



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Modelación de dietas para la reducción de  
emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) entérico en  
bovinos y su potencial de adopción por  
parte de productores ganaderos del  
Piedemonte llanero**

**Jesús David Martínez Salgado**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de posgrados  
Palmira, Colombia

2018



# **Modelación de dietas para la reducción de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) entérico en bovinos y su potencial de adopción por parte de productores ganaderos del Piedemonte llanero**

**Jesús David Martínez Salgado**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ciencias Agrarias**

Director

Hugo Sánchez Guerrero, MSc

Línea de Investigación:

Producción Animal Tropical

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrados

Palmira, Colombia

2018

*A mi madre de quien aprendí todos los días que  
siempre hay que seguir adelante a pesar de los  
tropiezos, hasta conseguir todo lo que uno se  
proponga.*

*A mi padre quien me ha mostrado con su ejemplo  
que hay que esperar con optimismo lo que cada día  
traerá a nuestra vida.*

*A mi querida Mabel Natalia, quien es y seguirá  
siendo el ombligo de mi vida.*

## **Agradecimientos**

Mis principales agradecimientos son para el Centro Internacional de Agricultura tropical (CIAT), entidad en donde trabajo desde hace 5 años y que ha sido la institución que me apoyo con la mayoría de datos para este trabajo y con el tiempo para su desarrollo.

Dentro de CIAT, un agradecimiento especial al equipo de trabajo del Dr. Jeimar Tapasco, principalmente a Laura Patricia Serna MSc., Eliana Vallejo Est. y Samy Andres Mafla Econ., con quienes conjuntamente construimos el primer capítulo de este trabajo.

A los ganaderos del Piedemonte llanero, quienes tuvieron la disposición para contestar las encuestas que les realizamos.

A Pablo Zapata MSc., quien me apoyo con la transcripción del modelo de programación lineal

A los funcionarios de la Federación de Ganaderos de Colombia (FEDEGAN), principalmente a Andres Zuluaga MSc. y Manuel Gómez, Zoot., por su disposición a compartir información sobre sus iniciativas y trabajos adelantados en la región de estudio.

A Alejandro Ruden Zoot., estudiante de maestría de la Universidad de Caldas quien durante su trabajo de grado apoyó con sus experiencias en la validación del modelo Ruminant, varios de los aspectos discutidos en este documento.

Finalmente, a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo.



## Resumen

En este trabajo se realizó la tipificación de las fincas ganaderas en la región del piedemonte llanero y las estimaciones modeladas de las emisiones de metano que cada una de ellas genera. También se evaluaron cinco escenarios de reconversión sostenible para reducir las emisiones de metano y se evaluó el potencial de adopción de cada escenario, de acuerdo a las condiciones socioeconómicas de cada ganadero tipo. Se clasificaron seis tipos diferentes de ganaderos los cuales usan básicamente los mismos forrajes, pasturas degradadas en su mayoría, pero en diferentes proporciones. Se determinó que las emisiones actuales de metano por unidad de producto (leche o carne) son mayores en las fincas menos tecnificadas; sin embargo, la reconversión productiva de estas fincas es más difícil, principalmente por su tamaño. Se encontró que todos los tipos de productores pueden adoptar algunas de las tecnologías de reconversión productiva evaluadas, incrementado sus ingresos, en el mejor de los casos, por encima del 700% en un periodo de 10 años y reduciendo hasta en un 47% las emisiones de metano generadas. La implementación de cercas vivas a largo plazo fue la medida con mejor retorno económico y una de las más adoptadas, mientras que los bancos forrajeros, los concentrados comerciales y el silo de maíz no tuvieron tanta acogida, principalmente por los requerimientos de mano de obra y altos costos de implementación. El acceso a crédito y la posibilidad de vender mano de obra fueron los principales factores para incrementar la tasa de adopción de las diversas medidas.

**Palabras clave: (Tipificación, Intensificación productiva, Emisiones de Metano, Mitigación, Modelación, Programación lineal).**

## Abstract

In this work cattle ranchers in the Piedmont of the eastern plains of Colombia were classified the estimations of the emission of methane that each of them generates. Also there were evaluated five scenarios of sustainable restructuring to reduce the emission of methane and was evaluated the potential of adoption of every scenario, of agreement to the socioeconomic conditions of every cattle ranchers type. There are six different types of cattle ranchers which use the same forages, degraded pastures in the main, but in different proportions. One determined that the current emission of methane for unit of product (milk or meat) is major in the lower technificated cattle ranchers nevertheless the productive restructuring of these estates is more difficult, principally for its size. All types of producers can adopt some of the technologies of productive restructuring evaluated, increased its incomes, at best, over 700 % in a period of 10 years and reducing even in 47 % the emission of methane generated. The implementation of alive long-term fences was the technology with better economic return and one of the most adopted, whereas the forage banks, the commercial concentrates and the silo of maize did not have the expected reception, principally because of the requirements of workforce and high costs of implementation. The access on credit and the possibility of selling workforce were the main factors to increase the rate of adoption of the diverse technologies.

**Keywords: (Typification, Production intensification, Methane emissions, Mitigation, Modeling, Linear programming).**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
Alcance del estudio.....	3
Organización del documento .....	3
<b>1. Área de estudio</b> .....	<b>5</b>
1.1 Introducción.....	5
1.2 Selección de la zona de estudio .....	7
Referencias .....	8
<b>2. Tipificación socioeconómica de los ganaderos de la región del piedemonte llanero y sus sistemas de producción bovina</b> .....	<b>9</b>
2.1 Introducción.....	9
2.2 Metodología .....	11
2.2.1 Recolección de información .....	11
2.2.2 Análisis y procesamiento de datos.....	11
2.2.3 Agrupamiento de fincas .....	13
2.2.4 Estimación del error de muestreo .....	13
2.3 Resultados y discusión.....	14
2.3.1 Características generales de los sistemas ganaderos del piedemonte .....	14
2.3.2 Tipos de sistemas de producción ganadera.....	21
▪ Grupo 1 Productores pequeños orientados a la cría (Cr_P).....	22
▪ Grupo 2 Productores grandes orientados a la cría (Cr_G) .....	23
▪ Grupo 3. Productores pequeños con orientación a ceba (Ce_P) .....	23
▪ Grupo 4. Productores grandes con orientación a ceba (Ce_G).....	24
▪ Grupo 5. Productores pequeños con orientación al doble propósito (DP_P) ..	24
▪ Grupo 6. Productores grandes con orientación al doble propósito (DP_G) ....	25
2.4 Conclusiones.....	25
Referencias .....	27
<b>3. Comparación entre las emisiones de metano entérico asociadas a dietas típicas de los sistemas ganaderos del piedemonte llanero y cinco escenarios de cambio en las dietas.</b> .....	<b>29</b>

3.1	Introducción .....	29
3.2	Metodología .....	32
3.2.1	Estimación de las emisiones de metano.....	32
3.2.2	Modelo de rumen (Ruminant) .....	35
3.2.3	Dietas típicas.....	37
3.2.4	Escenarios de mejoramiento en las dietas .....	38
3.2.5	Estimación de la producción y las emisiones por tipo de hato .....	40
3.3	Resultados y discusión .....	41
3.3.1	Emisiones asociadas a los sistemas ganaderos actuales.....	41
3.3.2	Emisiones esperadas con implementación de escenarios de cambio en las dietas .....	45
3.3.3	Comparación de la eficiencia productiva de los sistemas ganaderos estudiados .....	47
	▪ Emisiones por producción de carne.....	47
	▪ Emisiones por producción de leche .....	49
3.4	Conclusiones .....	50
	Referencias .....	53
<b>4.</b>	<b>Determinación de la viabilidad económica de la adopción de dietas para la reducción de emisiones de los sistemas ganaderos en el piedemonte llanero .....</b>	<b>59</b>
4.1	Introducción .....	59
4.2	Metodología .....	61
4.2.1	Modelo de programación lineal.....	61
4.2.2	Parámetros del modelo .....	63
4.3	Resultados y discusión .....	65
4.3.1	El modelo .....	65
4.3.2	Adopción de dietas mejoradas en productores pequeños orientados a cría (Cr_P).....	69
4.3.3	Adopción de dietas mejoradas en productores grandes orientados a cría (Cr_G).....	73
4.3.4	Adopción de dietas mejoradas en productores pequeños orientados a ceba (Ce_P) .....	77
4.3.5	Adopción de dietas mejoradas en productores grandes orientados a ceba (Ce_G).....	80
4.3.6	Adopción de dietas mejoradas en productores pequeños orientados a doble propósito (DP_P) .....	84
4.3.7	Adopción de dietas mejoradas en productores grandes orientados a doble propósito (DP_G).....	88
4.4	Conclusiones .....	92
	Referencias .....	94
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones generales .....</b>	<b>97</b>
5.1	Conclusiones .....	97
5.2	Recomendaciones .....	100

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1</b> Distribución de la lluvia en la región de estudio .....	6
<b>Figura 1-2</b> Localización de los municipios seleccionados .....	7
<b>Figura 2-1</b> Distribución porcentual de encuestas por municipio .....	14
<b>Figura 2-2</b> Edad de los administradores de las fincas.....	15
<b>Figura 2-3</b> Auto consumo y carga animal.....	16
<b>Figura 2-4.</b> Relación entre contratación y precipitación.....	17
<b>Figura 2-5</b> Porcentaje de fincas que se encharcan por cada municipio.....	18
<b>Figura 2-6</b> Composición de las praderas .....	19
<b>Figura 2-7</b> Tamaño de los hatos .....	19
<b>Figura 2-8</b> Tipo de Sistema de producción por municipio. ....	20
<b>Figura 2-9.</b> Distribución espacial por tipo de productor .....	22
<b>Figura 3-1</b> Esquema metodológico de estimación de emisiones y producción.....	40
<b>Figura 3-2</b> Emisiones totales por sistema de producción .....	41
<b>Figura 3-3</b> Aporte a las emisiones de cada finca tipo por grupo etario.....	42
<b>Figura 3-4</b> Emisiones de metano por animales en etapa de crecimiento .....	43
<b>Figura 3-5</b> Emisiones de metano por animales adultos.....	43
<b>Figura 3-6</b> Emisiones de metano y ganancia de peso vivo en un novillo de 250 kg bajo diferentes pasturas.....	44
<b>Figura 3-7</b> Emisiones de metano y producción de leche en una vaca de 430 kg bajo diferentes pasturas.....	45
<b>Figura 3-8</b> Emisiones de metano totales esperadas por sistema de producción .....	46
<b>Figura 3-9</b> Emisiones de metano y ganancia de peso vivo en un novillo de 250 kg bajo distintas alternativas alimenticias .....	46
<b>Figura 3-10</b> Emisiones de metano y producción de leche en una vaca de 430 kg bajo distintas alternativas alimenticias .....	47
<b>Figura 3-11</b> Producción potencial de carne bajo diferentes escenarios .....	48
<b>Figura 3-12</b> Emisiones de metano estimadas por kilogramo de carne producido bajo distintos escenarios.....	49
<b>Figura 3-13</b> Producción potencial de leche bajo diferentes escenarios.....	49
<b>Figura 3-14</b> Emisiones de metano estimadas por litro de leche producido bajo distintos escenarios.....	50
<b>Figura 4-1</b> Planteamiento modelo de programación lineal .....	63
<b>Figura 4-2:</b> Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Cr_P bajo los escenarios modelados.....	69
<b>Figura 4-3:</b> Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Cr_P .....	70

<b>Figura 4-4:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo Cr_P ....	71
<b>Figura 4-5:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo Cr_P ....	71
<b>Figura 4-6:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Cr_P ....	72
<b>Figura 4-7:</b> Porcentaje de reducción de emisiones de CH <sub>4</sub> por escenario de conversión	72
<b>Figura 4-8:</b> Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Cr_G bajo los escenarios modelados .....	73
<b>Figura 4-9:</b> Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Cr_G .....	74
<b>Figura 4-10:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo Cr_G ..	75
<b>Figura 4-11:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo Cr_G ..	75
<b>Figura 4-12:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Cr_G ..	76
<b>Figura 4-13:</b> Porcentaje de reducción de emisiones de CH <sub>4</sub> por escenario de conversión .....	76
<b>Figura 4-14:</b> Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Ce_P bajo los escenarios modelados .....	77
<b>Figura 4-15:</b> Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Ce_P .....	78
<b>Figura 4-16:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 y E4 para la finca tipo Ce_P .....	78
<b>Figura 4-17:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Ce_P ..	79
<b>Figura 4-18:</b> Porcentaje de reducción de emisiones de CH <sub>4</sub> por escenario de conversión .....	80
<b>Figura 4-19:</b> Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Ce_G bajo los escenarios modelados .....	81
<b>Figura 4-20:</b> Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Ce_G .....	81
<b>Figura 4-21:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo Ce_G ..	82
<b>Figura 4-22:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo Ce_G ..	83
<b>Figura 4-23:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Ce_G ..	83
<b>Figura 4-24:</b> Porcentaje de reducción de emisiones de CH <sub>4</sub> por escenario de conversión .....	84
<b>Figura 4-25:</b> Comparación de la capitalización al año 10 de la finca DP_P bajo los escenarios modelados .....	85
<b>Figura 4-26:</b> Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo DP_P .....	85
<b>Figura 4-27:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo DP_P ..	86
<b>Figura 4-28:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 y E5 para la finca tipo DP_P .....	87
<b>Figura 4-29:</b> Porcentaje de reducción de emisiones de CH <sub>4</sub> por escenario de conversión .....	87
<b>Figura 4-30:</b> Comparación de la capitalización al año 10 de la finca DP_G bajo los escenarios modelados .....	89
<b>Figura 4-31:</b> Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo DP_G .....	89
<b>Figura 4-32:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo DP_G ..	90
<b>Figura 4-33:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo DP_G ..	90
<b>Figura 4-34:</b> Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo DP_G ..	91
<b>Figura 4-35:</b> Porcentaje de reducción de emisiones de CH <sub>4</sub> por escenario de conversión .....	91

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1</b> Estimación de variables calculadas a partir de las encuestas .....	12
<b>Tabla 2-2.</b> Composición promedio de los tipos para el piedemonte.....	21
<b>Tabla 2-3</b> Distribución típica del hato del Grupo 2 .....	22
<b>Tabla 2-4</b> Distribución típica del hato del Grupo 1 .....	23
<b>Tabla 2-5</b> Distribución típica del hato del Grupo 3.....	23
<b>Tabla 2-6</b> Distribución típica del hato del Grupo 4.....	24
<b>Tabla 2-7</b> Distribución típica del hato del Grupo 5.....	24
<b>Tabla 2-8</b> Distribución típica del hato del Grupo 5.....	25
<b>Tabla 3-1.</b> Parámetros de los animales utilizados para este trabajo en Ruminant.....	36
<b>Tabla 3-2.</b> Parámetros de los forrajes actuales utilizados en Ruminant .....	38
<b>Tabla 3-3.</b> Parámetros de los alimentos utilizados en Ruminant para los escenarios.....	39



# Introducción

Los estudios realizados sobre el sector agropecuario en los cuales se desarrollan, adaptan o promueven tecnologías, en muchas ocasiones no tienen el alcance esperado ya que los resultados se quedan en documentos que no trascienden sobre los sistemas productivos reales.

Esto sucede principalmente porque no se considera a los productores en el momento del desarrollo de las tecnologías y éstas a su vez no se desarrollan con suficiente flexibilidad para ser adoptadas por una gran variedad de productores y sistemas productivos que existen en la realidad.

El fenómeno se agrava aún más cuando las políticas, tanto nacionales, regionales como locales, la falta de agremiación, cooperativismo, asistencia técnica, divulgación entre otros problemas, contribuyen a que la adopción de alternativas tecnológicas sea aún más difícil.

Otro de los aspectos importantes es la rentabilidad económica de la introducción de tecnologías a los sistemas productivos, lo cual determina en gran medida su implementación completa, parcial o su no implementación dependiendo de las características propias e intereses de cada empresario del sector agropecuario. Por lo tanto en el momento de hacer la transferencia de las tecnologías es muy importante resaltar las ventajas económicas de su implementación y ser claros en las condiciones que pueden potenciar o reducir su desempeño dentro del sistema productivo del productor.

Actualmente en el país existe una situación coyuntural para el sector agropecuario, que se encuentra bajo dos tipos de presión: la primera que corresponde a los mercados y las condiciones de acuerdos comerciales internacionales (por ejemplo el Tratado de Libre comercio con los Estados Unidos), que los obliga a ser más competitivos a nivel productivo y la segunda que los vincula al compromiso nacional de reducción de emisiones de gases

de efecto invernadero del sector agropecuario, que es uno de los sectores más importantes en este tema.

Por las razones antes descritas, con este trabajo se pretende aportar información y metodologías para la determinación conjunta de cuánto pueden mitigar los productores ganaderos de la región del piedemonte llanero, cuál es su capacidad de adopción de medidas de tecnificación y cuáles de estas medidas son las más rentables y más favorables para su sistema productivo.

Como objetivo general y con base en lo explicado anteriormente, se determinaron alternativas de reconversión productiva con base en alimentación, que son económicamente adoptables por los ganaderos bovinos del piedemonte llanero y a la vez reducen al máximo las emisiones de metano entérico de sus hatos.

Los objetivos específicos de este trabajo fueron:

- Tipificar socioeconómicamente a los ganaderos de la región del piedemonte llanero y sus sistemas de producción bovina.
- Modelar las emisiones entéricas de metano asociadas a los sistemas de producción bovina antes tipificados, a través del uso de modelos.
- Generar cinco escenarios de cambio en las dietas de los animales a través de una reconversión productiva de los sistemas tipificados.
- Modelar las emisiones entéricas asociadas a los cinco escenarios de cambio en las dietas de los animales antes realizados. Determinar los costos de implementación de los escenarios de reconversión productiva planteados y determinar con base en la tipificación socioeconómica, cuáles de estos son adoptables por los productores.

En el desarrollo de cada capítulo de este documento se realizará una introducción, metodología y abordaje específico a cada uno de los objetivos antes mencionados.

## **Alcance del estudio**

Este trabajo se desarrolló específicamente para los productores ganaderos de la región del piedemonte llanero del departamento de Meta. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para mejorar la promoción, transferencia, financiación y desarrollo de políticas locales para la implementación de medidas de tecnificación de los ganaderos.

El modelo desarrollado para evaluar la adopción óptima de tecnologías, podrá utilizarse para otros estudios, siempre y cuando se determinen los parámetros requeridos. Los coeficientes de emisiones calculados por los tipos de pastura, animales y sistemas productivos, pueden aportar a las comunicaciones nacionales de inventarios de gases efecto invernadero.

## **Organización del documento**

El documento está dividido en 5 capítulos, organizados de forma tal que la información y los análisis realizados en cada uno de ellos son utilizados en el siguiente. En el primer capítulo se hace una descripción corta de la región de estudio, incluyendo información climática, de suelos y productiva, así como la descripción de la selección de la zona a trabajar. El segundo capítulo describe la determinación de fincas y productores típicos de la región del piedemonte. El tercer capítulo, analiza con base en los hatos de las fincas típicas y los forrajes utilizados por ellas mismas, las emisiones de metano entérico y plantea cinco alternativas para mejorar producción y reducir dichas emisiones. El cuarto capítulo, evalúa y determina la potencial adopción de las cinco alternativas propuestas, bajo las condiciones de los diferentes tipos de productor y sistemas productivos determinados en el primer capítulo. En el quinto capítulo, se desarrollan conclusiones y recomendaciones con base en los resultados obtenidos a lo largo del trabajo.



