cambio en el patrón de uso de pasturas se ve reflejado en todos los parámetros productivos y económicos de los diferentes modelos corridos como son: producción de leche, carne y madera, utilización de mano de obra y precios sombra de los recursos (tabla 22).

Todo esto puede estar justificado en lo poco dinámico que es el ciclo del fósforo en la naturaleza y principalmente en el suelo. De esto se desprende que la diferentes opciones de pasturas presentadas al modelo no tengan diferencias marcadas en la forma de utilización del elemento, ni posibilidad de disminuir eventuales pérdidas del elemento desde el suelo, como ocurre con otros elementos.

Figura 8. Efecto de las restricciones en la cantidad de fósforo que se puede disminuir en el suelo sobre el tipo de pasturas a utilizar en la finca.



POTASIO

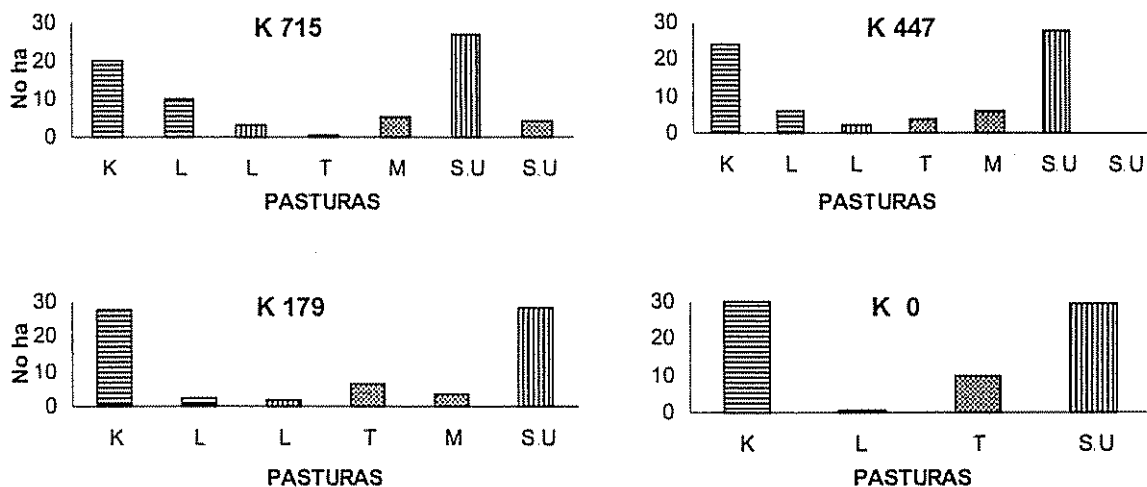
Al contrario del fósforo, el potasio tiene dos grandes variaciones en el uso de pasturas. Cuando se pasa del modelo base (pérdida de 1558 kg. de K/año) a una restricción de 715

kg. de K/año (pérdida de 517 kg. de K/año), 27 ha de SIW que estaban siendo utilizadas con pasturas naturales dejan de ser utilizadas. La cantidad de suelo de este tipo que no es utilizado aumenta a medida que la cantidad de K que se permite disminuir en el suelo es menor. Con relación al SFW pasa de ser utilizado con naturales y asociación de BbAp-PT, para ser utilizado exclusivamente con sistema silvopastoril de C-PT. Esto como resultado de la mayor capacidad que tienen los árboles de reciclar nutrientes altamente susceptibles de ser lixiviados como el K (figura 9).

Tabla 22. Parámetros productivos de la finca según las restricciones de disminución de P.

PARAMETRO	DISMINUCION DE FOSFORO EN EL SUELO (KG./AÑO/70 ha)				
	0	13	31	50	30000 (BASE)
Cantidad real de P disminuido (kg./año)	0	9	21	32	151
Beneficio (millones de colones/año)	2.6982	2.7138	2.7399	2.7598	3.0476
Productos					
leche (kg./año)	56749	56732	56964	57136	59743
carne (kg./año)					
terneros	4018	4017	4033	4046	4230
vacas	4383	4382	440	4413	4614
madera (m ³ /año)	130	130	130	130	130
Mano de obra usada (jornales/año)	146	146	142	142	154
Precios sombra de la tierra (colones/ha).					
SFW	48806	48871	48871	48871	53158
SIW	41132	41112	41112	41112	48430
SFP	0	0	0	0	0

Figura 9. Efecto de la restricción en la disminución de potasio en el suelo sobre el uso con pasturas.



El SFP pasa de ser utilizado con pasturas naturales para ser sembrado con Tanner con altas dosis de fertilizante. Esta opción permite que a través de fertilizantes se aumente la carga y por tanto la productividad del suelo, a la vez que se restituyen parte de los nutrientes extraídos o perdidos de él.

El impacto fuerte sobre el uso de los suelos se ve reflejado también en una disminución fuerte en los parámetros económicos de la finca. El ingreso neto disminuye en proporciones parecidas a como disminuye la cantidad de elemento perdido en el suelo. Cuando la cantidad de elemento disminuido en el suelo es 0, el ingreso neto solo es un 21% del beneficio neto en el escenario base; a pesar de que la disminución en la cantidad de carne y leche producida solo fue del 19% y la disminución en la cantidad de la madera producida solo fue un 49%. Esto es comparable con el efecto del N, pero contrario a lo que sucedió con el P. El precio sombra del SFW disminuyó en forma similar al ingreso neto; sin embargo, el precio sombra del SFP pudo aumentar cuando fue utilizado con Tanner fertilizado en los dos últimos escenarios (Tabla 23).