# 1. Área de estudio

## 1.1 Introducción

El piedemonte llanero se encuentra dentro la subregión de la Orinoquia denominada “Zona de transición Orinoco-Andes”, la cual está diferenciada de las demás principalmente por la distribución de la fauna, altitud, tipos de cuencas hidrográficas y paisajes, según trabajos realizados por diversos autores (Hernández-Camacho, 1992; Rodríguez, et al., 2009; Lasso C., et al., 2011 y Rosales, Suarez, y Lasso, 2010).

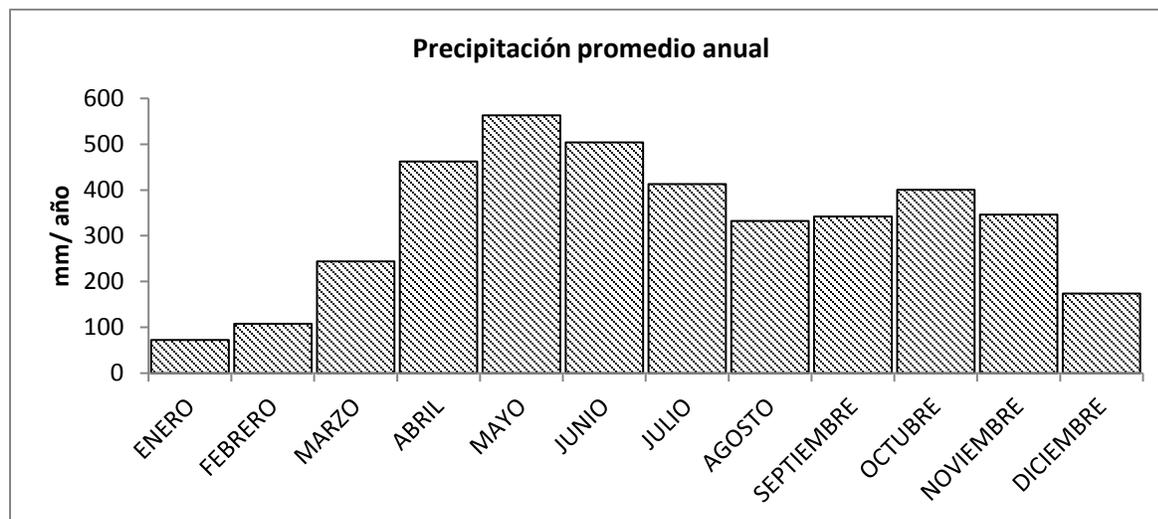
Esta región abarca un gradiente altitudinal entre los 300 y 700 msnm y se caracteriza por la presencia de bosques tropicales densos que proveen condiciones medioambientales para el desarrollo de una gran cantidad de especies de flora y fauna, las cuales se caracterizan por estar tanto en la zona plana como en la zona andina. Debido a su alta fertilidad, en el piedemonte se ha presentado a lo largo de los años un fuerte proceso de intervención sobre sus coberturas naturales, lo que se refleja en una extensa y predominante cobertura actual de pastos para actividades ganaderas y cultivos como palma, arroz, maíz, entre otros.

De acuerdo con Rincón y Caicedo (2010), los suelos predominantes en la región del piedemonte son fuertemente ácidos (pH menor a 4,5), con baja saturación de bases (<25%) y alta saturación de aluminio (>70%), y presentan una baja disponibilidad de fósforo, calcio, magnesio y potasio, así como una deficiencia de elementos menores.

La pluviometría característica de la zona del piedemonte muestra tendencia monomodal con un período marcado de lluvias entre abril y noviembre y un período marcado de sequía entre diciembre y marzo (Figura 1-1). Con base en datos de estaciones climáticas de

IDEAM localizadas en el área de estudio en promedio la precipitación acumulada anual está alrededor de los 4.000 mm.

**Figura 1-1** Distribución de la lluvia en la región de estudio



El piedemonte, administrativamente hablando, se encuentra distribuido a lo largo de los departamentos de Arauca, Casanare y Meta, siendo este último el departamento con mayores ventajas competitivas en comparación con los demás de la región, ya que presenta mejor calidad de suelos, condiciones geográficas favorables, mayor tecnificación del sector pecuario y cercanía a los mercados nacionales y regionales, entre otras.

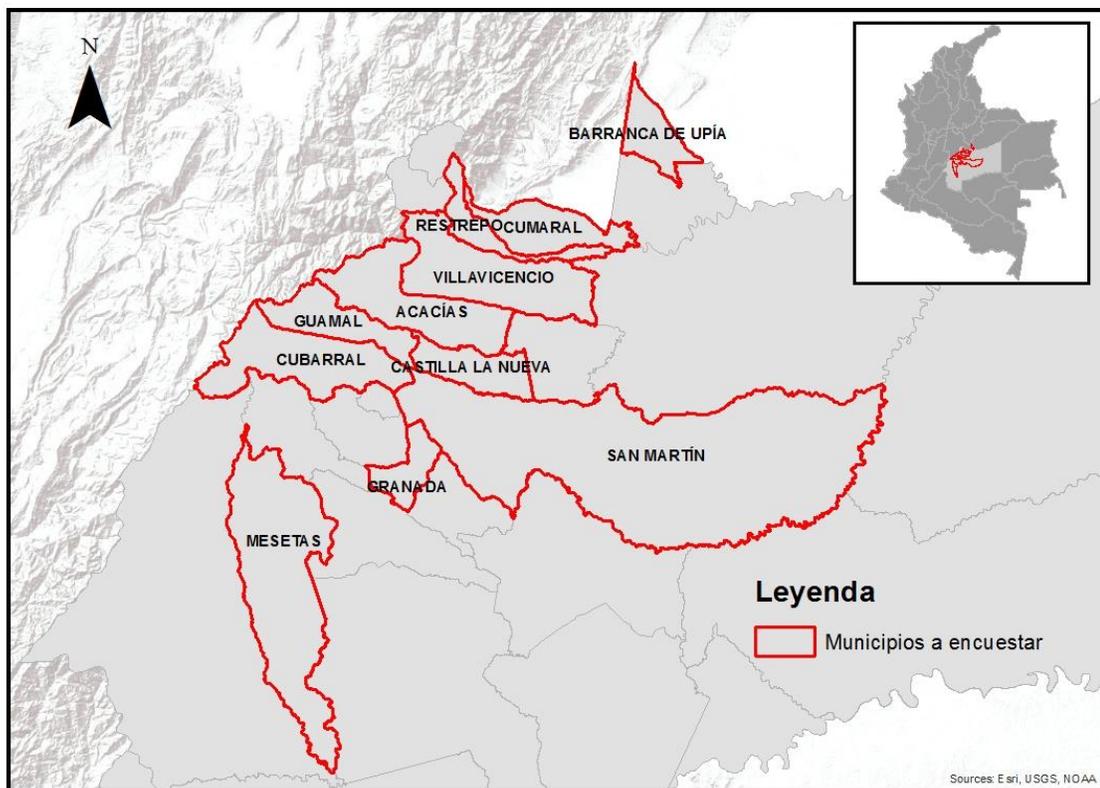
En el piedemonte, así como en la región de la Orinoquía en general, es abundante el número de especies forrajeras presentes, ya que las praderas con pastos mejorados y las sabanas nativas componen la inmensa mayoría del pasaje llanero. Las gramíneas nativas son la base de la alimentación en gran parte de la región, principalmente en las zonas más alejadas de los centros poblados y vías de acceso, así como en aquellas zonas donde existen limitaciones ambientales para el desarrollo de otro tipo de pasturas (Fisher, Lascano, Vera, y Rippstein, 1992). No obstante la introducción de pasturas de mejor calidad nutricional y buena adaptación a las condiciones de la zona, ha sido un proceso que se ha adelantado desde hace años. Sin embargo en la actualidad la productividad animal aún es baja, como consecuencia de una oferta forrajera deficiente y la degradación de las praderas cultivadas mal manejadas, principalmente por falta de fertilización y sobrepastoreo (Rincón y Ligarreto, 2008).

## 1.2 Selección de la zona de estudio

Los criterios seleccionados para determinar la zona de estudio, fueron tres: 1) Unidades productivas agropecuarias con predominancia en la producción ganadera bovina localizadas en el Piedemonte llanero, 2) Municipios con diversidad en los tipos de sistemas de producción bovina, tamaño de las unidades productivas y tamaño de los hatos, y 3) Acceso a personal calificado de la zona para la toma de encuestas de buena calidad.

Con base en los anteriores criterios, se seleccionaron los municipios de Acacías, Barranca de Upía, Castilla la Nueva, Cubarral, Cumaral, Granada, Guamal, Mesetas, Restrepo, San Martín y Villavicencio (Figura 1-2).

**Figura 1-2** Localización de los municipios seleccionados



## Referencias

- Fisher, M. J., Lascano, C. E., Vera, R. R., y Rippstein, G. (1992). Integrating the native savanna resource with improved pastures. Pastures for the tropical lowlands: CIAT's contribution. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, 75-100.
- Hernández-Camacho, J. Q. (1992). Hernández-Camacho, J., Quijano, R.O., Walschburger, T. y Guerra, H.U. (1992). Estado de la biodiversidad en Colombia. In. Halfter, G. (Ed.), La diversidad biológica de Iberoamérica I. Vol. 1. Acta Zoologica Mexicana, nueva serie. . Xalpa, Mexico.
- Lasso, C., Rial, A., Matallana, C., Ramírez, W., Señaris, J., Díaz-Pulido, A., Machado-Allison, A. (2011). Biodiversidad de la cuenca del Orinoco. II Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Ministerio del Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle de Ciencias Naturales e Instituto de Estudios de la Orinoquia.
- Rincón, Á., y Ligarreto, G. (2008). Productividad de la asociación maíz–pastos en suelos ácidos del Piedemonte Llanero colombiano. Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 9(1).
- Rincón C., A. y Caicedo G., S. (2010). Monitoreo de las condiciones de los suelos establecidos con la asociación maíz/pastos para la recuperación praderas degradadas en el piedemonte llanero. En: Memorias. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. El suelo: soporte de la biodiversidad y la producción en los agroecosistemas tropicales. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional Eje Cafetero. (CD-ROM).
- Rodriguez, M., Andrade, G., Castro, L., Duran, A., Rudas, G., Uribe, E., y Wills , E. (2009). La mejor Orinoquia que podemos construir: Elementos para la sostenibilidad ambiental del desarrollo. Corporinoquia, Universidad de los Andes, Foro Nacional Ambiental.
- Rosales, J., Suarez, C., y Lasso, A. (2010). Descripción del medio natural de la cuencia del Orinoco. Bogotá: laVH.

## **2. Tipificación socioeconómica de los ganaderos de la región del piedemonte llanero y sus sistemas de producción bovina**

### **2.1 Introducción**

La transferencia de tecnologías en el sector pecuario ha sido una estrategia ampliamente utilizada por los investigadores y entidades gubernamentales para mejorar las condiciones socioeconómicas de los productores rurales a través del aumento en la producción y productividad de sus fincas y los distintos elementos que componen dichas unidades productivas. En este sentido existen diversas tecnologías, desde aquellas que son tangibles tales como el desarrollo de forrajes mejorados, como otras que son enfocadas en el mejoramiento de procesos, como por ejemplo cambios en los tipos de pastoreo (Basset-Mens et al., 2009).

Inequívocamente ambos tipos de tecnología ayudan al ganadero a mejorar sus sistemas de producción, sin embargo en muchas ocasiones no se considera el contexto social y económico en el cual se desenvuelven estos productores a diario y por esta razón el éxito en la transferencia de estas es muy bajo (Berdegué y Escobar, 1990).

Con base en lo anterior, se torna necesario disponer de estudios que permitan entender las necesidades reales de los productores, sus costumbres, sistemas de producción, capacidad de inversión, etc., y con base en esta información mejorar la efectividad en la transferencia de las tecnologías desarrolladas. No obstante, la gran mayoría de los estudios socioeconómicos realizados en el sector agropecuario se han hecho bajo las condiciones de un productor rural promedio, lo que ocasiona que no se determinen

adecuadamente los impactos que pueden tener las tecnologías sobre los diferentes tipos de ganaderos (Köbricha et al., 2003).

Las condiciones, y por lo tanto la respuesta de un productor ganadero con mucho capital, disponibilidad de tierra y acceso a la contratación de mano de obra, es muy diferente a la de un productor con poco capital, poca tierra y con mucha mano de obra familiar disponible; así mismo son muy diferentes las consideraciones entre productores con sistemas de ganadería intensivos tecnificados y aquellos con sistemas extensivos de baja tecnificación (Cabrera et al., 2004).

En cuanto a la sostenibilidad en el tiempo de los sistemas de producción, son muchas las variables que también entran en juego además de las físicas y ambientales. Por ejemplo, el tipo de prácticas de manejo elegidas por el productor, también influyen sobre este fenómeno y por lo tanto las variables relacionadas con los activos de los productores, así como los efectos sobre sus flujos financieros, jugarán un papel crucial en la determinación de la adopción o no de las tecnologías disponibles en el mercado (Díaz et al., 1976).

Por estas razones y con el ánimo de generar estrategias diferenciadas de adopción de tecnologías nuevas por parte de las ganaderías bovinas del piedemonte, para distintos tipos de productores (Janssen y van Ittersum, 2007), se realizó una caracterización de los sistemas de producción ganaderos y las condiciones socioeconómicas de los productores rurales en varios municipios del departamento de Meta. El levantamiento de información en campo se obtuvo en el marco del proyecto “Climate-smart crop-livestock systems for smallholders in the tropics: Integration of new forage hybrids to intensify agriculture and to mitigate climate change through regulation of nitrification in soil”, financiado por la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ, por sus siglas en alemán) y el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ por sus siglas en alemán), el cual fue coordinado en Colombia por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

## **2.2 Metodología**

### **2.2.1 Recolección de información**

Con el objeto de entender la situación económica y social de los ganaderos ubicados en la zona de estudio descrita en el capítulo anterior, se elaboró un instrumento de encuesta para poder evaluar la aceptación de alternativas de transferencia de tecnología.

La información para su construcción se obtuvo a partir de la revisión de información disponible en otros trabajos realizados previamente tanto por instituciones educativas, como por institutos de investigación e instituciones gubernamentales, lo que permitió contextualizar mejor las encuestas y evitar la recolección de información ya generada.

Los instrumentos se compartieron con distintos socios locales en el piedemonte, con el fin de contextualizar mejor las preguntas a través de su experiencia y garantizar que estas permitieran describir lo mejor posible las características típicas de sus sistemas de producción. El siguiente paso, fue realizar encuestas piloto en las zonas para terminar de ajustar los instrumentos y enseguida realizar las encuestas a la población objetivo. Finalmente se obtuvieron en total 342 observaciones para el piedemonte llanero del Meta, distribuidas en once municipios.

### **2.2.2 Análisis y procesamiento de datos**

Se realizó la digitalización de la información recolectada y se conformó una base de datos con más de 200 variables tanto cualitativas como cuantitativas. Esta actividad se realizó con la colaboración del CIAT a través de un grupo de trabajo del área de Análisis de Políticas (DAPA por sus siglas en inglés).

Esta base se consolidó eliminando datos redundantes y disminuyendo las variables solamente a las más explicativas de las características socioeconómicas de la región. Posteriormente, se procedió a reducir las variables por medio de la interacción entre estas, de tal forma que en una sola variable se pudiera explicar de manera resumida la información de  $n$  variables, ya que de esta manera se puede describir de mejor manera los sistemas productivos (Van Passel y Meul. 2011). Un ejemplo de lo anterior es la suma de las variables costo de enmiendas, fertilizantes y plaguicidas, para generar una nueva

variable llamada costos de producción. En la Tabla 2-1 se pueden ver las principales variables calculadas.

**Tabla 2-1** Estimación de variables calculadas a partir de las encuestas

Variable		Unidad	Metodología de cálculo de variables
Habitantes por hogar		Numero	$\sum$ personas por hogar
Vocación laboral		horas	$\sum$ (% tiempo dedicado a alguna actividad (ganadería, agricultura, jornal)
Infraestructura		\$	$\sum$ inversión estimada en infraestructura en la finca para ganadería
Necesidad es Básicas Insatisfechas (NBI)	Hacinamiento	Si / No	(No habitantes por vivienda/ No de habitaciones)>3
	Viviendas inadecuadas	Si / No	Viviendas móviles, o ubicadas en refugios naturales o bajo puentes, o sin paredes o con paredes de tela o de materiales de desecho o con pisos de tierra (en zona rural el piso de tierra debe estar asociado a paredes de material semipermanente o perecedero)".
	Servicios inadecuados	Si / No	Carencia de servicios sanitarios y de acueducto que se aprovisionan de agua de río, nacimiento o lluvia.
	Inasistencia escolar	Si / No	Hogares en donde uno o más niños entre 7 y 11 años de edad, parientes del jefe, no asisten a un centro de educación formal.
Tipos de cobertura en la finca		ha	Son las coberturas vegetales que hay en la finca. P ej.: bosque, cultivos, praderas, etc.
Forrajes que usa en la finca		ha	Tipo de forraje que consumen los animales y su respectiva proporción en el área total de la finca
Áreas que se encharcan		ha	Áreas que permanecen inundadas por largos periodos de tiempo
Necesidades de mano de obra por cultivo		horas	$\sum$ mano de obra empleada en cada una de las labores del cultivo
Inventario ganadero		UGG	$\sum$ UGG totales por finca
Costos de ganadería		\$	$\sum$ costo de factores de producción (medicinas, sal, concentrado, etc.) - costo de pastadas
Costo especies menores (aves y cerdos)		\$	$\sum$ Costo de factores de producción (concentrado, medicinas, etc.)
Autoconsumo		\$	$\sum$ costo estimado por año cultivos de pan coger o especies menores
Otros ingresos no agropecuarios (neto)		\$	$\sum$ ingresos generados por cualquier otra actividad que no sea agropecuaria o no sea generada en la finca
Costo de maquinaria		\$	$\sum$ inversión en implementos de mecanización

### 2.2.3 Agrupamiento de fincas

Con el objetivo de agrupar las fincas de acuerdo a sus similitudes se realizó un análisis factorial múltiple (AFM) y posteriormente un análisis de conglomerados con el algoritmo de k-medias, en el software R (Khanchouch, Charrad y Limam, 2014) de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Descripción de las variables del análisis con el fin de detectar los valores extremos, tendencia y dispersión.
2. Selección para el análisis de aquellas variables con mayor dispersión y correlación con otras.
3. Tratamiento de valores atípicos o extremos realizando transformaciones a las variables, garantizando que esta transformación mantenga el comportamiento de la original y que el procedimiento sea fácilmente reversible.
4. Agrupamiento de variables de acuerdo a la temática a la cual pertenecen y con la metodología AFM generar factores que resuman las variables expuestas.
5. A partir de los factores obtenidos en el paso 4 se realizó un clúster con el algoritmo de k-medias, determinando el número óptimo de clúster por medio del índice de Calinski-Harabasz, el cual sugiere como número óptimo de clúster dentro de un rango de posibles grupos, aquel donde se obtenga máxima variación entre ellos y mínima dentro de cada grupo.

### 2.2.4 Estimación del error de muestreo

Con base en la información de las encuestas, se realizó una estimación póstuma del error de muestreo, ya que en la etapa de diseño de la estrategia de muestreo no se contó con información suficiente para hacer dicha estimación.

El error de muestreo de las encuestas se realizó con bootstrapping (Efron, 1992), la cual es una técnica en la que se realizan un número dado de submuestras (1.000 para este caso) de cada variable en las encuestas y se estima el parámetro de interés, siendo el error estimado de muestreo el valor promedio de las variaciones observadas en cada submuestra. Dado que en la encuesta se midieron una gran cantidad de variables se calculó el error de muestreo como el promedio de los errores con los que se estima cada variable, así para el caso del piedemonte, las inferencias realizadas para la población de

fincas a la cual pertenece la muestra distarán de su verdadero valor entre 0 y 37,06% con un 95% de confianza.

Adicionalmente, y debido a que en algunos análisis como el de clúster se usaron transformaciones de las variables con el objetivo de minimizar las distorsiones que causan los datos atípicos, se presentan también los errores de muestreo para las variables transformadas; en este caso el error de muestreo en las inferencias de estas variables oscila entre 0 y 7,32%, lo cual indica la alta distorsión que generan las fincas con valores atípicos en esta región.

## 2.3 Resultados y discusión

### 2.3.1 Características generales de los sistemas ganaderos del piedemonte

Las encuestas se realizaron en 11 municipios de Colombia; el municipio con mayor número de encuestas fue Granada (16%) y con menor número fue Cumaral (6%), seguido de Restrepo (7%) y San Martín (8%), para el resto de municipios se realizaron la misma proporción de encuestas (9%) tal y como se observa en la Figura 2-1.

**Figura 2-1** Distribución porcentual de encuestas por municipio



El mayor porcentaje de personas encuestadas (61%), son los propietarios de las predios visitados, sin embargo existe un porcentaje importante de predios que cuentan con figura

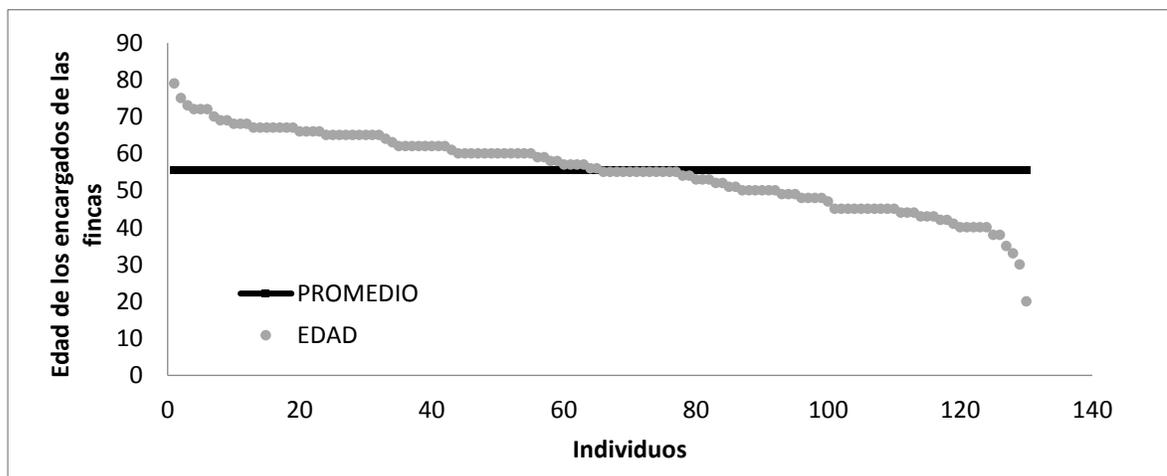
de administrador; adicionalmente existen fincas arrendadas (3%), en Copropiedad (1%), es decir fincas que comparten dueño, y fincas familiares (2%).

En cuanto al tema de género, se encontró que existe participación importante por parte de la mujer (38%) en las labores de campo; esto se debe en ocasiones a que existen hogares donde el jefe de hogar es la mujer la que asume toda la responsabilidad económica; también sucede que es ella la que posee conocimiento sobre la actividad ganadera, por lo que entra a participar activamente. En otros casos dependiendo de la actividad, se ha encontrado división del trabajo según el sexo, los hombres por su parte son los encargados de la siembra y manejo del sistema (Pereira, 2000).

Adicionalmente, Aristizabal y Duque (2008) sugieren que cuando existe una familia (hombre y mujer) el hombre asume el rol de administrador y se encarga de las labores pesadas de la finca, por su parte la mujer se dedica al hogar, sin embargo Tangka, Jabbar y Shapiro (1999) argumentan que la participación femenina en las fincas se destaca comúnmente en actividades que se encuentran más cerca de la casa con el fin de asumir también labores domésticas.

Como se observa en la Figura 2-2, se determinó que en el 92% de los predios visitados, las personas que administran los predios son mayores de 40 años (55 años en promedio), lo que es un indicador de que las personas jóvenes se están dedicando a otras actividades (Jurado y Tobasura, 2012), tales como los oficios domésticos o trabajos en los centros poblados.

**Figura 2-2** Edad de los administradores de las fincas

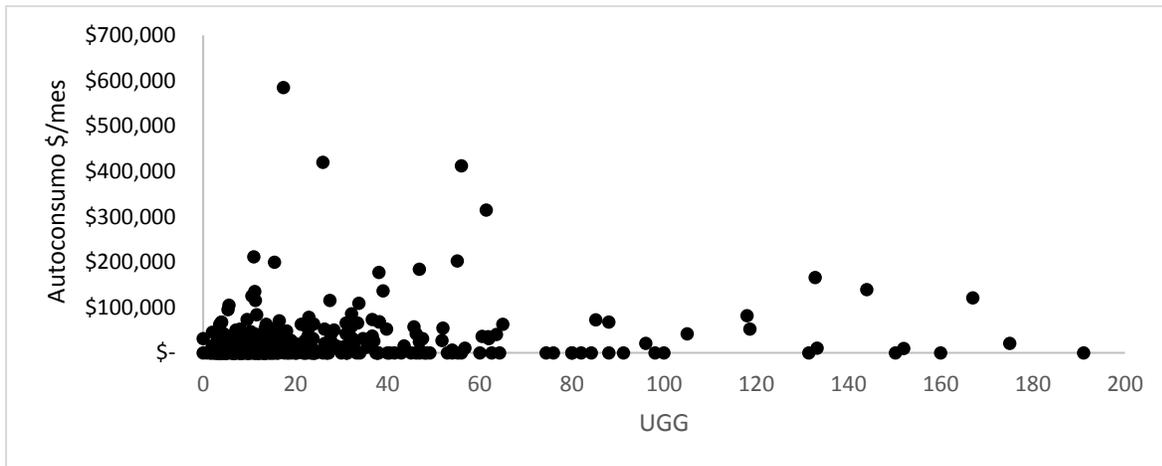


Este hecho afecta en el momento que se quiera implementar tecnologías de mejoramiento en los predios, ya que se han evidenciado resultados oportunos y benéficos cuando la población joven participa activamente en estas actividades.

Del total de fincas, el 60% de los predios cuenta con servicios públicos inadecuados, es decir que el agua, la luz y el alcantarillado son deficientes. Esto se debe a la deficiente cobertura de los servicios básicos en las zonas rurales lo que guarda una estrecha relación con las cifras encontradas por el estudio realizado por Jaramillo en el 2006 en el que se demuestra que los índices de pobreza y pobreza extrema son más relevantes que en las zona urbana.

Como se observa en la Figura 2-3, no se encuentra ninguna relación entre el tamaño del hato y el autoconsumo, por lo tanto los grandes productores como los pequeños no realizan esta práctica, y esto sugiere que hay un gasto adicional para la manutención de la familia, lo cual debe considerarse en el momento de determinar los gastos familiares mensuales.

**Figura 2-3** Auto consumo y carga animal

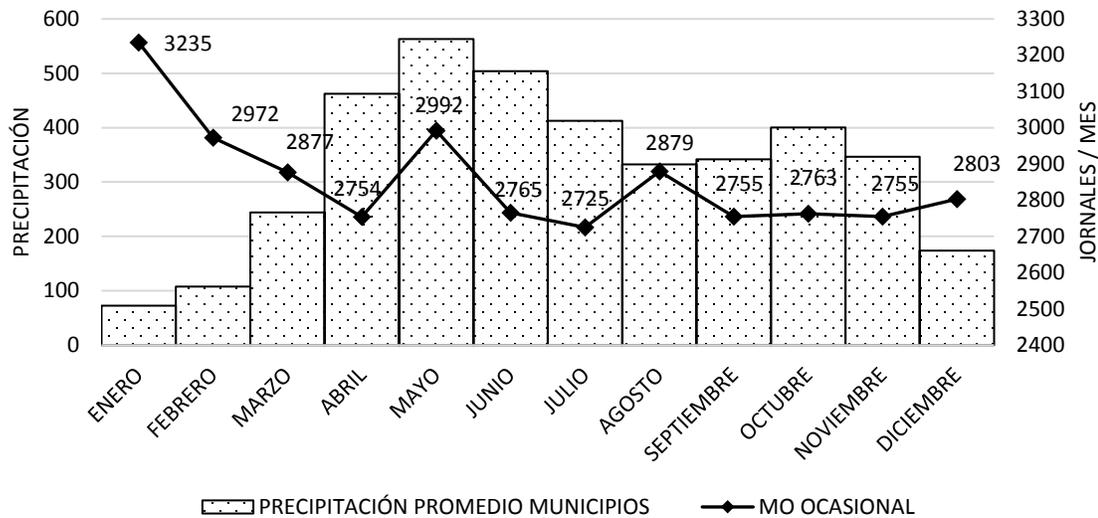


Se puede identificar en la Figura 2-4 que el año inicia en época seca (enero), hay un aumento de la necesidad de mano de obra, pues en época seca las labores del campo aumentan, a partir de abril, cuando inician la temporada de lluvias (marzo, abril, mayo) la necesidad de mano obra ocasional disminuye, a pesar de que se empiezan a realizar funciones como preparación de la tierra y la siembra de forrajes; en agosto, vuelve a haber un incremento en la necesidad de mano de obra y coincide en el momento en que las lluvias empiezan a disminuir y se debe cosechar o instalar riego (si se usa). Se tienen

entonces tres meses donde la contratación de mano de obra ocasional se mantiene constante.

En términos generales durante todo el año, se contrata cerca de 2.700 jornales por mes de manera constante para toda la región.

**Figura 2-4.** Relación entre contratación y precipitación.



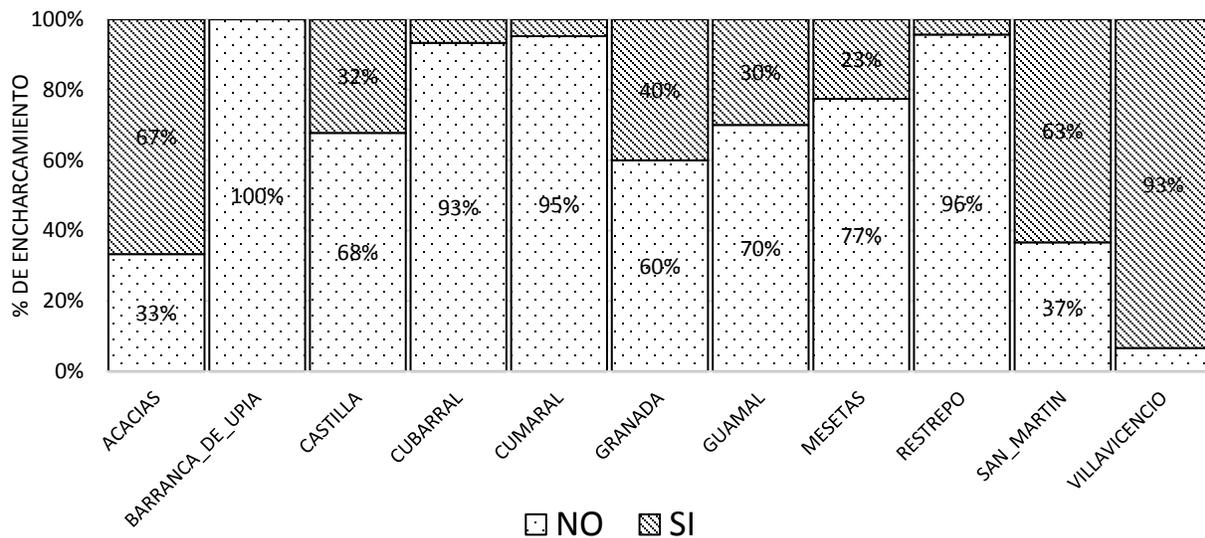
El número de productores que tiene acceso al mercado financiero es bajo, ya que solo el 33% puede acceder a este. Esto nos indica que el 67% de los productores tiene un restringido acceso a los recursos financieros, lo que afecta la posibilidad de inversión ya sea para expansión o mejoramiento para su negocio productivo, siendo cada vez más grande la brecha socioeconómica entre los productores grandes y pequeños, entre las personas que habitan el área rural y el área urbana. Esto debe ser considerado en el momento de implementación de tecnologías, ya que aquellas donde se necesitan grandes inversiones pueden ser difíciles de adoptar por algunos productores.

Solo el 30% de las personas encuestadas poseen en sus predios cerca eléctrica, mientras que el 70% no cuenta con esta tecnología, lo cual puede deberse a que el acceso a esta herramienta depende en gran medida a la posibilidad de inversión que tengan el productor y en ocasiones se vuelven exclusivas de propietarios que cuentan con los recursos necesarios para obtenerlas y aprovecharlas. Lo que permite que empiecen a diferenciarse las clases de productores (grande, mediano o pequeño) (Parra et al, 2013).

Dadas las condiciones de la región, el encharcamiento es una condición por la que muchos productores no pueden implementar tecnologías, pueden implementarlas de forma parcial en sus fincas, o deben implementar aquellas que sean compatibles con esta condición. En este sentido se determinó que del total de predios encuestados, solo el 35% sufren de encharcamiento, y corresponde a fincas ubicadas en zonas ribereñas.

De los once municipios encuestados, solo tres se encharcan en más del 50%, por lo tanto predomina los municipios que no se encharcan. Los municipios con mayor encharcamiento (más del 60%) son Villavicencio con el 93% de las fincas encharcadas, Acacias con 67%, y San Martín con un 63% (Figura 2-5). Esto se debe a la cercanía de estos municipios con afluentes pertenecientes a la cuenca del río Meta, que en temporada de lluvias, puede desbordarse y generar encharcamientos en estos municipios. Por otro, los municipios que presentan poco encharcamiento son Barranca de Upia, Restrepo, Cumaral, Cubarral, Mesetas y Guamal.

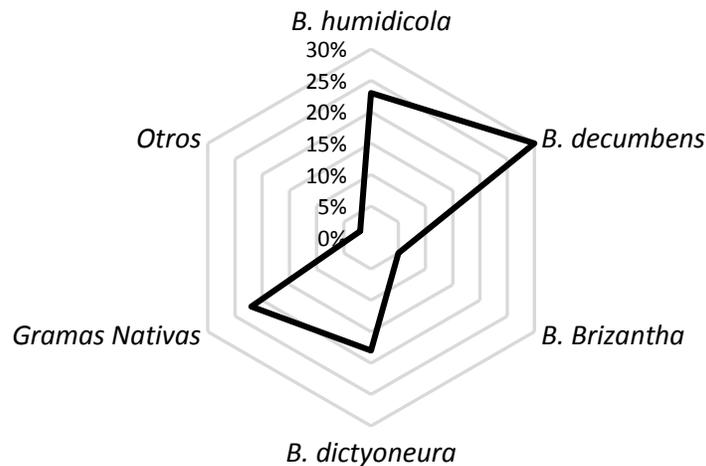
**Figura 2-5** Porcentaje de fincas que se encharcan por cada municipio.



Se observa que la composición de pasturas de los predios encuestados son Brachiarias (75%), debido a que las gramíneas de este género presentan tolerancia a suelos ácidos de baja fertilidad, resisten sequías y en ocasiones inundaciones, lo que las hacen aptas para este territorio, además que permiten tener un nivel aceptable de producción (Rivas y Holmann 2004), por lo que los productores desde hace algunos años han optado por estos pastos y solo un porcentaje pequeño (25%) poseen gramas en sus predios. No obstante

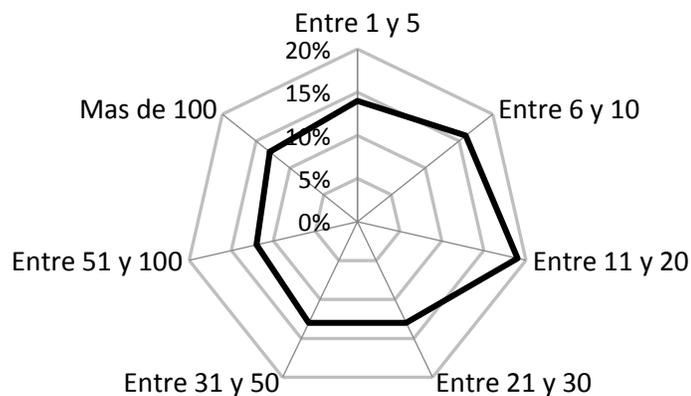
los tipos de Brachiarias utilizados son diversos ya que comercialmente varias especies de este género se han difundido en la región. La proporción de pastos utilizados se puede observar en la Figura 2-6.

**Figura 2-6** Composición de las praderas



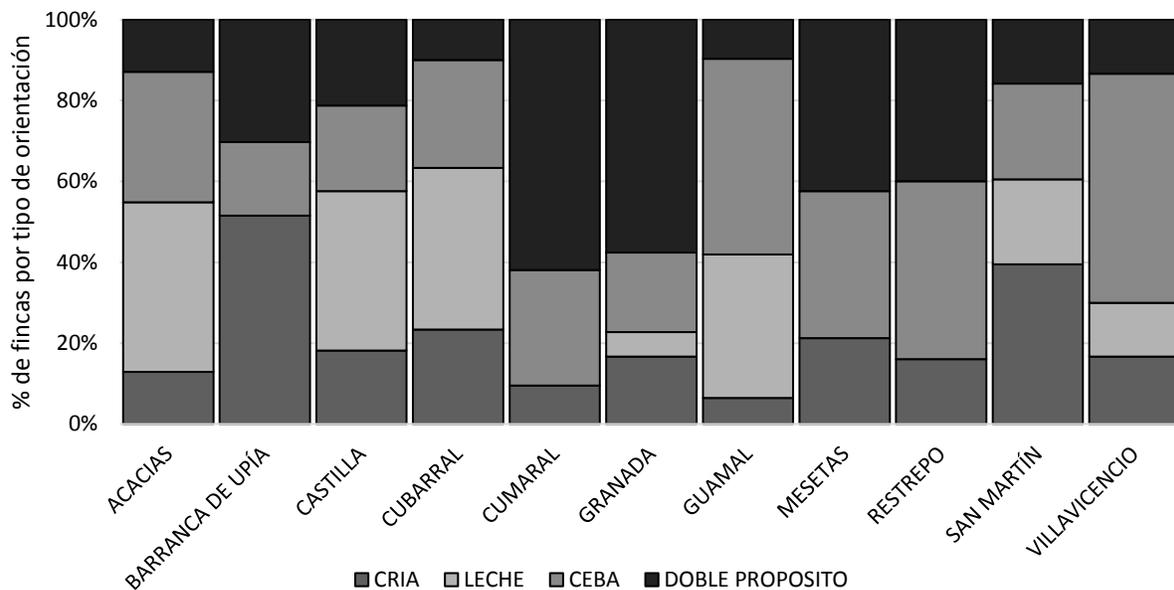
El tamaño del hato está representado en los predios evaluados equitativamente, teniendo un mayor porcentaje los productores de 10 a 20 cabezas de ganado con un 19%. Sin embargo de acuerdo de la clasificación del Conpes 3676, donde los pequeños productores tienen de 1 a 50 cabezas de ganado, los medianos de 50 a 500 cabezas de ganado y los grandes más de 500 cabezas de ganado, tenemos que el 75% de los predios encuestados son pequeños productores y el 25% medianos productores (Figura 2-7).