Tabla 23. Parámetros productivos de la finca según las restricciones de disminución de K.

PARAMETRO	DISMINUCION DE POTASIO EN EL SUELO (kg./AÑO/70 ha)				
	0	179	447	715	30000 (BASE)
Cantidad real de K disminuido (kg./año)	0	179	386	517	1558
Beneficio (millones de colones/año)	0.6328	0.8380	1.1123	1.3284	3.0476
Productos					
leche (kg./año)	51106	46654	42994	35964	59743
carne (kg./año)					
terneros	3619	3030	3041	2546	4230
vacas	3947	3603	3317	2778	4614
madera (m ³ /año)	71	72	74	77	130
Mano de obra usada (jornales/año)	163	149	135	114	154
Precios sombra de la tierra (colones/ha).					
SFW	20945	16885	25084	25084	53158
SIW	0	0	0	0	48430
SFP	4413	14007	0	0	0

La mano de obra no fue grandemente afectada por los modelos corridos y sigue un patrón similar al de los otros elementos. Sin embargo, es de aclarar que la cantidad de mano de obra utilizada es muy inferior, en todos los modelos corridos a la cantidad de mano de obra disponible en la finca (240 jornales/año).

OXIDO NITROSO Y OXIDO NITRICO

Las opciones de pasturas o de sistemas silvopastoriles no representan soluciones adecuadas para la disminución en la emisión de gases. Por ello, se nota que a medida que se restringe la cantidad de gases que se liberan hacia la atmósfera, sucede que se deja mayor cantidad de suelo sin utilizar pero no se evidencia un cambio en el patrón de uso del suelo con pasturas. Lo que sucede cuando se pasa del escenario base a la primera restricción es que se dejan de utilizar todas las pasturas mejoradas y sistemas silvopastoriles para usar en todos los suelos pasturas naturales (ver figura 10 y 11).

Figura 10. Cambio del uso de los suelos como respuesta a las restricciones en la emisión de N₂O.

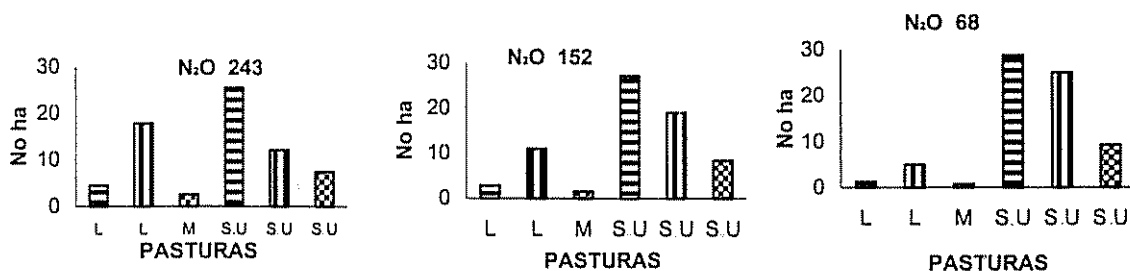
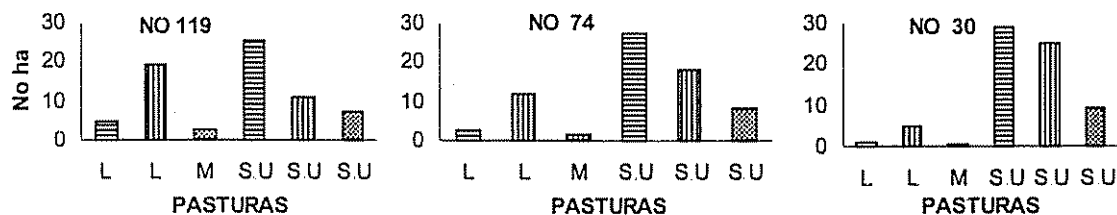


Figura 11. Efecto de la disminución en la cantidad de NO que puede ser emitido desde el suelo a la atmósfera sobre el uso de suelos.



También se nota que la restricción en la emisión de gases es el factor que más afecta los ingresos netos del productor, comparado con la disminución de minerales en el suelo. En las ecuaciones de regresión lineal se nota que la pendiente de la curva que relaciona los ingresos netos con la cantidad de N₂O emitido es 0.0067; al contrario la más baja es la del efecto de la disminución del P que tiene una pendiente de 0.00025 (ver figura 12, tablas 24 y 25).

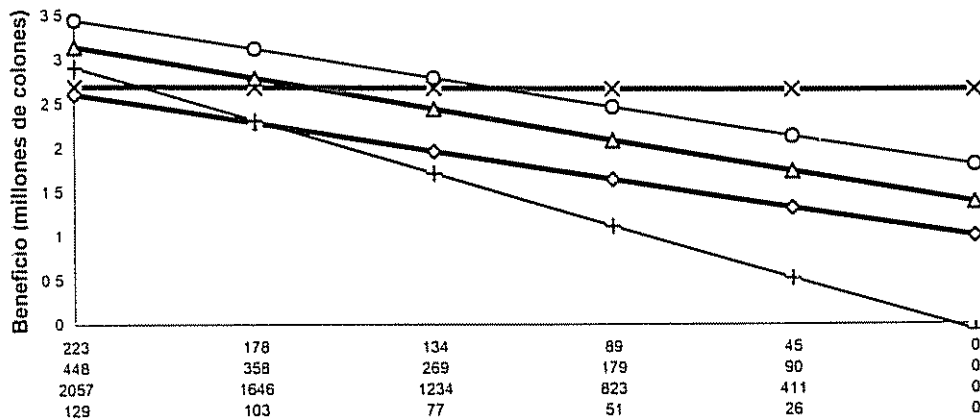
Tabla 24. Parámetros productivos de la finca según las restricciones de N₂O cedido hacia la atmósfera .

PARAMETRO	RESTRICCIÓN EN LA CANTIDAD DE N ₂ O EMITIDO A LA ATMÓSFERA (KG./AÑO/70 ha)				
	0	68	152	243	30000 (BASE)
Cantidad real de N ₂ O enviado a la atmósfera (kg./año)	0	45	101	162	540
Beneficio (millones de colones/año)	0	0.291	0.6495	1.0379	3.0476
Productos					
leche(kg./año)	0	4990	11142	17805	59743
carne(kg./año)					
terneros	0	353	789	1261	4230
vacas	0	385	861	1375	4614
madera (m ³ /año)	0	13	26	50	130
Mano de obra usada (jornales/año)	0	12	27	44	154
Precios sombra de la tierra (colones/ha).					
SFW	0	0	0	0	53158
SIW	0	0	0	0	48430
SFP	0	0	0	0	0

A medida que se hace más fuerte la restricción sobre los gases el modelo disminuye la cantidad de tierra productiva, pero mantiene el tipo de pastura. Debido a esto la cantidad de productos disminuye ostensiblemente. Por esta razón se decidió correr modelos con emisiones de gases, iguales a las encontradas por Veldkamp *et al* (1994), en pasturas naturales (las menores en los tres sistemas de pasturas analizadas por ellos). Además se sometió el modelo a que debía utilizar toda la tierra disponible (70 ha) y con una capacidad de carga promedio de 1 UA/ha.

Tabla 25. Parámetros productivos de la finca según las restricciones de NO cedido hacia la atmósfera.

PARAMETRO	RESTRICCIÓN EN LA CANTIDAD DE NO EMITIDO A LA ATMÓSFERA (KG./AÑO/70 ha)				
	0	30	74	119	30000 (BASE)
Cantidad real de NO enviado a la atmósfera (kg./año)	0	20	49	80	271
Beneficio (millones de colones/año)	0	0.2774	0.685	1.106	3.0476
Productos					
leche(kg./año)	0	4771	11776	18996	59743
carne(kg./año)					
terneros	0	338	834	1345	4230
vacas	0	368	910	1467	4614
madera (m ³ /año)	0	12	26	50	130
Mano de obra usada (jornales/año)	0	12	29	47	154
Precios sombra de la tierra (colones/ha).					
SFW	0	0	0	0	53158
SIW	0	0	0	0	48430



Valores máximos de emisión de gases y disminución de nutrientes

—◇— N $Y = 1,005884 + 0,00093313X$	—×— P $Y = 2,662271 + 0,000252674X$
—○— K $Y = 1,8118516 + 0,00079614X$	—+— N ₂ O $Y = - 0,07199 + 0,0066576X$
—△— NO $Y = 1,3876 + 0,007879X$	

Figura 12. Efecto de las restricciones ambientales sobre el ingreso neto

Con este escenario se encontraron los siguientes resultados: Beneficio neto de 32 dólares/ha/año; con una emisión de 5.6 Kg de N_2O y 2.7 kg. de NO /ha /año. Todo el SFW fue utilizado con Estrella fertilizada; el SIW fue utilizado con Estrella no fertilizada (4.63 ha) y con naturales (25.37 ha) y el SFP fue utilizado con Tanner fertilizado.

DISCUSION

La producción de pasturas tropicales es limitada por la disponibilidad de nitrógeno, a pesar del hecho de que la materia orgánica del suelo contiene relativas altas cantidades de este elemento. Esto es explicado por la deficiente tasa de mineralización, a través de la cual el nitrógeno se hace disponible para la nutrición de las plantas (Toledo, 1994). Solo un 1% del nitrógeno presente en el suelo del sistema radical de las plantas, es mineralizado hacia formas disponibles para la nutrición de las plantas (Henzell, 1968).

La restricción en la disminución de nutrientes siempre trae como consecuencia una disminución en los ingresos netos. Esto es debido a que en los modelos económicos nunca se valora la cantidad de nutrientes que son extraídos desde el suelo y no son reemplazados. Los resultados encontrados en el presente trabajo están de acuerdo con lo encontrado por Bouman *et al* (1998c), en análisis de modelos con diferentes cargas y con sistemas de engorde y de cría. La disminución de N en ese estudio fue de 62 kg. de N ha⁻¹ año⁻¹. Con esta disminución, la pastura pasó de producir 15 t de MS y soportar una capacidad de carga de 2.6 UA ha⁻¹ a una producción de 8-10 t de MS ha⁻¹ año⁻¹.