**Figura 2-7** Tamaño de los hatos



Como se puede observar en la Figura 2-8, de acuerdo con la encuesta, todos los municipios estudiados cuentan con entre tres y cuatro de las orientaciones productivas. La cría predomina en Barranca de Upía y San Martín. La lechería se concentra en Acacias, Castilla la nueva y Cubarral. La ceba de novillos predomina en Guamal, Mesetas, Restrepo y Villavicencio. El doble propósito, el cual consiste en la producción simultánea de carne y leche, se desarrolla principalmente en Cumaral, Granada, Mesetas y Restrepo. Estos resultados están acorde con lo referenciado por los informes de inventario bovino presentados por la federación de ganaderos (FEDEGAN) anualmente.

**Figura 2-8** Tipo de Sistema de producción por municipio.



La principal actividad presente en la región de la Orinoquia es la Ceba con un 31%, el doble propósito representa el 30%, seguido de la cría con un 22% y la lechería en un 17%. Esto es debido a que la zona presenta características para la producción de carne (Ceba, Doble propósito y Cría) y no cuenta con la tecnificación necesaria, en pasto ni infraestructura para desarrollar el sistema de lechería. Incluso al realizar un análisis más profundo con respecto a la composición etaria de los hatos, aquellas fincas que se definieron originalmente como lecheras, en realidad tienen características más parecidas a los sistemas doble propósito.

El 82% de los predios encuestados no practica la agricultura y su principal actividad económica es la ganadería, la cual dada las condiciones de la región se realiza de manera extensiva. El 18% de predios restantes que si cultivan, cuentan principalmente con cacao

con un 6%, seguido de la yuca, cítricos, maíz, y plátano, sin embargo el área sembrada en las fincas en muy baja.

### 2.3.2 Tipos de sistemas de producción ganadera

De acuerdo con la metodología de clúster, se clasificaron los productores principalmente en tamaño y orientación del hato, considerando también otras variables tales como la capacidad de carga e indicadores de productividad. Las principales características de los grupos para los ganaderos en Colombia se pueden ver en la Tabla 2-2.

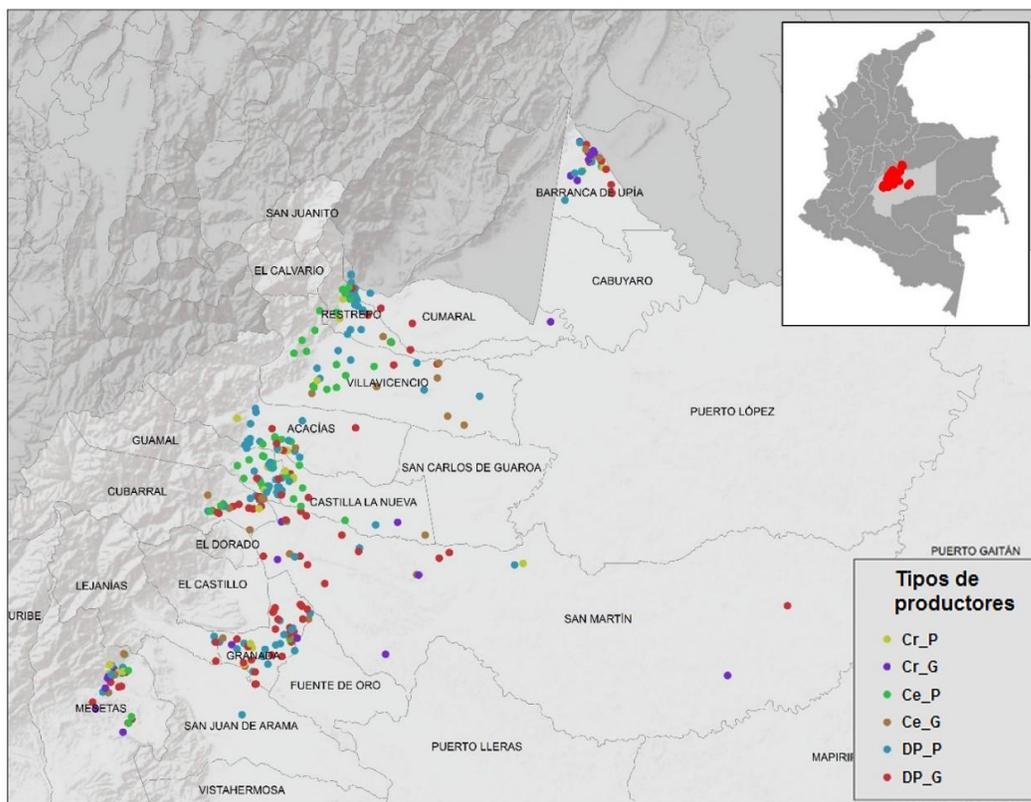
**Tabla 2-2.** Composición promedio de los tipos para el piedemonte

Grupo	UGG	Mano de obra contratada/año	Área de pstura (ha)	Infraestructura (millones de \$)	Área cultivada (ha)	UGG/ha	Mano obra familiar/año	Distancia de carreteras principales (km)	Vacas	Animales Adultos
Cr_P	14	38	12	4	1	2	493	3,346	12	20
Cr_G	137	258	317	57	0	1	115	13,067	115	187
Ce_P	8	8	12	5	0	1	408	2,879	4	13
Ce_G	71	205	72	28	0	1	261	6,092	16	97
DP_P	11	54	13	4	1	1	151	3,358	10	14
DP_G	58	341	188	22	1	1	54	5,766	50	79

Con base en la clasificación, se puede observar cierta agrupación espacial entre los clúster (Figura 2-9), ya que gran parte de los productores que se dedican a la ceba (Ce\_P y Ce\_G) se encuentran en gran parte en el municipio de Villavicencio y entre los municipios de Castilla la Nueva, Guamal y Cubarral.

Los productores que se dedican al doble propósito (Dp\_P y Dp\_G) se ubican en gran parte en Granada, Restrepo, Castilla la Nueva y Acacias.

Mientras que los productores que se dedican a la cría (Cr\_P y Cr\_G) se encuentran a los extremos sur y nor-occidente del departamento, específicamente en los municipios de Mesetas y Barranca de Upía.



**Figura 2-9.** Distribución espacial por tipo de productor

- **Grupo 1 Productores pequeños orientados a la cría (Cr\_P)**

Son productores pequeños, que tienen en promedio 38 animales en predios de 12 hectáreas y no cuentan con terneros pero si con vacas lactantes, lo que puede indicar que son fincas que venden crías muy rápido ya que en el momento de las encuestas no contaban con individuos en este grupo etario (Tabla 4). Teniendo en cuenta esa distribución se clasificaron estas fincas como sistema de producción de cría de ciclo completo que representan el 18% del total de predios encuestados.

**Tabla 2-3** Distribución típica del hato del Grupo 2

Grupo etario	Cantidad de animales	%
Vacas lactando	5	13,15%
Vacas secas	8	21,05%
Novillas	11	28,94%
Novillos 1 - 2 años	9	23,68%
Novillos 2 - 3 años	4	10,52%
Toros	1	2,63%

▪ **Grupo 2 Productores grandes orientados a la cría (Cr\_G)**

Son productores grandes, los predios tienen un área promedio 317 ha y 231 animales y la composición de los hatos se puede observar en la Tabla 3. Con base en la composición del hato se clasificaron estos predios como fincas dedicadas a la cría ciclo completo, es decir que sus ingresos provienen principalmente de la venta de animales de 450 kilogramos, y del descarte de machos y hembras. Este clúster agrupa el 6.5% del total de los predios encuestados.

**Tabla 2-4** Distribución típica del hato del Grupo 1

<b>Grupo etario</b>	<b>Cantidad de animales</b>	<b>%</b>
Vacas lactando	62	20,94%
Vacas secas	41	13,85%
Novillas	55	18,58%
Ternereras	30	10,13%
Terneros	30	10,13%
Novillos 1 - 2 años	40	13,51%
Novillos 2 - 3 años	24	8,10%
Toros	14	4,73%

▪ **Grupo 3. Productores pequeños con orientación a ceba (Ce\_P)**

Productores pequeños dedicados a la ceba, con 26 UGG y 12 hectáreas en pastos, es decir con 2,17 UGG en promedio por hectárea. La composición de este hato se puede identificar en la Tabla 3. Los ingresos provienen de la venta de machos y novillas cebadas (450 kg) y de la venta de las vacas secas. En este grupo se identifica una dependencia económica de dos personas y por lo tanto unos gastos aproximados de \$ 2.400.000 por año.

**Tabla 2-5** Distribución típica del hato del Grupo 3

<b>Grupo etario</b>	<b>Cantidad de animales</b>	<b>%</b>
Vacas secas	7	18,92%
Novillas	10	27,03%
Novillos 1 - 2 años	10	27,03%
Novillos 2 - 3 años	9	24,32%
Toros	1	2,70%

▪ **Grupo 4. Productores grandes con orientación a ceba (Ce\_G)**

Productores grandes, con predios promedio de 72 hectáreas y 214 animales (Tabla 3), la orientación del hato es ceba y la composición del mismo en cuanto a proporciones es similar al clúster anterior. Los ingresos del sistema provienen de la venta de machos y hembras cebadas (450 kg) y de las vacas secas, el 8.6% de los productores encuestados pertenecen a este clúster.

**Tabla 2-6** Distribución típica del hato del Grupo 4

<b>Grupo etario</b>	<b>Cantidad de animales</b>	<b>%</b>
Vacas secas	49	22,79%
Novillas	46	21,40%
Novillos 1 - 2 años	88	40,93%
Novillos 2 - 3 años	31	14,42%
Toros	1	0,46%

▪ **Grupo 5. Productores pequeños con orientación al doble propósito (DP\_P)**

Son productores con un área promedio de 13 hectáreas, y 33 animales, el hato está compuesto por todos los tipos de animales, tal y como se observa en la Tabla 3. Los ingresos en estos sistemas dependen de las ventas de leche, de machos cebados, de vacas descarte y toros; por la anterior la composición se considera típica de un hato con orientación de doble propósito y por el tamaño de la finca se consideran productores pequeños. A este clúster se asocian el 33.2% de los predios encuestados.

**Tabla 2-7** Distribución típica del hato del Grupo 5

<b>Grupo etario</b>	<b>Cantidad de animales</b>	<b>%</b>
Vacas lactando	10	30,30%
Vacas secas	3	9,09%
Novillas	7	21,21%
Terneras	2	6,06%
Terneros	2	6,06%
Novillos 1 - 2 años	5	15,15%
Novillos 2 - 3 años	3	9,09%
Toros	1	3,03%

▪ **Grupo 6. Productores grandes con orientación al doble propósito (DP\_G)**

Son predios con orientación a doble propósito, a este grupo pertenecen el 25.8% del total de los predios encuestados, son productores grandes, con fincas de 188 hectáreas y 119 animales aproximadamente (Tabla 3), con una composición de hato similar a la del clúster anterior. Los ingresos de este grupo provienen de la venta de leche, y de carne (machos o novillas gordo 450 kg, vacas y toros descarte).

**Tabla 2-8** Distribución típica del hato del Grupo 5

<b>Grupo etario</b>	<b>Cantidad de animales</b>	<b>%</b>
Vacas lactando	31	27,43%
Vacas secas	15	13,27%
Novillas	23	20,35%
Ternereras	2	1,77%
Ternereros	2	1,77%
Novillos 1 - 2 años	22	19,47%
Novillos 2 - 3 años	16	14,16%
Toros	2	1,77%

## 2.4 Conclusiones

Debido a que la información generada por este estudio puede ser utilizada para mejorar la transferencia de tecnologías a los productores de la región, hay que considerar que uno de los factores que pueden afectar este proceso es la disponibilidad de mano de obra familiar y el costo de contratarla. La disponibilidad de mano de obra familiar, puede ser el factor más importante para hacer viable la adopción de una tecnología, en muchos casos las familias que cuentan con mucha mano de obra disponible, pueden adoptar más que aquellas donde los costos de contratar son muy altos, la edad de las personas que están administrando las fincas puede ser un problema a futuro porque se puede presumir también que la oferta de mano de obra también es escasa.

En este mismo sentido, el tamaño de las familias también es un factor importante para la adopción, sin embargo su efecto es en dos sentidos. Primero que todo al tener una familia numerosa, se tiene mayor disponibilidad de mano de obra, lo que es benéfico para la finca, sin embargo mayor número de individuos, requiere mayores ingresos para el sostenimiento

de la familia. Por tal razón cuando el tamaño de una finca es muy pequeño y se cuenta con una familia numerosa, es muy difícil depender enteramente de la producción de esta.

El tamaño de la finca es una de las variables más importantes ya que genera mayor capacidad productiva. En los resultados obtenidos se observa que existen productores con mucha tierra que a pesar de ser muy ineficientes en el manejo de los recursos, reciben muchos ingresos. Esto puede ser un inconveniente al momento de hacer transferencia de tecnología ya que si un sistema es rentable a pesar de ser ineficiente, es difícil que el productor cambie. Adicionalmente al contar con mucha tierra hay algunas medidas que se deben introducir de forma paulatina, por ejemplo si se va a introducir una medida sobre el uso de la tierra, ya que si se hiciera la intervención en una sola vez esta por lo general sería ser muy alta.

Así como se observó en la región en cuanto a la agricultura, no existe una adopción generalizadas, principalmente por la estabilidad económica de la actividad ganadera la cual es más resiliente al clima, a las variaciones de los precios y se ajusta al conocimiento tradicional de los productores de la zona, presenta mayor facilidad para su manejo, depende menos de mano de obra, de insumos y de manejo en términos generales. Con base en esto se puede decir que la implementación de medidas que incluyan actividades agrícolas (P. ej bancos forrajeros mixtos), podrían presentar resistencia a la adopción por parte de los productores.

En cuanto a los grupos, se puede observar que la variación con respecto a los tipos de fincas es muy alta, sin embargo es posible agrupar a los productores de acuerdo a su tamaño, ingreso, tipo de orientación y tecnificación, que son variables suficientes para evaluar adopción de tecnologías.

Como los doble propósito, tanto grandes como pequeños son los que predominan en la región, se debe pensar en tecnologías que puedan pagarse con un flujo de caja constante (dado por la vente de leche), pero que adicionalmente puedan ser cuotas bajas de crédito con amortizaciones grandes en plazos más largo provenientes de la venta de animales.

Por el contrario, aquellos que se dedican a la cría y a la ceba, dependiendo de sus tamaños y capitales, podrán adoptar medidas que puedan amortizarse a largo plazo. Adicionalmente, se debe diferenciar por el tamaño de las fincas, ya que las fincas más

pequeñas deberán tener más apoyo institucional, la mayoría de las veces debido a la alta dependencia de los productores a la tierra.

Finalmente, es necesario evaluar sobre los grupos generados diversas medidas de intensificación, con el objeto de identificar de forma específica, los mecanismos, ventajas y desventajas de la implementación de cada una de ellas y con base en esto poder hacer recomendaciones de política para mejorar la transferencia de tecnología en esta región.

## Referencias

- Aristizábal, L. R. R., y Duque, H. D. E. (2008). Adolescencia y desplazamiento: entre el cambio y la migración. *Revista Poiésis*, 8(15).
- Basset-Mens, C., Ledgard, S., Boyes, M., (2009). Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecol. Econ.* 68, 1615–1625.
- Berdegue, J., y Escobar, G. (1990). Conceptos y metodología para la Tipificación de sistemas de fincas: la experiencia de RIMISP. *Tipificación de sistemas de producción agrícola. RIMISP. Santiago, Chile*, 13-43.
- Cabrera, D., García, A., Acero, R., Castaldo, A., Perea, J., y Martos, J. (2004). Metodología para la caracterización y tipificación de sistemas ganaderos. Universidad de Córdoba Documentos de trabajo producción animal y gestión. DT, 1.
- Díaz, J., Guijarro, P., y Vicente, A. (1976). El análisis factorial en explotaciones agrarias [Alba de Tormes, Salamanca, España]. *Revista de Estudios Agro sociales*.
- Efron, B. (1992). Bootstrap methods: another look at the jackknife (pp. 569-593). Springer New York.
- Janssen, S., y van Ittersum, M. K. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies: a review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 94(3), 622-636.
- Jaramillo, P. S. (2006). Pobreza rural en Colombia. *Revista colombiana de sociología*, (27), 47-62.
- Jurado, C., y Tobasura, I. (2012). Dilema de la juventud en territorios rurales de Colombia: ¿campo o ciudad?. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, niñez y juventud*, 10(1), 63-77.
- Khanchouch, I., Charrad, M., y Limam, M. (2014). A Comparative Study of Multi-SOM Algorithms for Determining the Optimal Number of Clusters. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1-36.

- Köbricha C., Rehmanb T. y Khanc M. (2003). Typification of farming systems for constructing representative farm models: two illustrations of the application of multivariate analyses in Chile and Pakistan. *Agricultural Systems* 76, 141–157
- Parra Rafael., Ordóñez Liliana., Acosta Camilo. (2013). Pobreza, brechas y ruralidad en Colombia. *Coyuntura económica: investigación económica y social Volumen XLIII. No. 1*, pp. 15-36.
- Pereira, S. (2000). Percepciones de familias productoras de sus sistemas agroforestales con café, en el norte de Nicaragua. *Agroforesteria en las Américas*, 8(29), 8-14.
- Rivas, L., y Holmann, F. (2004). Impacto económico potencial de la adopción de cultivares de *Brachiaria* resistentes a cercópodos. *Pasturas Tropicales*, 26(3), 39.
- Sánchez E., J.A. (2010). Los suelos de Colombia. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds). *Ciencias del suelo principios básicos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá. Colombia. pp. 487 – 552.*
- Tangka, F. K., Jabbar, M. A., y Shapiro, B. I. (1999). Gender roles and child nutrition in livestock production systems in developing countries: A critical review (No. 27). ILRI (aka ILCA and ILRAD).
- Van Passel, S., y Meul, M. (2012). Multilevel and multi-user sustainability assessment of farming systems. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 170-180.

### **3. Comparación entre las emisiones de metano entérico asociadas a dietas típicas de los sistemas ganaderos del piedemonte llanero y cinco escenarios de cambio en las dietas.**

#### **3.1 Introducción**

El metano (CH<sub>4</sub>) principalmente se genera en la ganadería bovina como un subproducto durante la actividad ruminal y se considera una pérdida en el balance energético de la dieta cuantificado entre el 2 y el 12 % del total de la energía consumida (Johnson y Johnson, 1995). Un ejemplo de lo anterior es que el contenido neto de energía del metano es de 55,2 MJ/kg, lo que es 1,27 veces más alto que el de la gasolina (Demirel, 2012).

Este gas es producido especialmente por los procesos fermentativos del alimento que ingresa al rumen durante el proceso de descomposición de los carbohidratos (Vergé et al 2007), debido a la actividad de arqueas metanogénicas, las cuales utilizan el gas carbónico (CO<sub>2</sub>) y los radicales de hidrogeno producidos por los protozoos, bacterias y hongos anaeróbicos que conforman la comunidad del rumen (Orskov et al., 1968; Bryant, 1979, Martin, Morgavi y Doreau, 2010; Morgavi et al., 2010).