Sin embargo, en el presente trabajo, cuando no se pusieron restricciones en los nutrientes ni en los gases, se encontró una pérdida de 30 kg. ha⁻¹ año⁻¹, que son la mitad de las reportadas por, en *Brachiaria decumbens* (Velkamp, 1993). Esto debido a que los niveles de producción fueron más bajos, al igual que la capacidad de carga. La otra razón es que al modelo se le ofrecieron todos los tipos de pasturas y de sistemas silvopastoriles modelados. Esto le permite al modelo seleccionar asociaciones de Bb-Ap, las cuales tienen una alta capacidad de fijar N.

Las diferencias en el nivel de producción se ven reflejadas en el nivel de ingresos netos. En el presente estudio fue de 170 \$ ha⁻¹ año⁻¹, comparado con 240 reportado por Bouman y Nieuwenhuyse (1998) para sistemas de engorde y de 106 \$ ha⁻¹ año⁻¹, para sistemas de cría (Bouman y Nieuwenhuyse, 1998).

Bouman *et al* (1998b) encontraron que solo los SFP son utilizados cuando se restringe el modelo a no disminuir el N del suelo. Toda la otra área es abandonada. Esto concuerda con lo encontrado en este estudio, la diferencia radica en que, este estudio le ofreció al modelo sistemas silvopastoriles con capacidad de fijar N (pasturas en callejones) y con mayor capacidad de disminuir la pérdida de nutrientes por lixiviación en el suelo (Abarca, sin publicar). Para estos autores el nivel de producción sostenible sobre pasturas naturales será de 5 t de MS ha⁻¹año⁻¹, con lo cual se obtendrán unos ingresos netos de 7 \$ ha⁻¹año⁻¹. Esa cifra es más baja que la encontrada en el presente estudio que fue de 36 \$ ha⁻¹año⁻¹, sin embargo, la diferencia se debe a que el modelo del presente trabajo pudo utilizar los SFW con una pastura con capacidad de fijar N y la producción de madera para la venta.

En otro estudio realizado por Bouman y Nieuwenhuys, (1998), se encontró que cuando se le ofreció al modelo pasturas naturales y asociaciones de gramínea-leguminosa con restricciones en la pérdida de N, el modelo solo puso el 26% de los SFW en la asociación bajo sistemas de engorde. En el presente estudio, el 100% de este tipo de suelo fue puesto en pastura en callejones.

Cuando se comparan sistemas de pasturas con sistemas de cultivo, se encuentra que una gran proporción de los nutrientes retornan al sistema planta-suelo a través de las heces de los animales y los residuos de la planta, es decir, la extracción de nutrientes es muy inferior. Sin embargo, el paso del nitrógeno a través de las heces y orina de los animales significan grandes pérdidas del elemento. Cerca del 80% del N es perdido por volatilización, denitrificación y lixiviación en el suelo donde la orina es depositada (Ball y Rayden, 1985).

El P, por su poca movilidad en el sistema tiene muy poco impacto en el análisis de sostenibilidad. En este estudio se mostró poco cambio en el patrón de uso de pasturas con diferentes intensidades de restricción en la disminución de este elemento en el suelo. A pesar de que el elemento más caro en el mercado de los fertilizantes, las pocas pérdidas que ocurren cuando es aplicado, hacen de la fertilización fosfatada una forma adecuada de reemplazar el elemento extraído. En este estudio se encontró que la utilización de Estrella fertilizada es una opción adecuada para disminuir las pérdidas de este elemento.

Con el K, que es un elemento móvil, ocurrió todo lo opuesto. En suelos bien drenados y sometidos a un régimen de lluvia fuerte como el que ocurre en la zona de estudio, las pérdidas de este elemento por lixiviación, pueden ser bastante importantes y llegar a limitar la producción. En este estudio se modelaron las pasturas con diferentes patrones de lixiviación, asumiendo el hecho de que el enraizamiento de los árboles pueden absorber nutrientes de estratos más profundos del suelo. En este sentido el modelo eligió siempre pasturas en callejones que posibilitan un mejor ciclaje del nutriente en el sistema y puede disminuir sus pérdidas.

La limitación mayor con relación al K se debe a las pérdidas del nutriente desde el suelo ya que la extracción en productos animales en pasturas tropicales es muy baja (Serrão *et al*, 1979). Por ello es necesario diseñar sistemas que permitan disminuir las pérdidas a través de la lixiviación.

Bouman y Nieuwenhuys (1998) concluyen en su estudio que los productores de la Zona Atlántica no tienen incentivos, con los precios actuales de leche y carne para reemplazar las pasturas naturales, mientras no hayan restricciones de sostenibilidad. Sin embargo, en el presente estudio se encontró que sin restricciones de sostenibilidad, los finqueros pueden utilizar los SFW con pasturas en callejones, o en su defecto con BbAp-PT. Bouman *et al* (1998c) encontraron que los altos costos de establecimiento y de los fertilizantes hacen no factibles el uso de pasturas fertilizadas, lo cual está de acuerdo con el presente trabajo.