Otro proceso por el cual se genera metano en el rumen por parte de las arqueas, es a través de reacciones químicas que involucran metilaminas, derivadas de las membranas celulares de las plantas y metanol, el cual es derivado de la hidrolisis de cadenas metanolicas que hay en los polisacáridos de las plantas (Neill, Grime y Dawson, 1978; Poulsen, et al., 2013, tomado de Tapio, et al., 2017).

Una de las características importantes del CH<sub>4</sub>, es que hace parte de los llamados gases de efecto invernadero (GEI) por su capacidad de retener calor dentro de la atmosfera de la tierra. Del total de emisiones a nivel mundial de GEI, el sector de la ganadería bovina aporta el 18%, lo que representa cerca de 7 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año (FAO 2006), de las cuales alrededor del 55% corresponden a la fermentación entérica (O'Brien et al., 2011; Basset-Mens et al., 2009; Lovett et al., 2006).

La ganadería bovina produce gas metano, debido principalmente a la acción anaeróbica de diversos tipos de microorganismos en el rumen durante el proceso de degradación de celulosa a glucosa (Carmona, 2005). La composición química de las fracciones fermentadas va a determinar la cantidad y la proporción de ácidos grasos volátiles (AGV) y la cantidad de H<sub>2</sub> que se produce (Bannink., 2010).

Según Moss et al., 2000 (Tomado de Carmona et al., 2005), las principales rutas de fermentación se resumen así:

Reacciones productoras de H<sub>2</sub> :      Glucosa → 2 piruvato + 4 H<sub>2</sub>

Piruvato + H<sub>2</sub>O → Acetato + CO<sub>2</sub> + 2H

Reacciones que utilizan H<sub>2</sub> : Piruvato + 4H → Propionato + H<sub>2</sub>O

2 Acetato + 4H → Butirato + 2H<sub>2</sub>O

Las especies que sintetizan hidrogenaza convierten el hidrógeno metabólico en H<sub>2</sub>, y este es convertido en metano por las arqueas en la siguiente reacción (metanogénesis):

CO<sub>2</sub> + 8H → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O

La cantidad de metano producido en rumen depende de diversos factores, entre los que se han identificado se encuentra la composición de la comunidad microbiana del rumen, responsable de la generación de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, principalmente en cuanto a las altas poblaciones de protozoos (Guyader et al., 2014) y la proporción dentro de la población de bacterias de aquellas que producen H<sub>2</sub> con respecto a las que no lo producen (Tapio et al., 2017), y de igual forma la composición de especies dentro de las poblaciones de arqueas metanogénicas (Zhou et al., 2011 , Danielsson et al., 2012 y Danielsson, 2016.)

Otro de los aspectos importantes en cuanto a la producción de metano, es la cantidad de alimento consumido y la composición de este alimento (Tamminga et al., 2007). Esto quiere decir que factores tales como la digestibilidad de un alimento junto con la tasa de pasaje tienen una relación inversamente proporcional con la producción de metano (Janssen, 2010). En este mismo sentido, la calidad nutricional del forraje en cuanto a proteína cruda (PC) y fibra neutro detergente (FND), está también altamente correlacionado con altas emisiones de metano tanto en ganadería de leche como de carne (Ellis et al., 2007), y son además los principales factores que afecta la productividad de los hatos.

Los animales bajo dietas en las cuales los forrajes son el tipo de alimento predominante, producen más metano que aquellos alimentados con granos u otros suplementos (Beauchemin y McGinn, 2005). Esto se debe principalmente al alto contenido de celulosa o hemi-celulosa y al alto contenido de fibra en los forrajes, ya que estos compuestos son poco degradables (Chaves et al., 2006). Con respecto a esto, Janssen (2010), reporta diversos estudios en donde se demuestra que forrajes con alto contenido de celulosa producen más metano que aquellos con mayor contenido de hemi-celulosa. Es importante considerar en este punto también que forrajes jóvenes tienen menos fibra que los forrajes viejos y por esta razón una pradera pastoreada en el momento adecuado va a influir en la producción de CH<sub>4</sub> (Van Soest, 1994).

En este sentido, Moss (2000) reporta que animales a los que se les incluye en la dieta carbohidratos fácilmente fermentables presentan una reducción en la producción de metano y que en forrajes a los cuales se les hace un procesamiento (ensilaje, picado o tratamiento químico) previo a ser suministrados a los animales, disminuye la formación de metano ruminal (Janssen, 2010).

Dado que se identifica que existen diferentes tipos de alimentos y características de estos que reducen las emisiones entéricas y que son conocidas en gran medida las interacciones y reacciones químicas mediante las cuales se produce CH<sub>4</sub> dentro del rumen de los bovinos, es posible enmarcar el entendimiento de esto dentro de un análisis con enfoque de sistemas.

Dentro de la investigación con enfoque en sistemas, la modelación es una de las herramientas más utilizadas y poderosas, ya que permite identificar las interacciones entre los diversos componentes (Francis et al, 2003). Con la modelación se busca hacer una

representación aproximada de la realidad y su propósito es ayudar a entender el funcionamiento de un sistema (Stoorvogel et al, 2004). Sin embargo, los modelos, en este caso agropecuarios aún tienen muchos vacíos de información y en algunos casos no representan bien los sistemas reales, debido a la complejidad inherente a ellos. No obstante, dada su utilidad, la modelación, desde hace años viene jugando un papel importante en la formulación de políticas (Pacini et al., 2004; Janssen y van Ittersum, 2007; Happe y Balmann, 2008 y Vayssières et al, 2011), ya que se ha convertido en una herramienta extensamente utilizada para la toma de decisiones. Cobra también relevancia la modelación para poder explicar procesos en sistemas donde existe poca información (Thornton y Herrero, 2001) y hay escasos recursos para generarla. Por esta razón se recomienda el uso de modelos para resolver problemas a escala regional, como es el caso de este trabajo de investigación.

## **3.2 Metodología**

### **3.2.1 Estimación de las emisiones de metano**

En la actualidad existen diversas metodologías para determinar las emisiones de metano entérico algunas de ellas corresponden a mediciones directas in vivo e in vitro de la concentración de este gas, y otras corresponden al uso de variables proxy, es decir indicadores o rasgos indirectos, los cuales pueden ser estimados a través de mediciones invasiva sobre los animales (por ejemplo volumen del rumen) o a través de la medición de variables externas al animal (por ejemplo producción de leche).

Las mediciones in vivo e in vitro, son metodologías que generan datos de alta precisión pero su aplicación es limitada, debido directa o indirectamente, al alto costo que tiene su aplicación. Entre estas metodologías se encuentran el análisis de cromatografía de gases de la digestión in vitro, las cámaras de respiración (Armsby, 1903; Kellner, 1913; tomado Hammond et al., 2016), la técnica del gas trazador hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) (Zimmerman, 1993; Johnson et. al, 1994; tomado Hammond et al., 2016), el sistema automatizado GreenFeed (Zimmerman y Zimmerman, 2012), el detector de metano láser de mano (Chagunda et. al, 2013), entre otras.

Las estimaciones a través de variables proxy, la mayoría de las veces, son un poco más económicas, sin embargo su precisión es más baja ya que no consideran las condiciones únicas de cada animal. No obstante, existe una gran cantidad de variables proxy para determinar producción de metano en el rumen algunas de las más precisas en dicha estimación, identificadas según la información colectada por Negussie (2017), corresponden a la medición del consumo de alimento (de Haas et al., 2011), la determinación de la ingesta de energía bruta (Moraes et al., 2014), la medición con espectroscopia en el infrarrojo medio sobre la leche (Vanlierde et al., 2015) y la producción de leche (Watt et al., 2015).

Sin embargo, existe otra forma de estimar las emisiones de metano como resultado de la identificación y descripción de las variables proxy, ya que por lo general al final de cada trabajo de investigación se generan representaciones matemáticas de los procesos identificados y de esta forma se explica de forma parcial o completa la respuesta de una variable dependiente (en este caso el metano), a los cambios en una o varias variables independientes (las diversas variables proxy). Estas descripciones matemáticas, al ser representaciones abstractas de procesos reales, son llamadas modelos. Estos modelos matemáticos al ser construidos con un número finito de datos, tienen una incertidumbre asociada, sin embargo en muchas ocasiones representan de forma acertada tendencias, que permiten predecir cuantitativamente la respuesta de variables dependientes a variables independientes construidas con base en condiciones hipotéticas.

Dentro del estudio de la productividad y la eficiencia de los procesos en los sistemas de producción agropecuaria, el uso de modelos ha sido altamente difundido, principalmente por permitir el manejo de grandes volúmenes de información y la evaluación constante de la respuesta de procesos ampliamente conocidos y matemáticamente descritos. Ambas características hacen de los modelos, metodologías atractivas para explicar de forma certera y a bajo costo, fenómenos cuyo impacto debe ser evaluado a gran escala.

Como se evidencia en los párrafos anteriores, para la realización de este trabajo, se hizo una revisión de diversas metodologías que sirvieran para determinar la producción de metano en los animales de las fincas caracterizadas en el piedemonte, sin embargo dado el tiempo de ejecución del proyecto (2 años), el alto volumen de datos a procesar (672 animales, 14 dietas y 2 épocas del año) y los recursos con los que se disponía (72.2 millones de pesos), se determinó que la alternativa metodológica más ajustada a estas

condiciones, era el uso de uno o varios modelos que estimaran emisiones de metano y considerara características de los animales de las fincas (edad, sexo, estado fisiológico, genética, etc.), calidad de los alimentos suministrados a dichos animales (contenido de fibra, proteínas, azúcares, etc.) y pudieran adicionalmente estimar variables productivas tales como producción de leche y carne.

Entre los modelos que se consideraron están CNCPS (Fox et al, 2004), Isabella (Smallegange y Brunsting, 2002), LIFE-SIM (Velarde et al., 2006) y Ruminant (Herrero, Fawcett y Jessop, 2002). El modelo CNCPS se descartó debido a que los parámetros necesarios para su uso no están disponibles y su determinación es altamente costosa. Por su parte el modelo Isabella, para este trabajo es funcional de forma parcial ya que podría servir para determinar consumo de alimento, pero no directamente para estimar metano, por lo que solo generaría de forma simulada una proxy.

El modelo LIFE-SIM por su parte, se ajusta a los parámetros básicos necesarios para este trabajo, sin embargo al no haber la posibilidad de automatizar la corrida de muchos animales de forma simultánea, el tiempo de modelación para simular todos los animales y las dietas se vuelve muy largo. Finalmente el modelo Ruminant, se ajusta a los parámetros considerados en este trabajo, sirve para estimar producción de leche y de carne, y estima las emisiones de metano. Su ajuste, según validaciones recientes realizada en Brasil, es muy bueno con respecto a mediciones reales (Mendes et al., 2016) y adicionalmente se puede automatizar el código del modelo para poder realizar simultáneamente la corrida de muchos animales con distintas dietas

Por lo anterior, para la realización de este trabajo se seleccionó el modelo Ruminant, el cual adicionalmente a las cualidades antes descritas, ha sido utilizado en Colombia por el IDEAM para la determinación de los coeficientes nacionales de emisiones de metano entérico en bovinos y en la construcción de la “Nota de Información de la NAMA” (NINO) (Ministerio de Ambiente de Colombia, et al., 2015), los cuales son dos documento de política pública, lo que muestra la relevancia técnica que tiene el modelo a nivel nacional.

### **3.2.2 Modelo de rumen (Ruminant)**

De acuerdo con la definición de France y Thornley (1984), Ruminant es un modelo dinámico, mecanístico y determinístico, y con enfoque integracionista según la definición de Cruz et al., 2016, el cual está diseñado principalmente para estimar el consumo de forrajes, la digestión de los mismos y la producción de carne y leche en animales rumiantes (Herrero et al., 2013).

El consumo es definido teniendo como supuestos que un animal en un estado fisiológico conocido, con una producción y una condición corporal conocida, tendrá un consumo determinado de forraje, el cual sólo estará limitado por restricciones tales como la biomasa del forraje, las características nutricionales del mismo y algunas limitaciones de comportamiento del animal (Herrero et al., 2013). La representación matemática de los procesos de ingesta, digestión y paso de los alimentos, están basados en el modelo de Illius y Gordon (1991), en donde los procesos antes descritos se calculan a través de ecuaciones diferenciales encadenadas en donde sucesivamente cada una de ellas representa lo sucedido hora tras hora después de ingerido el alimento, expresándose finalmente los resultados obtenidos al final de 24 horas simuladas de digestión.

Adicionalmente, Ruminant utiliza los requerimientos nutricionales del animal, con base en el Sistema de Proteínas y Carbohidratos Netos de Cornell (CNCPS por sus siglas en inglés (Sniffen et. al., 1992)) y el Consejo de Investigación Agropecuaria del Reino Unido (AFRC por sus siglas en inglés (Alderman y Cottrill (1993))), con el fin de predecir el rendimiento de leche y carne del animal.

Con base en lo anterior, Ruminant está dividido en diferentes módulos sobre los cuales se deben introducir los parámetros de funcionamiento del modelo.

El primer módulo, corresponde al animal y por lo tanto es donde se debe introducir el grupo etario, sexo, peso actual, peso potencial y rendimiento potencial de leche en los casos que esto aplica (Tabla 3-1).

Del mismo modo se debe introducir la composición porcentual de la leche en cuanto a grasas proteínas y lactosa y la tasa máxima de ganancia de peso conocida para la raza o la especie de rumiante.

**Tabla 3-1.** Parámetros de los animales utilizados para este trabajo en Ruminant

Grupo etario	Peso estimado (kg)	Peso Potencial (kg)	Rendimiento potencial de leche (l/día)	Comentarios
Vacas lactando	430	520	12	Considerando pérdidas de peso durante la lactancia
Vacas secas	470	520	No aplica	Considerando una vaca recuperada después de la lactancia y posiblemente preñada, dependiendo el caso.
Novillas	250	520		
Ternereras	80	520		
Ternereros	80	650		
Novillos 1 - 2 años	250	650		
Novillos 2 - 3 años	320	650		
Toros	600	650		

El segundo módulo es donde se debe seleccionar el tipo de sistema de alimentación al cual está sometido el animal. Las opciones a escoger son el libre pastoreo, y los sistemas estabulados y semiestabulados.

El tercer módulo, de requerimientos nutricionales, cuenta con la opción de escoger el sistema AFRC o NRC, de los cuales el segundo fue el escogido en este trabajo, dada la aceptación encontrada en diversos trabajos realizados para sistemas ganaderos en el trópico.

El cuarto módulo, es el correspondiente a la alimentación y es donde se determina la base forrajera y los suplementos con los cuales se alimenta el animal. Para esto es necesario construir una base de datos con los análisis bromatológicos y las tasas de degradación de los alimentos a evaluar. Para este fin el modelo cuenta con un submódulo en el cual se pueden introducir diferentes tipos de forrajes, siempre y cuando se cuente con información básica correspondiente a los siguientes parámetros:

Fibra detergente neutra (FDN), proteína cruda (PC), fracciones A y B de los carbohidratos (ACHO y BCHO) y sus respectivas tasas de degradación, fracciones A y B de la proteína cruda (ACP y BCP) y sus respectivas tasas de degradación, y contenido de cenizas.

### 3.2.3 Dietas típicas

Para la determinación de las dietas típicas utilizadas en la actualidad en la región se utilizaron los datos descritos en el capítulo anterior en cuanto a la distribución de pasturas de las fincas tipificadas, de esta forma se determinó la proporción de cada alimento consumida por cada tipo de animal.

Con esta información y la consulta de diversos datos colectados por varias instituciones en cuanto a análisis bromatológicos de los distintos forrajes, es posible hacer un acercamiento a la calidad nutricional de los alimentos. Para este fin se utilizaron datos de forrajes de la base de datos de CIAT, CIPAV, CORPOICA y algunos estudios realizados en la región.

Los pastos modelados sobre los hatos típicos de cada clúster fueron:

- *Brachiaria humidicola* (Pasto dulce)
- *Brachiaria decumbens* (Pasto amargo)
- *Brachiaria brizantha* (Brizanta, Marandú)
- *Brachiaria dictyoneura* (Pasto llanero)
- Sabanas nativas (Mezcla de pastos nativos y naturalizados)
- *Brachiaria arrecta* (Brachipará)
- *Cynodon plectostachyus* (Pasto estrella)
- *Hyparrhenia rufa* (Pasto Puntero)
- *Panicum máximum* (Mombaza)

Como cada uno de estos forrajes cuenta con características nutricionales diferentes, se organizó una base de datos donde se caracterizó bromatológicamente cada uno de ellos, tal y como se registra en la Tabla 3-2.

Como se puede observar, la mayoría de ellos cuenta con características nutricionales que indican baja calidad, como alto contenido de fibras y moderados contenidos de azúcares y proteínas, lo que es una proxy para predecir previamente a la modelación, que hay una alta probabilidad de que los resultados muestren rendimientos bajos y emisiones altas en todos los sistemas productivos a trabajar.

**Tabla 3-2.** Parámetros de los forrajes actuales utilizados en Ruminant

Alimento	FDN (g/kg)	PC (g/kg)	CHO (g/kg)	Cenizas (g/kg)	Grasas (g/kg)
<i>B. humidicola</i> (Seco)	760,0	71,0	70,0	75,0	15,0
<i>B. humidicola</i> (Lluvias)	682,0	95,0	110,0	100,0	13,0
<i>B. decumbens</i> (Seco)	730,0	80,0	103,0	75,0	12,0
<i>B. decumbens</i> (Lluvias)	670,0	115,0	118,0	85,0	12,0
<i>B. brizantha</i> (Seco)	731,2	58,5	100,0	95,7	14,6
<i>B. brizantha</i> (Lluvias)	680,0	100,0	110,0	100,0	10,0
<i>B. dyctyoneura</i> (Seco)	717,4	64,0	100,0	100,0	18,6
<i>B. dyctyoneura</i> (Lluvias)	680,0	90,0	137,0	80,0	14,0
Gramas (Seco)	741,0	70,0	101,0	70,0	21,0
Gramas (Lluvias)	690,0	90,0	92,0	110,0	18,0
<i>B. arrecta</i> (Seco)	751,0	75,0	70,0	90,0	14,0
<i>B. arrecta</i> (Lluvias)	714,0	88,0	84,0	101,0	13,0
<i>C. plectostachyus</i> (Seco)	700,0	90,0	100,0	100,0	10,0
<i>C. plectostachyus</i> (Lluvias)	643,0	130,0	117,0	100,0	10,0
<i>H. rufa</i> (Seco)	742,0	50,0	82,0	110,0	16,0
<i>H. rufa</i> (Lluvias)	685,0	90,0	101,0	110,0	14,0
<i>P. maximum</i> (Seco)	689,0	100,0	90,0	111,0	10,0
<i>P. maximum</i> (Lluvias)	660,0	110,0	101,0	115,0	14,0

### 3.2.4 Escenarios de mejoramiento en las dietas

Dado que se considera que la ganadería de la región puede mejorar sus indicadores productivos, con la inclusión de dietas de mayor calidad y del mismo modo se puede intensificar reduciendo emisiones de metano, se determinaron algunas alternativas de cambio para ser evaluadas tanto productivamente, como económicamente (siguiente capítulo).

Sin embargo la reconversión productiva tendría innumerables alternativas para evaluar, ya que hay muchos tipos de forrajes, suplementos, subproductos, entre muchas otras alternativas, por lo que se debe hacer una selección de algunas de ellas para cumplir los objetivos de este trabajo.

Por esta razón, los escenarios de cambio en las dietas mencionadas, se priorizaron a partir de diversas reuniones realizadas con funcionarios de instituciones que trabajan en la región, como son FEDEGAN, CIPAV, CORMACARENA, CIAT, CORPOICA, Unillanos,

entre otras. Del mismo modo se utilizaron las medidas de mitigación priorizadas para el sector ganadero en el Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquia, (proyecto aun sin publicaciones)

Se seleccionaron finalmente las siguientes alternativas tecnológicas propuestas en la región, tanto para aumentar la producción como para reducir las emisiones de metano:

- Sistemas silvopastoriles de mediana intensidad (Cercas vivas con árboles de *Acacia mangium*).
- Bancos mixtos forrajeros (*Tithonia diversifolia* y *Pennisetum sp.*).
- Suplementación con concentrados comerciales de la marca solla® (de acuerdo a la recomendación de la etiqueta de cada producto).
- Rehabilitación de pasturas con pastos mejorados (híbridos Mulato I y II).
- Silo de maíz para las épocas de verano.

Como cada una de estas alternativas nutricionales cuenta con características diferentes, se organizó también una base de datos donde se caracterizó bromatológicamente cada una de ellas, tal y como se observa en la Tabla 3-3. Como se puede identificar, la mayoría de estos alimentos cuenta con características nutricionales mucho mejores que las de los pastos utilizados en las dietas básicas, ya que tienen contenidos de fibra más bajos y dependiendo el caso, altos contenidos de proteína o de carbohidratos, lo que permite una mejor digestibilidad.

**Tabla 3-3.** Parámetros de los alimentos utilizados en Ruminant para los escenarios

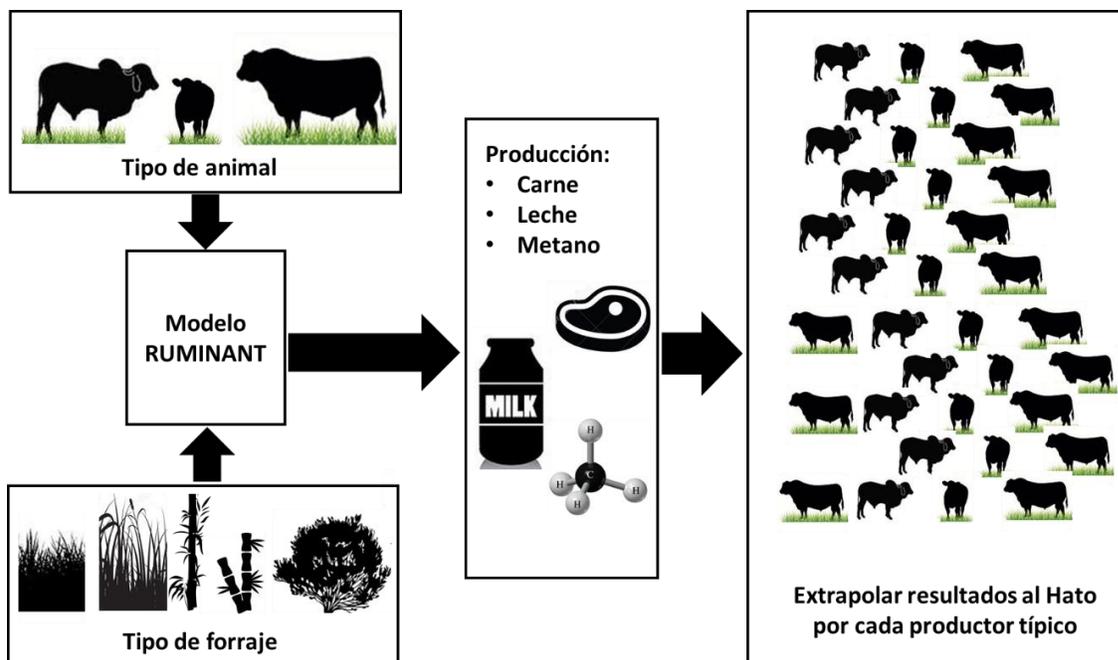
Alimento	FDN (g/kg)	PC (g/kg)	CHO (g/kg)	Cenizas (g/kg)	Grasas (g/kg)
B. híbrido Mulato (Seco)	615,0	104,0	133,0	125,0	23,0
B. híbrido Mulato (Lluvias)	575,0	112,0	166,0	121,0	26,0
Silo Maíz	600,0	88,0	236,0	58,0	17,0
Banco Mixto ( <i>Pennisetum sp.</i> y <i>T. diversifolia</i> )	480,0	145,0	110,0	80,0	20,0
B. híbrido Mulato - Cerca Viva	540,0	132,0	182,0	118,0	28,0
Solla Odeño Extra (Cria - DP) - humedad 13%	245,0	145,0	485,0	100,0	25,0
Solla SollaPro 40 (Cria y Ceba todos) - humedad 13%	105,0	410,0	355,0	100,0	30,0
Solla Novillas (DP) - humedad 13%	185,0	145,0	540,0	100,0	30,0
Solla MasLeche 12% (DP) - humedad 13%	255,0	122,0	498,0	100,0	25,0

Para la estimación de emisiones de metano de las dietas mejoradas, el consumo de materia seca fue estimado por el mismo modelo en el caso de los forrajes y en el caso de los suplementos como concentrados y silo, se asignó una ración diaria por cada tipo de animal. De tal forma que el modelo simulara para cada animal un consumo *ad libitum* de los pastos de las dietas básicas y lo complementara con el suplemento suministrado a cada animal.

### 3.2.5 Estimación de la producción y las emisiones por tipo de hato

En cuanto a los animales y los distintos hatos, la modelación se hizo en dos etapas diferentes, la primera se enfocó en determinar la respuesta de cada uno de los animales por grupo etario bajo los diferentes sistemas de producción, a los tipos de pastos típicos que utilizan actualmente, para determinar las emisiones de metano y la producción (de carne y de leche según cada caso). La segunda etapa correspondió a un escalamiento de las emisiones y la producción a cada uno de los hatos de la región (Figura 3-1) con base en la composición determinada por tipo de productor que se describió en el capítulo anterior.

**Figura 3-1** Esquema metodológico de estimación de emisiones y producción



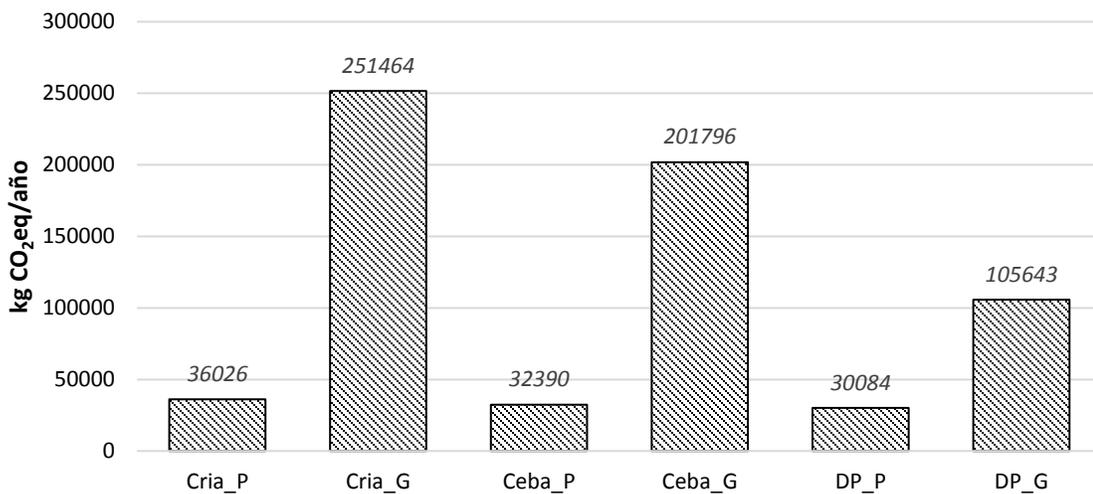
### 3.3 Resultados y discusión

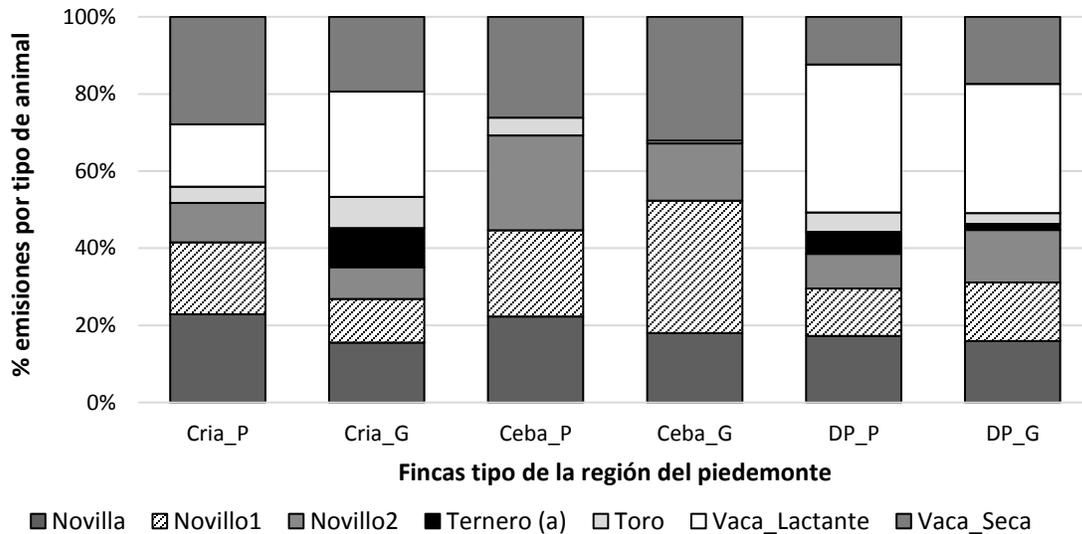
#### 3.3.1 Emisiones asociadas a los sistemas ganaderos actuales

Las emisiones asociadas a los sistemas ganaderos actuales (línea base) muestran una marcada tendencia asociada al tamaño de los hatos tal y como se observa en Figura 3-2 por esta razón se puede ver que los sistemas de producción de tamaño grande generaron unas emisiones acumuladas muy altas con respecto a los pequeños. Sin embargo, además del tamaño, es importante evaluar la eficiencia productiva por cada grupo de animales, ya que de forma particular cada uno de ellos de acuerdo a la composición del hato, la alimentación y las mezclas de los pastos que componen su dieta, puede variar (Figura 3-3).

Tal y como se puede apreciar en la Figura 3-4 y la Figura 3-5 a pesar de que los distintos sistemas de producción cuentan con los mismos tipos de animales, las emisiones por cada uno de ellos son diferenciales dependiendo del tipo de alimento que tienen en cada uno de los sistemas de producción evaluados. Por esta razón en las fincas que se tienen pastos de más baja calidad, como en Ce\_G, sus emisiones son mayores.

**Figura 3-2** Emisiones totales por sistema de producción



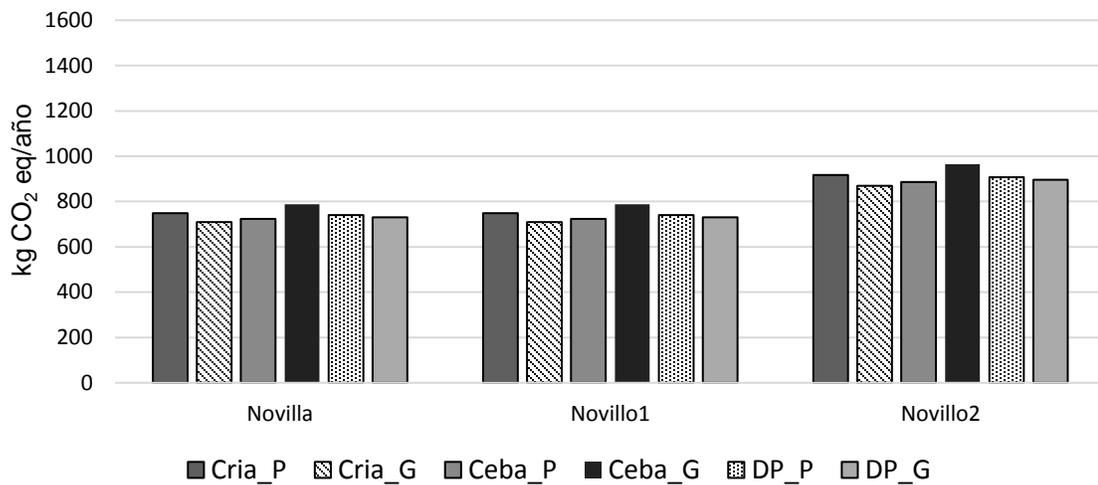
**Figura 3-3** Aporte a las emisiones de cada finca tipo por grupo etario

Del mismo modo al determinar las emisiones por cada uno de los pastos modelados que componen las dietas de las distintas fincas tipo, se observa una variabilidad en cuanto a las emisiones y la ganancia de peso teniendo claramente una relación muy variable con respecto a cada tipo de pastura. Como ejemplo se tomó en este trabajo a un novillo de 250 kg al cual se le modelaron el consumo de todos los tipos de pasturas como si fueran su único alimento (Figura 3-6).

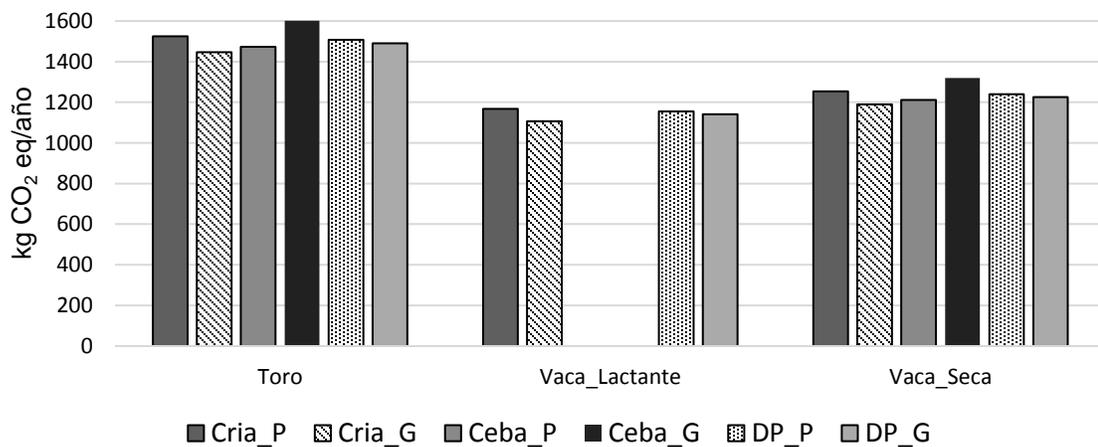
En este sentido vale la pena analizar la ineficiencia productiva de las gramas y los pastos *B. humidicola*, *B. dictyoneura*, *H. rufa* y *B. arrecta*, con base en los resultados observados en la Figura 3-6. Este resultado es acorde con los descrito por Ellis et al. (2007), ya que estos pastos fueron los que presentaron mayores contenidos de FDN tanto en época seca como en época de lluvia. Adicionalmente tal y como reporta Knapp et al. (2014), los bajos contenidos de azúcares y proteína hace que estos forrajes sean de baja calidad.

Por el contrario, resaltan los pastos como *B. decumbens*, *P. máximum* y *C. plectostachyus*, los cuales cuentan con buenas características nutricionales, presentan mayor eficiencia productiva y esto se ve reflejado en mayor ganancia de peso a pesar de que de emisiones netas de metano son más altas que con los forrajes de mala calidad (Figura 3-6).

**Figura 3-4** Emisiones de metano por animales en etapa de crecimiento



**Figura 3-5** Emisiones de metano por animales adultos

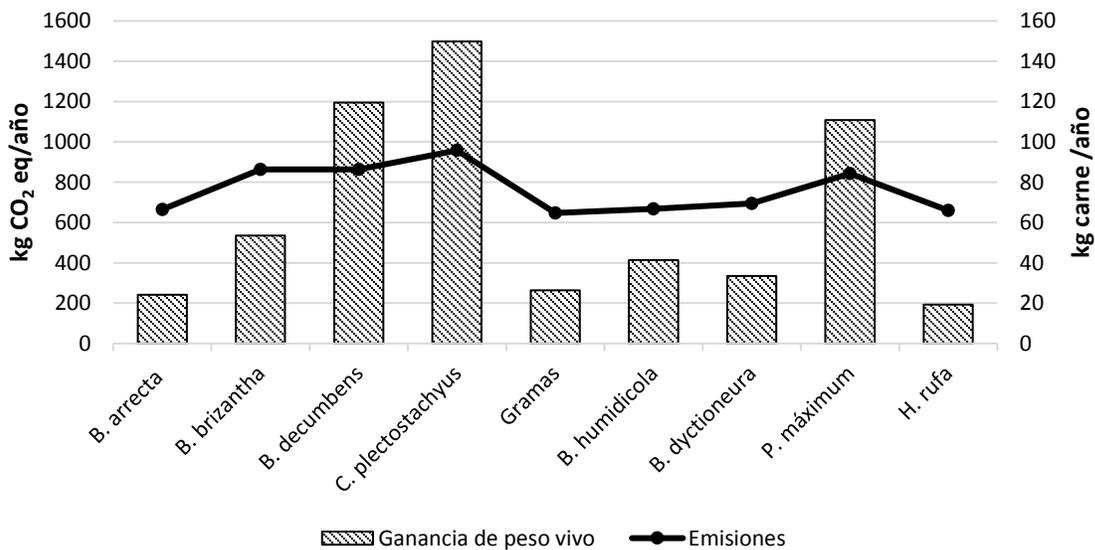


Del mismo modo, al evaluar la producción de leche en una vaca tipo de 430 kg bajo las distintas pasturas, el comportamiento es similar al presentado en la evaluación de ganancia de peso vivo, sin embargo, se observa que la eficiencia en la producción de leche a pesar de que el pasto sea de baja calidad, es mayor que para la producción de carne. De nuevo resalta la eficiencia productiva de *C. plectostachyus*, *P. máximo* y *B. decumbens* en cuanto a producción de leche, al igual que las altas emisiones netas asociadas a su uso (Figura 3-7).