La emisión de N_2O y NO tienen un patrón similar, y se encuentra que con pasturas con mayores producciones hay mayor emisión. Al existir mayor producción de forraje, existe mayor producción de orina y heces que tienen la posibilidad de producir rápidamente estos gases. En el presente estudio se encontró, con comportamientos similares para los dos gases, que las restricciones en cuanto a la cantidad de gases emitidos hacia la atmósfera, no tienen efecto en el patrón de pasturas utilizadas.

Cuando se restringe la cantidad de N_2O y NO emitido, lo que hace el modelo es elegir las pasturas con más baja producción y a la menor carga posible. De esta manera, se deja mayor cantidad de terreno sin utilizar.

La cantidad de N₂O emitida en el escenario base fue de 8 kg. de N₂O ha⁻¹ año⁻¹ que está cercana a la encontrada por Bouman *et al* (1998c), que fue de 13 kg. y la de Velkamp *et al* (1993) que fue para pasturas naturales de 3.94 y de 7.2 kg. para asociaciones de *B. brizantha* - *A. pintoii* sin fertilizar. Es de resaltar que en el presente trabajo se encontró que una emisión nula de gases es imposible, pues no existe ningún sistema de pasturas que no produzca emisión de gases, con los sistemas de ganadería bajo pastoreo.

Los gases invernadero son un problema mundial y es difícil que un productor pueda pensar en disminuir las emisiones de gases, deteriorando su productividad. Sin embargo, en este sentido es más importante pensar en el CO₂, cuya participación en el efecto invernadero es mucho mayor. Según Bouman *et al* (1998c), la fijación de este compuesto se mejoró con pasturas mejoradas que tuvieron una alta relación de biomasa de raíz: biomasa de tallo. El pago de incentivos de fijación de CO₂ en pasturas puede contribuir en este sentido. En esta forma, los intereses de los productores irán en la misma orientación que los intereses de la sostenibilidad mundial.

CONCLUSIONES

En las condiciones de precios de insumos y de productos actuales y los altos costos de establecimiento de las especies, una parte de la finca debe ser establecida en pasturas mejoradas o sistemas silvopastoriles para mejorar la rentabilidad. Al contrario, los productores de la Zona Atlántica de Costa Rica están suministrando altas cantidades de suplementos que en este estudio no fueron viables económicamente, antes que mejorar sus pasturas.

Los sistemas silvopastoriles, bajo las condiciones analizadas pueden ser una forma adecuada de producir para disminuir la pérdida de nutrientes en el suelo. Sin embargo, es necesario cuantificar, en ambientes de alta lluvia con suelos de buen drenaje, la capacidad que tienen estos sistemas de disminuir las pérdidas de compuestos por lixiviación de manera más exacta.

Las pasturas en callejones son una forma sostenible desde el punto de vista biológico y económico en SFW, debido a su capacidad de fijar Nitrógeno y de disminuir la lixiviación de nutrientes del suelo

Los aspectos de sostenibilidad estudiados tuvieron un efecto importante en la rentabilidad del sistema. De ellos los más importantes fueron la emisión de gases, pero al mismo tiempo son los más difíciles de controlar por los productores. En este sentido, la contribución de la ganadería parece estar en la fijación de C en los sistemas radicales de las pasturas.

De los nutrientes el más limitante fue el K, seguido por el N y por último el P. Incrementos en el precio pagado por los productos, pueden permitir a los productores producir con sistemas de pasturas mejoradas, con capacidad de fijación de nitrógeno y aplicaciones parciales de algunos nutrientes en forma de fertilizantes. Para ello es necesario que el margen entre el pago por los productos al productor y lo cobrado al consumidor sea menor. Ello requiere una mejora en la eficiencia del proceso de industrialización.

BIBLIOGRAFIA

- ARGEL, P. J.** 1992. Problemática del pasto ratana en Costa Rica. *In* Seminario Taller El Pasto Ratana (*Ischaemun ciliare*) en Costa Rica, Alternativa o Problemática en Nuestra Ganadería? (1992, San Carlos, Costa Rica). San José, Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos. P. 11-17.
- CATIE.** 1987. Agricultural research programme in the Atlantic Zone of Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/UAW/MAG. 16 p. (Atlantic Zone Programme Paper no 2)
- BALL, P. R.; RYDEN, J. G.** 1984. Nitrogen relationship in intensively managed temperate grasslands. *Plant and Soil.* 76: 23-33.
- BOUMAN, B. A. M.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H.** 1998a. PASTOR: A technical coefficient generator for pasture and livestock systems in the humid tropics, version 2.0. A user's guide. Guápiles, Costa Rica, REPOSA. 59 p.
- _____ ; **SCHIPPER, R. A.; NIEUWENHUYSE, A.; HENGSDIJK, H.; JANSEN, H: P. G.** 1998b. Quantifying economic and biophysical sustainability trade-offs in land use exploration at the regional level: a case study for the Northern Atlantic Zone of Costa Rica. *Ecological Modeling* (in press)
- _____ ; **NIEUWENHUYSE, A.; IBRAHIM, M.** 1998c. Pasture degradation and its restoration by legumes in humid tropical Costa Rica. *Tropical Grasslands* (in press)
- _____ ; **NIEUWENHUYSE, A.** 1998. Exploring sustainable beef cattle farming options in the humid tropics; a case study for the Atlantic Zone of Costa Rica. *In* International Seminar on Agrarian Policies: 'A Decision Making Opportunity' (1998, Heredia, Costa Rica). Pre-proceedings. Heredia, Universidad Nacional. 23 p.
- BROOKE, A.; HENDRICK, D.; MEERAUS, A.** 1992. GAMS. Release 2.25. A user's guide. Boyd & Fraser publishing company. Estados Unidos. 289 p.
- FAO.** 1993. Forest resources assesment 1990, tropical countries. FAO Forestry Paper no 112. 68 p.
- FRENCH, J. B.** 1994. Current status and trends in animal agriculture in Central America. *In* Animal agriculture an natural resources in Central America: strategies for sustainability. Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 9-22.
- HECKADON, S.** 1984. Panama's expanding cattle front: The Santeño campesinos and the colonization of the forest. Ph. D. thesis. Essex, UK, University of Essex. 297 p.
- HENZELL, E. J.** 1968. Sources of nitrogen for Queensland pastures. *Tropical Grasslands.* 2: 1-17.