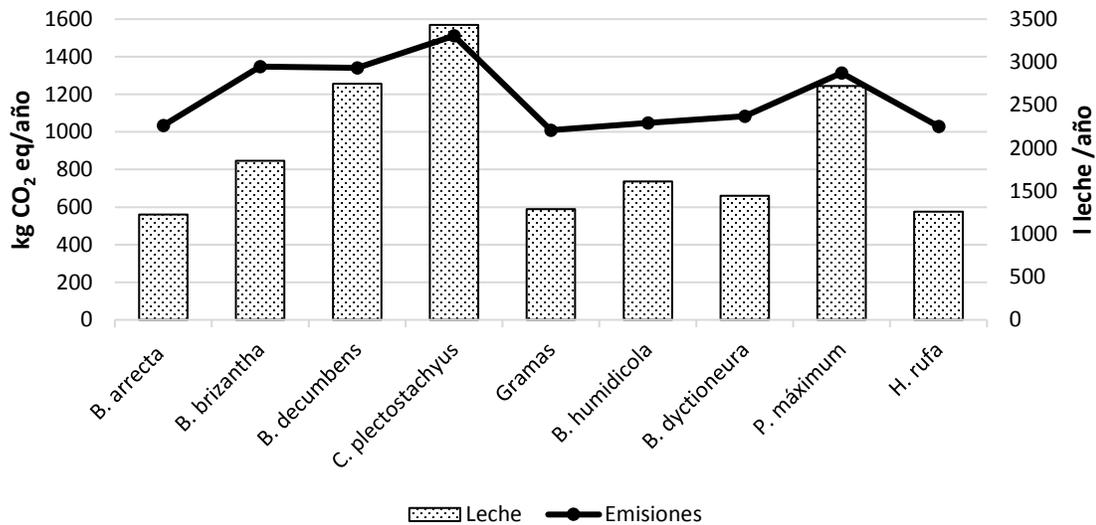
Vale la pena decir que la eficiencia en la producción bajo los diferentes pastos es muy diferente ya que se cuenta tanto con pasos de alta calidad, como *C. plectostachyus*, hasta pastos de muy baja calidad, como las gramas nativas. Del mismo modo es importante evaluar comparativamente pasturas como *B. brizantha* y *B. decumbens* ya que como resultado en la modelación se observa que animales que las consumen producen emisiones de metano similares en cantidad, sin embargo el potencial productivo de ambos forrajes es muy diferente, observándose en la Figura 3-6 que con el uso de *B. decumbens* es posible que los animales dupliquen la ganancia de peso con respecto a aquellos que consumen *B. brizantha* y de igual forma las vacas lactantes que consumen *B. decumbens* presentan un 25% más de producción de leche que aquellas que se alimentan con *B. brizantha*, tal y como se aprecia en la Figura 3-7.

Los resultados presentados en la Figura 3-6 y la Figura 3-7, permiten aseverar que en el futuro es posible intensificar la ganadería y convertir esta actividad en un sistema productivo sostenible donde se puede maximizar la producción de carne y de leche minimizando las emisiones de metano.

**Figura 3-6** Emisiones de metano y ganancia de peso vivo en un novillo de 250 kg bajo diferentes pasturas



**Figura 3-7** Emisiones de metano y producción de leche en una vaca de 430 kg bajo diferentes pasturas



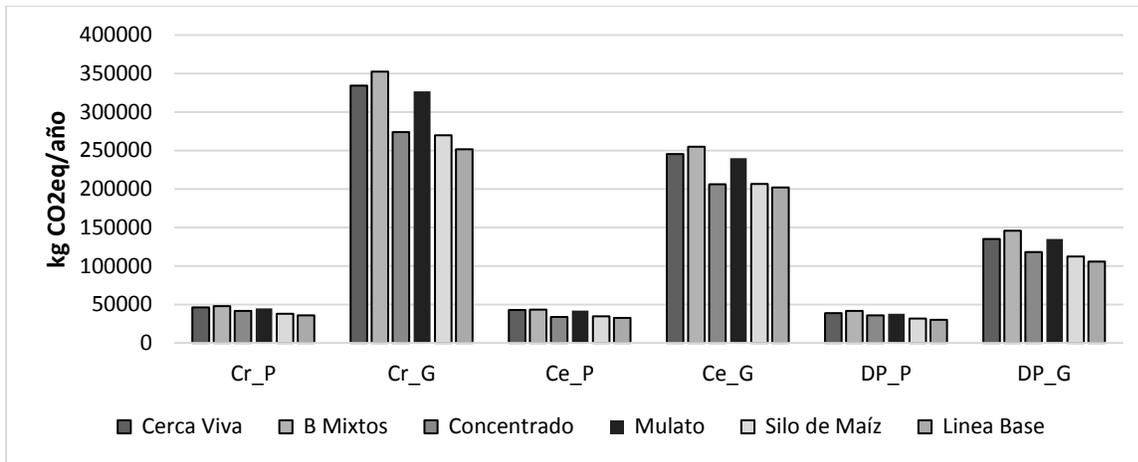
### 3.3.2 Emisiones esperadas con implementación de escenarios de cambio en las dietas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la línea base, el planteamiento de alternativas nutricionales de mayor calidad busca reducir las emisiones de metano entérico de forma relativa, ya que para aumentar la producción la dieta debe mejorar y esto por lo general genera una mayor cantidad de emisiones netas de metano. Sin embargo la estrategia a la que se apunta en este trabajo es a diluir las emisiones por tipo de producto, es decir que bajo los escenarios de mejoramiento de dietas, la generación de un kilogramo de carne o un litro de leche se realice con menor cantidad de emisiones.

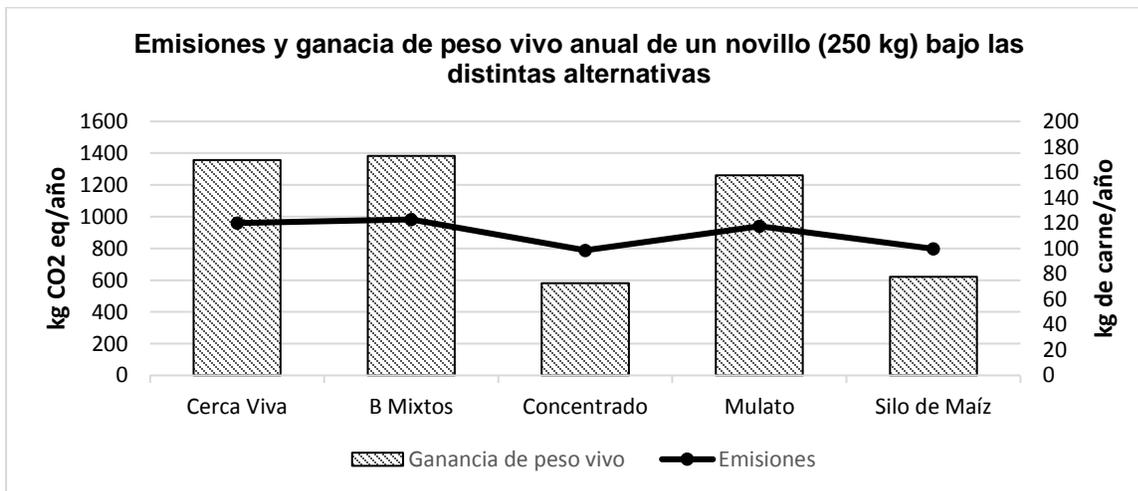
En la Figura 3-8 se observan las emisiones totales esperadas por los distintos sistemas de producción bajo las alternativas nutricionales propuestas. Al igual que en el numeral anterior se realizó una comparación entre las distintas alternativas alimenticias evaluadas para el levante de un novillo de 250 kilogramos (Figura 3-9) y la producción de leche de una vaca típica de 430 kilogramos (Figura 3-10). Los resultados son variables entre los tipos de alimentos modelados, sin embargo vale la pena resaltar que bajo alternativas como las cercas vivas, los bancos mixtos forrajeros y el pasto mulato se observan ganancias por animal cercanas a los 150 o 160 kilogramos anuales, los cuales son rendimientos muy buenos comparativamente con los datos estimados actualmente para la

región. Del mismo modo se puede observar que la brecha correspondiente a las emisiones entre las distintas alternativas no es tan amplia como lo es entre los pastos evaluados en la línea base, sin embargo las diferencias productivas si son considerables y podrían hacer una diferencia en el momento de tomar una decisión para hacer una reconversión en la matriz productiva de una finca. No obstante es necesario evaluar adicionalmente las ganancias, inversiones correspondientes y demandas de mantenimiento anuales, para poder determinar finalmente la rentabilidad de cada uno de los sistemas propuestos. Igualmente en la evaluación realizada para la producción lechera los resultados son muy similares a los descritos anteriormente.

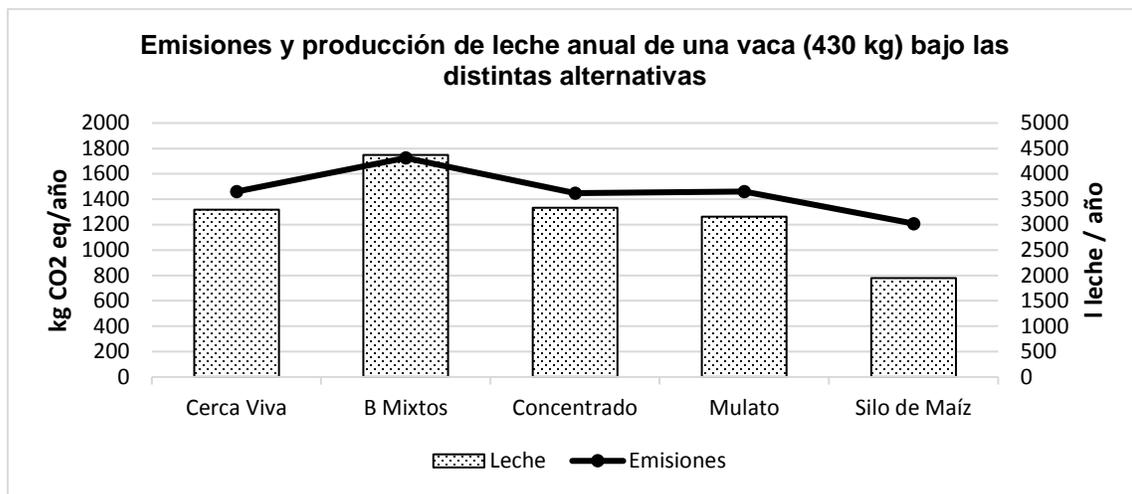
**Figura 3-8** Emisiones de metano totales esperadas por sistema de producción



**Figura 3-9** Emisiones de metano y ganancia de peso vivo en un novillo de 250 kg bajo distintas alternativas alimenticias



**Figura 3-10** Emisiones de metano y producción de leche en una vaca de 430 kg bajo distintas alternativas alimenticias



### 3.3.3 Comparación de la eficiencia productiva de los sistemas ganaderos estudiados

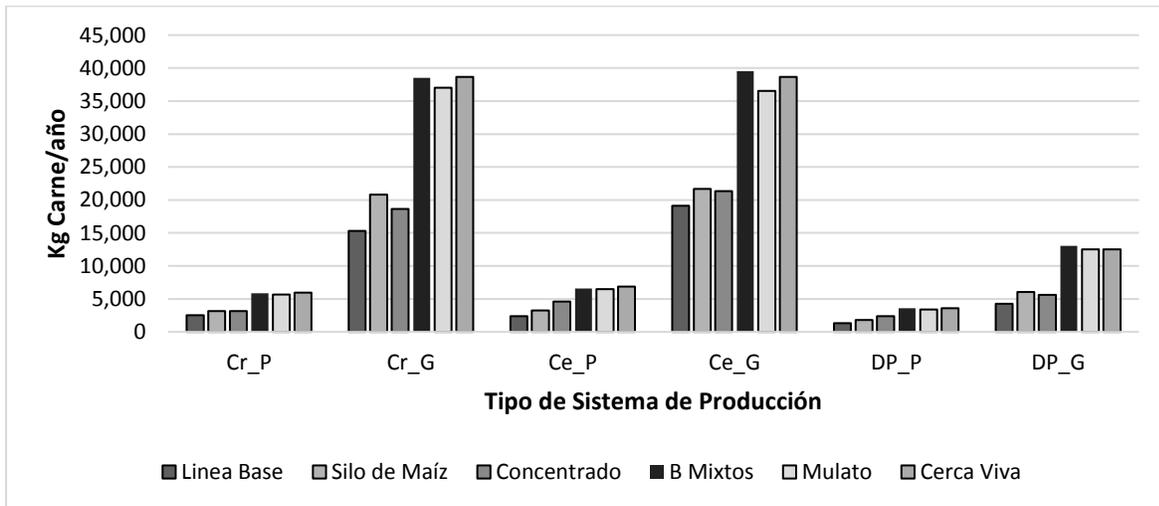
Cómo se menciona en el numeral anterior una de las formas para evaluar la eficiencia productiva de los sistemas ganaderos es determinar no sólo la cantidad producida sino cómo se reducen las pérdidas energéticas asociadas a las emisiones de metano, por esa razón es importante determinar la cantidad de kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente generados por cada tipo de alimento para la producción de un kilogramo de leche o un kilogramo de carne, dependiendo el sistema productivo evaluado.

- **Emisiones por producción de carne**

En cuanto a las emisiones por producción de carne, cómo se observa en la Figura 3-11, las líneas bases de cada uno de los sistemas presentan rendimientos muy bajos, sin embargo se puede apreciar también cómo cambian de forma incremental a medida que se implementan las distintas alternativas alimentarias propuestas. En este sentido, vale la pena rescatar que el potencial de aumento en la producción de bancos mixtos, pasto mulato y cercas vivas con pastos mejorados, son las alternativas que muestran mayores incrementos en la producción. Sin embargo alternativas como la suplementación con silo de maíz o con concentrados comerciales por el contrario no muestran un gran cambio en los rendimientos. Esto se puede deber al efecto de sustitución (Bowman y Sanson, 1996),

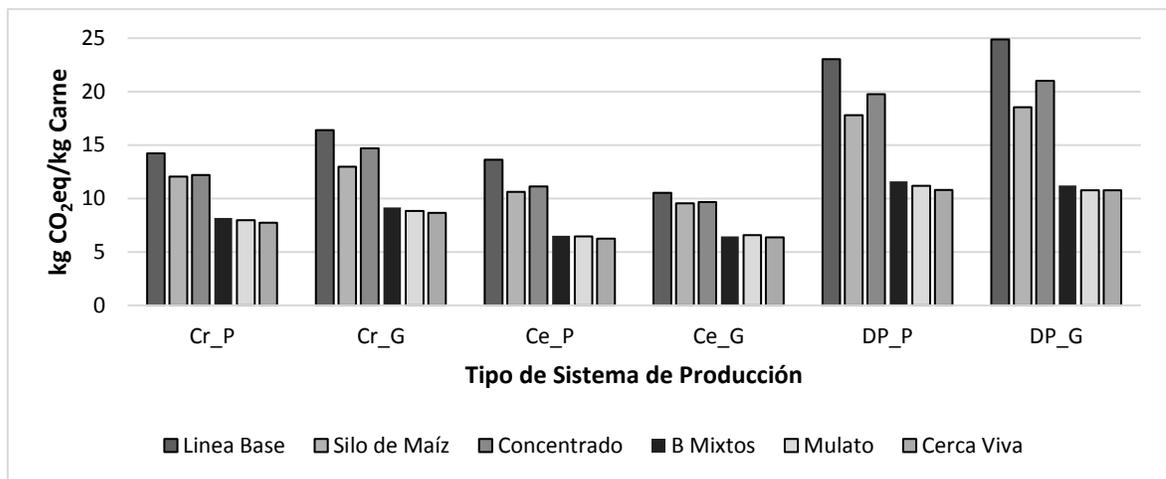
el cual explica que animales cuya base forrajera corresponde a alimentos con altos contenido de fibra y baja calidad, al ser suplementados presentan una sustitución de la dieta basal, disminuyendo el consumo de alimento por parte del animal, lo que en términos generales se refleja en una baja producción. Por esta razón para que tenga un buen efecto la suplementación sobre la producción, la base forrajera deberá ser con alimentos de buena calidad.

**Figura 3-11** Producción potencial de carne por tipo de finca bajo diferentes escenarios



Con respecto a las emisiones por kilogramo de carne producida bajo los diferentes escenarios (Figura 3-12), es evidente cómo se reducen altamente las misiones en todos los sistemas productivos principalmente bajo el uso de pasto mulato, bancos mixtos y cercas vivas, encontrándose que en los casos más extremos, como en las ganaderías de doble propósito, las reducciones pueden ser incluso superiores a la mitad de lo que son actualmente. Por el contrario en ganaderías como la ceba pequeña, la implementación de las medidas no muestra una marcada diferencia entre la reducción de emisiones de metano. Con base en lo anterior, puede ser mejor estrategia, desde un enfoque regional de emisiones, apuntarle de forma prioritaria a la reconversión de las ganaderías de doble propósito. De igual forma vale la pena mencionar que bajo las estrategias de suplementación con silo y concentrado, las reducciones no son tan altas, esto se debe a que los incrementos en la producción, tal como se mencionó anteriormente no son tan marcados. Sin embargo lo más importante es que con la implementación de cualquiera las estrategias propuestas se puede garantizar qué habrá una reducción relativa de las emisiones de metano, con respecto a las emisiones actuales.

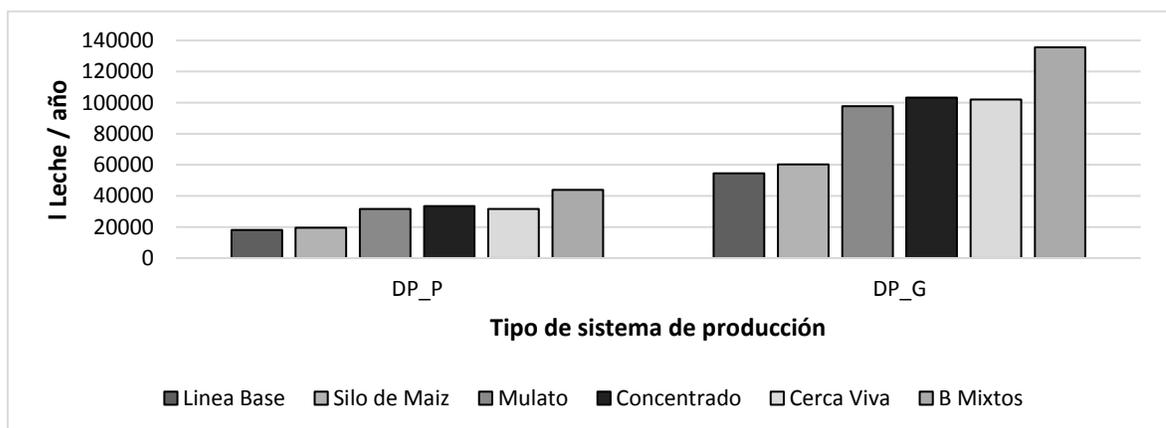
**Figura 3-12** Emisiones de metano estimadas por kilogramo de carne producido bajo distintos escenarios por tipo de finca.



▪ **Emisiones por producción de leche**

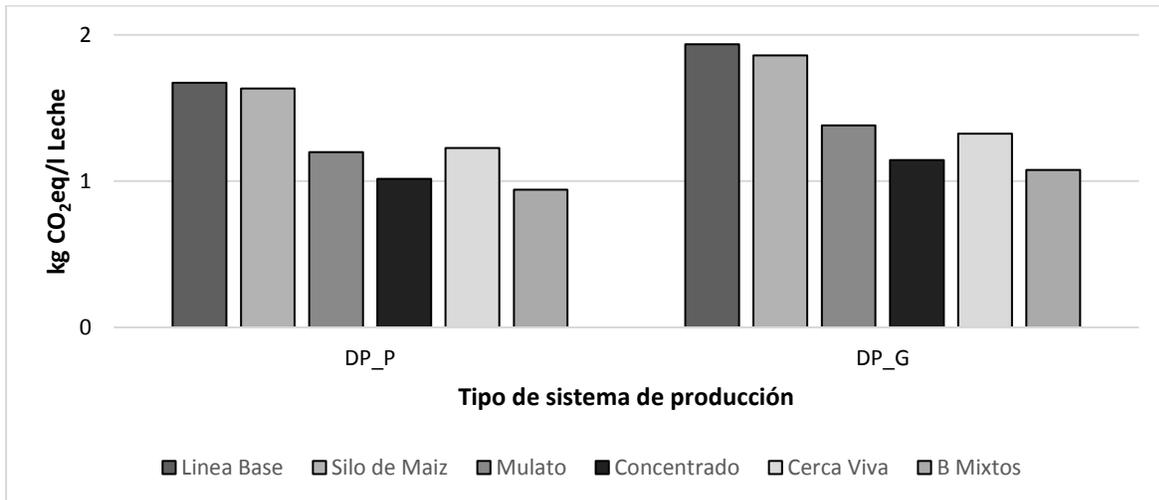
En cuanto a las emisiones por producción de leche, cómo se observa en la Figura 3-13, las líneas bases de cada uno de los sistemas presentan rendimientos muy bajos, sin embargo se puede apreciar también como estos aumentan debido a la implementación de las distintas alternativas alimentarias. En cuanto a las fincas de doble propósito, se observa que los incrementos máximos alcanzados, que se presentan bajo la implementación de bancos mixtos forrajeros, son 1,4 veces mayores que con los pastos utilizados en la línea base, lo que indica que todas las alternativas propuestas son viables para aumentar producción.