- HILLIER, P. B. R.; LIEBEZMAN, G. J.** 1986. Introduction to operations research. 4 ed. Hoden Day, EE.UU. 887 p.
- HORDWARD, P.** 1988. Cattle subsystem expansion in Honduras and Nicaragua: The creation of a relative surplus population as a primordial cause of deforestation. In World Rural Sociology Congress (7, 1988, Bologna, Italy). Proceedings. p: 45-70.
- IBRAHIM, M.** 1994. Productivity, persistence and compatibility of grass-legume mixtures for sustainable animal production in the Atlantic Zone of Costa Rica. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Wageningen Agricultural University. 129 p.
- _____ ; **HOLMANN, F.; HERNANDEZ, M.; CHANA, C.** 1998. Forage yield and live weight gains of steers of grazing unimproved pastures with daily browsing of *Erythrina* protein banks and or supplementation of green bananas of the humid tropics of Costa Rica. Aprobado en Agroforestry Systems.
- KAIMOWITZ, D.** 1996. Livestock and deforestation Central America in the 1980s: A policy perspective. Jakarta, Indonesia. Center for International Forestry research. 88 p.
- KELLER, M.; VELDKAMP, E.; WEITZ, A. M.; REINERS, W. A.** 1993. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. Nature 365: 244-246.
- _____ ; **REINERS, W. A.** 1994. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. Global Biochemical Cycles. 8 (4): 399-409.
- LEEUVEN, A. C. J. VAN; HOFSTEDE, A. M.** 1995. Forest, trees and farming in the Atlantic Zone of Costa Rica. An evaluation of the current and future integration of trees and forest in farming systems in the Atlantic Zone of the Costa Rica. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico no 257. 48 p.
- LI, C.; FROLKING, S.; FROLKING, T. A.** 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research. 97 (D9): 9759-9776.
- MANNETJE, L. T'; IBRAHIM, M.** 1989. Pasture degradation and restoration in Costa Rica in relation to production and biodiversity. (En prensa)
- KELLER, M.; VELDKAMP, E.; WEITZ, A. M.; REINERS, W. A.** 1993. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. Nature 365: 244-246.
- _____ ; **REINERS, W. A.** 1994. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. Global Biochemical Cycles. 8 (4): 399-409.

- LEEUWEN, A. C. J. VAN; HOFSTEDE, A. M.** 1995. Forest, trees and farming in the Atlantic Zone of Costa Rica. An evaluation of the current and future integration of trees and forest in farming systems in the Atlantic Zone of the Costa Rica. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico no 257. 48 p.
- NICHOLSON, C. F.; LEE, D. R.; BOISVERT, R. N.** 1994. An optimization model of the dual purpose cattle production system in the humid lowlands of Venezuela. *Agricultural Systems*. 46: 311-334.
- NIEUWENHUYSE, A.** 1996. Soils, geology and soils-related sustainability aspects of the perhumid tropical Limon Basin, Costa Rica. CATIE (C.R.). Serie Técnica. Informe Técnico no 272. 85 p.
- PAZ, N.** 1996. Optimización de sistemas de producción animal de doble propósito en la Zona Atlántica de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 132 p.
- SADER, S. A.; JOYCE, A. T.** 1988. Deforestation rates and trend in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20: 11-19.
- SERRÃO, E. A.; TOLEDO, J. M.** 1992. Sustaining pasture based production system for the humid tropics. *In* Development or destruction, the conversion of tropical forest to pasture in Latin America. Eds. S. Downing; H. Pearson; C. Garcia Downing. Boulder, Westview Press. p. 257-280.
- SERRÃO, E. A. et al.** 1979. Productividad de praderas cultivadas en suelos de baja fertilidad de la Amazonía de Brasil. *In* Producción de pastos en suelos ácidos de los trópicos. Eds. L. Tergas; P. Sánchez. Cali, Colombia. CIAT. p.: 215-243.
- STOORVOGEL, J. J.** 1993. Optimizing land use distribution to minimize nutrient depletion: a case study for the Atlantic Zone of Costa Rica. *Geoderma* 60: 277-292.
- STOORVOGEL, J. J.** 1995. Linking GIS and models: Structure and operationalisation for a Costa Rica case study. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 43: 19-30.
- TOLEDO, J. M.; Y SERRÃO, A.** 1984. Proyecto de investigación en pasturas y ganadería. Lima, Perú, REDINA. 71p.
- TOLEDO, J. M.** 1994. Livestock productions on pasture: parameters for sustainability. *In* Animal agriculture an natural resources in Central America: strategies for sustainability; Proceedings of a Symposium/Workshop. Ed. J. Homan. San José, Costa Rica. p. 125-136.
- VELDKAMP, E.** 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Ph. D. Thesis. Wageningen, Netherlands, Agriculture University of Wageningen. 117 p.

_____; KELLER, M.; NUÑEZ, M. 1998. Effects of management on N₂O and NO emissions from passture soils in the humid tropics of Costa Rica. (Submitted to Global Biogeochemical Cycles)

CONCLUSIONES GENERALES

Los precios actuales de leche y carne y los altos costos de establecimiento de las especies son un limitante para la implementación de pasturas mejoradas y sistemas silvopastoriles. En este sentido, se deben mejorar los sistemas de industrialización y mercadeo que permitan pagar un mejor precio al productor sin incrementos para el consumidor. A pesar de esto, se ve en el presente trabajo, la necesidad de que los productores siembren una parte de su finca en asociaciones de *B. brizantha* y *Arachis pintoi* sobre los suelos fértiles bien drenados.

Con la siembra de un 10-15% del área de la finca, se pueden mantener ingresos netos a pesar de que la leche y la carne disminuyan un 25% del precio nominal actual. Lo anterior garantiza, un aspecto importante de sostenibilidad económica del sistema. Sin embargo, esto debe estar acompañado de cercas vivas de poró enriquecidas con teca. Además es necesario que en las fincas se siembren pequeñas áreas con plantaciones de teca.

Bajo estas condiciones se encuentra que el precio de la madera tendrá un efecto importante en el uso de la tierra. Cuando este un 25% superior al precio actual, gran cantidad de la finca (45%) debe ser establecida con *Arachis pintoi*-*B. brizantha*.

El precio marginal de los suelos siempre fue inferior al precio encontrado en las entrevistas, por lo cual la tierra tiene un costo de oportunidad bastante elevado. Así, es posible que muchos terrenos sean destinados a otro tipo de cultivos que están siendo exportados, que producen un nivel de rentabilidad mayor. Para evitar esto los productores deben incrementar el nivel de producción por unidad de área.

En la actualidad la disponibilidad de mano de obra no es limitante para el establecimiento de pasturas mejoradas y sistemas silvopastoriles, sin embargo, su costo se presenta como limitante para el incremento en la producción.

La emisión de óxido nítrico y óxido nitroso son consecuencias inevitables en los sistemas de producción actuales, que podrían restringir el volumen de producción de carne y leche

en el trópico. Sin embargo, la fijación de carbono por el sistema radical de las pasturas mejoradas y de los sistemas silvopastoriles podrán tener un efecto benéfico de mayor impacto que el efecto negativo de los gases de nitrógeno mencionados.

Con relación al balance de nutrientes, el modelo muestra unas pérdidas importantes en el suelo, por lixiviación de potasio y nitrógeno, principalmente. Sin embargo, las pasturas en callejones pueden ser una alternativa que disminuya la pérdida de nutrientes del sistema.

Los ganaderos de la Zona Atlántica en la actualidad, usan un nivel importante de suplementos animales (melaza, banano, concentrado, urea) y muy pocos tienen pasturas mejoradas. Los escenarios evaluados, siempre mostraron como una opción más viable económica y ecológicamente, los sistemas silvopastoriles y las pasturas mejoradas.

Se deben diseñar escenarios más complejos bajo un diseño factorial que permita analizar estadísticamente el efecto de los insumos y los productos más importantes.

La metodología, es una herramienta adecuada para la evaluación y análisis de diferentes escenarios socioeconómicos de diferentes opciones de producción. Se logran hacer análisis rápidos y poco costosos de gran cantidad de situaciones que permiten tomar decisiones en forma rápida y adecuada a planificadores y productores. Sin embargo, requiere de precisión en la información básica utilizada para asegurar confiabilidad en los resultados.

RECOMENDACIONES

Se requiere hacer transferencia de tecnología en términos de la utilización del forraje proveniente de las cercas vivas de poró, ya que son una opción que mostró ser rentable en todos los escenarios corridos. Esto va acompañado de un cambio en la mentalidad de los productores de la zona respecto a la utilización de suplementos que aparentemente son baratos, pero no son económicamente adecuados.

En la zona se debe enfatizar la transferencia de tecnología respecto al enriquecimiento de las cercas vivas con maderables. En el caso analizado, la teca resultó ser una muy buena opción, pero es posible utilizar otras especies que muestren buenos comportamientos en plantaciones en línea.

Bajo las condiciones analizadas, resulta adecuado que los productores establezcan un porcentaje variable de su finca en pasturas en callejones y en asociaciones de gramínea-leguminosas. Estas resultaron ser más rentables que los suplementos que se están dando a los animales. También muestran un adecuado comportamiento en términos de conservar por un mayor tiempo la fertilidad natural del suelo.

Se debe hacer investigación sobre enriquecimiento con maderables en las pasturas en callejones. Aparentemente, esto puede mejorar la rentabilidad del sistema con una disminución muy baja en la producción de forraje.

El uso de este tipo de metodologías requiere información detallada. Por ello, se debe hacer investigación que determine diferencias cuantitativas en el uso de pasturas naturales y mejoradas. Además es necesario determinar la capacidad genética real de los hatos de la zona que permita desarrollar escenarios con diferentes niveles de intensidad en la producción.

Es necesario hacer estudios que permitan determinar exactamente la capacidad de reciclaje de nutrientes en los sistemas silvopastoriles comparados con las pasturas naturales, bajo

condiciones de pastoreo. La precisión en este tipo de información dará mayor confianza en los resultados arrojados por los modelos de maximización.

En el mismo sentido, se requiere comparar las fijaciones de carbono en los sistemas radicales de silvopasturas y de pasturas mejoradas con las pasturas naturales. A partir de esto, se pueden determinar cobros por servicios ambientales con el establecimiento de pasturas mejoradas.

El estudio se debe continuar para comparar porque los productores no producen en la forma que lo señalan los modelos. Esto hace la metodología iterativa y puede ayudar a determinar algunos vacíos en la información utilizada para mejorar los modelos.

Anexo 1.

Significado de las variables que participan en las ecuaciones de la función objetivo y de las ecuaciones restrictivas.

Tipo VARIABLES	Descripción	Unidades
A_h	Sistema de producción animal por tipo de hato	hato año ⁻¹
F_{fm}	Sistema de suplementación por tipo de alimento y por periodo	kg. año ⁻¹
P_{spr}	Sistema de producción de pastos, para un tipo de suelo, una especie y una carga.	ha año ⁻¹
Z	Valor de la función objetivo	colones año ⁻¹
COEFICIENTES		
c_h	Costos anuales de las entradas para un sistema de producción animal	colones hato ⁻¹ año ⁻¹
c_f	Costos anuales de las entradas por un sistema de suplementación	colones kg ⁻¹ año ⁻¹
c_{spr}	Costos de las entradas anuales para un sistema de producción de pasturas	colones ha ⁻¹ año ⁻¹
d_{spr0}	mínimo de nutrientes para un sistema de producción de pasturas	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹
g_{sprd}	Cantidad de gases emitidos por un sistema de pasturas	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹
h_h	Tamaño del hato	UGG ha ⁻¹
l_h	Uso anual de mano de obra para un sistema de producción animal	jornales hato ⁻¹ año ⁻¹
l_s	Uso anual de mano de obra para sistema de suplementación animal	jornales kg ⁻¹ año ⁻¹
l_{sp}	sistema de suplementación animal	jornales ha ⁻¹ año ⁻¹
n_{sprmm}	Nutrientes producidos por un sistema de producción de pasturas	kg. periodo ⁻¹ ha ⁻¹
n_{hnm}	Nutrientes requeridos por un sistema de producción animal	Mcal periodo ⁻¹ ha ⁻¹
n_{fn}	Nutrientes suministrados por un sistema de suplementación	Mcal periodo ⁻¹ ha ⁻¹
P_j	Precio de los productos por producto	Mcal periodo ⁻¹ ha
s_s	Máxima cantidad de suelo aprovechable	colones kg ⁻¹
sr_{spr}	Carga sobre un sistema de producción de pastos	ha
y_j	Producción anual animal para un sistema de producción animal	UGG ha ⁻¹
w	Valor del jornal rural	kg. año ⁻¹
INDICES		
f	tipos de suplementos alimenticios (melaza, banano, concentrado)	colones día ⁻¹
j	Productos (carne de vacas adultas, carne de terneros destetes, leche y madera)	
h	tipo de hato (doble propósito)	
m	Periodo de producción de pastos (bajo y alto)	
n	Tipo de nutriente (proteína, energía metabolizable, potasio, fósforo)	
p	Tipo de pasturas (mejoradas, naturales, mezclas gramínea leguminosa, sistemas silvopastoriles)	
r	capacidad de carga de la pastura	
s	tipo de suelo (SFW, SIW, SFP)	
d	Tipo de mineral del suelo (N, P, K) o tipo de gas (NO o N ₂ O)	

Modificado de Bouman y Nieuwenhuysse, 1998.

Anexo 2.

PASTOS	COSTOS COLONES/HA/AÑO	PRODUCCION DE MADERA (m ³ año ⁻¹ año ⁻¹)	USO DE MANO DE OBRA (jornales año ⁻¹)
ESTRELLA	19839	2.2	3.64
BRACHIARIA	23115	2.2	3.51
TANNER	8973	0	2.73
BRACHIARIA-ARACHIS	21385	2.2	9.67
BANCO DE PROTEINA	26029	0	15.91
PLANTACIONES	9720	10	18.67
PASTURA EN CALLEJONES	16916	2.2	14.12
NATURAL	7099	2.2	2.43