**Figura 3-13** Producción potencial de leche por tipo de finca bajo diferentes escenarios



Con respecto a las emisiones generadas por cada litro de leche producido bajo los diferentes escenarios (Figura 3-14), es evidente cómo se reducen altamente las misiones en todos los sistemas productivos principalmente bajo el uso bancos mixtos y concentrados. Intrínsecamente el sistema doble propósito pequeño en la actualidad es más eficiente que el grande, en cuanto a emisiones de metano, sin embargo ambos sistemas responden positivamente en cuanto a la reducción de emisiones bajo los distintos escenarios de reconversión productiva. Vale la pena observar que las emisiones esperadas por litro de leche con el uso de pasto mulato y cercas vivas comerciales son similares, sin embargo como se observó anteriormente en cuanto a productividad, son muy diferentes.

**Figura 3-14** Emisiones de metano estimadas por litro de leche producido bajo distintos escenarios



### 3.4 Conclusiones

Con base en los resultados observados, se concluye que bajo la implementación de distintas dietas y ofertando a los animales variedad alimenticia tanto de sistemas de pastoreo cómo de suplementación (silo y concentrado) es posible reducir las emisiones de metano para la generación de leche y carne.

Sin embargo hay alternativas que reducen más que otras y de igual forma hay algunas que generan mayores rendimientos de carne y de leche. Por esta razón se debe hacer un análisis integral al momento de implementar medidas, para buscar un balance entre los aspectos ambientales y los económicos.

Es necesario también, al momento de recomendar medidas de intensificación productiva, considerar las distintas condiciones habilitantes que debe haber para su buen funcionamiento, por ejemplo, al momento de recomendar la suplementación se debe hacer solo para aquellos productores que tienen buena base forrajera para no tener el efecto de sustitución y desperdiciar recursos económicos y nutricionales.

Queda la pregunta de la viabilidad económica de la implementación de dichas alternativas así como la determinación del contexto social en el cual deban o pueden ser aceptadas y adoptadas por los diferentes tipos de productores considerando que a pesar de no haberse realizado en este capítulo, los costos y requerimientos para la implementación de cada una de ellas son diferentes.

Del mismo modo vale la pena determinar, con base en los costos de implementación y teniendo en cuenta que cada uno de los sistemas alimenticios evaluados es diferente, cuál sería el potencial máximo de reducción de emisiones por cada tipo de productor y cuál sería el mínimo costo que este podría asumir para lograrlo. De igual manera es importante determinar cuáles podrían ser algunos incentivos para estimular la reconversión productiva, ya que es posible que muchos productores no cuenten con la mano de obra, capital, crédito y demás condiciones habilitantes para poder hacer dicha reconversión.

Uno de los interrogantes planteados, como consecuencia de los resultados de este estudio, es cómo podría afectarse a los sistemas ganaderos de la región bajo otros escenarios de reconversión productiva no considerados. Sin embargo con base en las metodologías utilizadas en este trabajo, posiblemente en otros estudios se podrán abordar otras alternativas difundidas actualmente o evaluar tecnologías innovadoras que probablemente se desarrollarán en el futuro. De igual forma, de ser posible se recomienda evaluar adicionalmente la implementación de otros tipos de pastura que también son importantes en la región y promovidas tanto por los centros de investigación y comercializadas, como por las distintas empresas dedicadas a la venta de semillas. En ese sentido pueden cobrar relevancia la evaluación de especies o materiales vegetales como el pasto caimán, algunos pastos de corte, las asociaciones entre gramíneas y leguminosas, el uso de especies arbustivas forrajeras, el uso de otros suplementos a base de soya, etc. De igual forma se pueden evaluar otro tipo de productos, como lo son algunos residuos de cosecha y sub productos de otras industrias como por ejemplo la palma que en la región es uno de los cultivos más abundantes. Adicionalmente en un futuro se recomienda la inclusión de otras

variables que pueden influir la producción como lo son factores medioambientales que al alterar la calidad de los forrajes o al generar algún tipo de estrés en los animales generan reducción en el consumo de materia seca y por lo tanto pueden influenciar la reducción en la producción de leche de carne, como por ejemplo las variables climáticas.

Otro de los aspectos a evaluar puede ser el precio tanto de venta de los productos como la carne y la leche, como el costo de los insumos que puedan influenciar finalmente la decisión del tipo de alimentación a utilizar dentro de la finca.

Otro aspecto importante que se debe evaluar aprovechando la coyuntura política nacional e internacional alrededor de la temática del cambio climático y la reducción de emisiones es el pago por una producción más limpia que puede verse traducido a la certificación a los productores y finalmente convertirse en un sello de calidad que pueda mejorar el precio final al consumidor.

Otro aspecto importante que se debe rescatar de algunos de los sistemas evaluados son los cobeneficios que ellos traen. Por ejemplo en el caso de la implementación de las cercas vivas vale la pena tener en cuenta la fijación de carbono que se presenta dentro de los árboles que se están sembrando, del mismo modo en las medidas correspondientes a la siembra de pastos mejorados se podría considerar la fijación de carbono en las raíces de dichos forrajes. De igual forma es posible evaluar los beneficios de los bancos forrajeros en cuanto a la captura de carbono en los arbustos como en el mejoramiento de las condiciones de los suelos por la fijación de nitrógeno y enriquecimiento de los mismos con biomasa y por lo tanto el aumento en la materia orgánica.

Sin embargo no se puede dejar de lado el hecho de que algunas otras medidas como la utilización de silo de maíz y de concentrados comerciales traen consigo unas emisiones previas asociadas a la producción de los mismos; en el caso del maíz durante el proceso de siembra y manejo del cultivo hay unas emisiones asociadas a la mecanización del proceso, la aplicación de fertilizantes, transporte del producto entre otras, y en el caso de los concentrados de forma similar hay unas emisiones asociadas no sólo el proceso de la producción de las materias primas sino al procesamiento de las mismas, por lo tanto a pesar de que en este estudio los resultados nos muestra reducciones considerables dentro de sistema ganadero es probable que si se realizara un estudio de ciclo de vida las emisiones asociadas a estas prácticas fueran mucho mayores.

## Referencias

- Alderman G y Cottrill B (1993) Energy and protein requirements of ruminants: an advisory manual prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients (Cab International, Wallingford, UK).
- Armsby, H.P., (1903). The Principles of Animal Nutrition. J. Wiley y Sons, New York.
- Bannink, A., (2010). Methane emissions from enteric fermentation by dairy cows, 1990-2008. Background document on the calculation method and uncertainty analysis for the Dutch National Inventory Report on Greenhouse Gas emissions, ASG Report, Lelystad, the Netherlands.
- Basset-Mens, C., Ledgard, S., Boyes, M., (2009). Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecol. Econ.* 68, 1615–1625.
- Beauchemin, K.A., McGinn, S.M., (2005). Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets. *J. Anim. Sci.* 83, 653–661.
- Bowman, J.G.P., y D.W. Sanson. (1996). Starch- or fiberbased energy supplements of grazing Ruminants .*Proc. West. Sec. Amer. Soc. Anim. Sci.* 47(suppl. 1):118-135
- Bryant, P. Microbial Methane Production—Theoretical Aspects. (1979). *Journal of animal science*, 48:193–201.
- Carmona, J.C., D.M. Bolívar y L.A. Giraldo. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Rev. Col. Cienc. Pec.* 18(1): 49-63.
- Chagunda, M.G.G., Ross, D., Rooke, J., Yan, T., Douglas, J.L., Poret, L., McEwan, N.R., Teeranavattanakul, P., Roberts, D.J., (2013). Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agric. Scand. A Anim. Sci.* 63, 68–75.
- Chaves, A.V., Thompson, L.C., Iwaasa, A.D., Scott, S.L., Olson, M.E., Benchaar, C., Veira, D.M., McAllister, T.A., 2006. Effect of pasture type (alfalfa vs. grass) on methane and carbon dioxide production by yearling beef heifers. *Can. J. Anim. Sci.* 86, 409–418.
- Cruz, D. G., Domingues, D. y Nagatani A. L., (2016) Rumen Models. En Danilo Domingues Millen, Mario De Beni Arrigoni, Rodrigo Dias y Lauritano Pacheco (Editores), *Rumenology* (pp 265 – 279), Switzerland: Springer International Publishing.
- de Haas, Y., J. J. Windig, M. P. L. Calus, J. Dijkstra, M. de Haan, A. Bannink, y R. F. Veerkamp. 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *J. Dairy Sci.* 94:6122–6134.

- Danielsson R, Schnurer A, Arthurson V, Bertilsson J. (2012) Methanogenic population and CH<sub>4</sub> production in Swedish dairy cows fed different levels of forage. *Appl Environ Microbiol.*78:6172–9
- Danielsson R. Methane production in dairy cows, Impact of feed and rumen microbiota; *Acta universitatis agriculturae sueciae*, (2016), doctoral thesis no. 2016. p. 45. Disponible en [http://pub.epsilon.slu.se/13308/1/danielsson\\_r\\_160427.pdf](http://pub.epsilon.slu.se/13308/1/danielsson_r_160427.pdf).
- Demirel, Yaşar. (2012). Energy and Energy Types. En *Energy. Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling* (pp 33). Londres: Springer-Verlag London
- Ellis, J. L., E. Kebreab, N. E. Odongo, B. W. McBride, E. K. Okine, y J. France. (2007). Prediction of methane emission from dairy and beef cattle. *J. Dairy Sci.* 90:3456–3467.
- FAO. 2006 Las repercusiones del ganado en el medio ambiente. *Revista Enfoques*. Noviembre 2006.
- Fox, D. G., Tedeschi, L. O., Tylutki, T. P., Russell, J. B., Van Amburgh, M. E., Chase, L. E., Pell, A. N., y Overton, T. R. (2004). The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology*, 112(1), 29-78.
- France, J., y Thornley, J. H. (1984). *Mathematical models in agriculture*. Butterworths. 335p
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., y Poincelot, R. (2003). Agroecology: the ecology of food systems. *Journal of sustainable agriculture*, 22(3), 99-118.
- Guyader, J., Eugène, M., Noziere, P., Morgavi, D. P., Doreau, M., y Martin, C. (2014). Influence of rumen protozoa on methane emission in ruminants: a meta-analysis approach 1. *Animal*, 8(11), 1816-1825.
- Hammond, K. J., L. A. Crompton, A. Bannink, J. Dijkstra, D. R. Yáñez-Ruiz, P. O’Kiely, E. Kebreab, M. A. Eugène, Z. Yu, K. J. Shingfield, A. Schwarm, A. N. Hristov, y C. K. Reynolds. (2016). Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.* 219:13–30.
- Happe, K., Balmann, A., 2008. Doing policy in the lab! options for the future use of model-based policy analysis for complex decision-making. In: 107th European Association of Agricultural Economists Seminar, Modelling of Agricultural and Rural Development Policies, Sevilla, Spain, pp. 13
- Herrero M, Fawcett R, y Jessop N (2002) Predicting Intake and Nutrient Supply of Tropical and Temperate Diets for Ruminants Using a Simple Dynamic Model of Digestion. (Institute of Ecology and Resource Management, University of Edinburgh, UK).

- Herrero, M., P. Havlík, H. Valin, A. M. Notenbaert, M. Rufino, P. K. Thornton, M. Blümmel, F. Weiss, D. Grace y M. Obersteiner (2013). "Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110(52): 20888-20893.
- Illius AW y Gordon IJ (1991) Prediction of intake and digestion in ruminants by a model of rumen kinetics integrating animal size and plant characteristics. *The Journal of Agricultural Science* 116(01):145-157.
- Janssen, S., y van Ittersum, M. K. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies: a review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 94(3), 622-636.
- Janssen, P. H. (2010). Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Animal Feed Science and Technology*, 160(1), 1-22.
- Johnson, K., Huyler, M., Westberg, H., Lamb, B., y Zimmerman, P. (1994). Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. *Environmental science y technology*, 28(2), 359-362.
- Johnson, K. A., y Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*, 73(8), 2483-2492.
- Kellner, O.J., (1913). *The Scientific Feeding of Animals*. Duckworth, Londres.
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., y Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231-3261.
- Londoño, J. A., H. Mejía, B. Rivera y E. Vargas (2002). "Validación del modelo DRASTIC para simular producción de leche y formular raciones balanceadas en sistemas lecheros de la región andina". Disponible en: <http://www.condesan.org/memoria/COL0062002.pdf> (descargado en octubre de 2016).
- Lovett, D.K., Shalloo, L., Dillon, P., O'Mara, F.P., 2006. A systems approach to quantify greenhouse gas fluxes from pastoral dairy production as affected by management regime. *Agric. Syst.* 88, 156–179.
- Martin, C., Morgavi, D. P., y Doreau, M. (2010). Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *animal*, 4(3), 351-365.
- Mendes, L. B., Herrero, M., Havlík, P., Mosnier, A., Balieiro, S. F., Moreira, R. E. M., y Obersteiner, M. (2016). Simulation of enteric methane emissions from individual

beef cattle in tropical pastures of improving quality: a case study with the model RUMINANT. *Advances in Animal Biosciences*, 7(3), 233.

Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, Ministerio de Agricultura y desarrollo rural, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible, Fundación CIPAV. (2015) NINO GANADERÍA BOVINA SOSTENIBLE: Densificación productiva, reconversión de pasturas y devolución a la naturaleza. Recuperado de [http://www4.unfccc.int/sites/nama/\\_layouts/UN/FCCC/NAMA/Download.aspx?ListName=NAMAYId=150yFileName=NINO%20Ganader%C3%ADa%20Bovina%20Vfinal.pdf](http://www4.unfccc.int/sites/nama/_layouts/UN/FCCC/NAMA/Download.aspx?ListName=NAMAYId=150yFileName=NINO%20Ganader%C3%ADa%20Bovina%20Vfinal.pdf)

Moraes, L. E., Strathe, A. B., Fadel, J. G., Casper, D. P., y Kebreab, E. (2014). Prediction of enteric methane emissions from cattle. *Global change biology*, 20(7), 2140-2148.

Morgavi, D. P., Forano, E., Martin, C., y Newbold, C. J. (2010). Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *animal*, 4(7), 1024-1036.

Moss, A. R., Jouany, J. P., y Newbold, J. (2000). Methane production by ruminants: its contribution to global warming. In *Annales de zootechnie* (Vol. 49, No. 3, pp. 231-253). EDP Sciences.

Neill, A. R., Grime, D. W., y Dawson, R. M. C. (1978). Conversion of choline methyl groups through trimethylamine into methane in the rumen. *Biochemical Journal*, 170(3), 529-535.

Negussie, E., de Haas, Y., Dehareng, F., Dewhurst, R.J., Dijkstra, J., Glender, N., Morgavi, D.P., Soyeurt, H., van Gastelen, S., Yan, T. y Biscarini, F. (2017). Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions. *Journal of Dairy Science* 100, 2433-2453.

O'Brien, D., Shalloo, L., Buckley, F., Horan, B., Grainger, C., y Wallace, M. (2011). The effect of methodology on estimates of greenhouse gas emissions from grass-based dairy systems. *Agriculture, ecosystems y environment*, 141(1), 39-48.

Orskov, E. R., Flatt, W. P., y Moe, P. W. (1968). Fermentation balance approach to estimate extent of fermentation and efficiency of volatile fatty acid formation in ruminants. *Journal of Dairy Science*, 51(9), 1429-1435.

Pacini, C., Wossink, A., Giesen, G., y Huirne, R. (2004). Ecological-economic modelling to support multi-objective policy making: a farming systems approach implemented for Tuscany. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 102(3), 349-364.

Smallegange, I. y A. Brunsting (2002). "Food supply and demand, a simulation model of the functional response of grazing ruminants". *Ecological Modelling* 149: 179-192.

- Sniffen CJ, O'Connor JD, Van Soest PJ, Fox DG, y Russell JB (1992) A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of animal science* 70(11):3562-3577.
- Stoorvogel, J. J., Antle, J. M., Crissman, C. C., y Bowen, W. (2004). The tradeoff analysis model: integrated bio-physical and economic modeling of agricultural production systems. *Agricultural Systems*, 80(1), 43-66.
- Tamminga, S., Bannink, A., Dijkstra, J., y Zom, R. L. G. (2007). Feeding strategies to reduce methane loss in cattle (No. 34). Animal Sciences Group.
- Tapio, I., Snelling, T. J., Strozzi, F., y Wallace, R. J. (2017). The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 8:7. doi: 10.1186/s40104-017-0141-0
- Thornton, P. K., y Herrero, M. (2001). Integrated crop–livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural Systems*, 70(2), 581-602.
- Vanlierde, A., Vanrobays, M., Dehareng, F., Froidmont, E., Soyeurt, H., McParland, S., Lewis, E., Deighton, M., Grandl, F., Kreuzer, M., Grendler, B., Dardenne, P., y Gengler., P. (2015) Hot topic: Innovative lactation-stage-dependent prediction of methane emissions from milk mid-infrared spectra. *Journal of dairy science*, 98(8), 5740-5747.
- Van Soest, P.J., (1994). *Nutritional Ecology of the Ruminant*, second ed. Cornell University Press, Ithaca, NY, USA.
- Vayssières, J., Vigne, M., Alary, V., y Lecomte, P. (2011). Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural systems*, 104(2), 146-161.
- Velarde, L., Quiroz, C., Cañas, R. A., Osorio, R., Guerrero, J., y Pezo, J. (2006). LIFE-SIM: livestock feeding strategies; simulation models. International Potato Center, Lima (Perú).
- Vergé, X. P. C., De Kimpe, C., y Desjardins, R. L. (2007). Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142(2), 255-269.
- Watt, L. J., Clark, C. E. F., Krebs, G. L., Petzel, C. E., Nielsen, S., y Utsumi, S. A. (2015). Differential rumination, intake, and enteric methane production of dairy cows in a pasture-based automatic milking system. *Journal of dairy science*, 98(10), 7248-7263.
- Zhou, M., Chung, Y. H., Beauchemin, K. A., Holtshausen, L., Oba, M., McAllister, T. A., y Guan, L. L. (2011). Relationship between rumen methanogens and methane

production in dairy cows fed diets supplemented with a feed enzyme additive. *Journal of applied microbiology*, 111(5), 1148-1158.

Zimmerman, P. R., y Zimmerman, R. S. (2012). U.S. Patent No. 8,307,785. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Zimmerman, P. R. (1993). U.S. Patent No. 5,265,618. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

## **4. Determinación de la viabilidad económica de la adopción de dietas para la reducción de emisiones de los sistemas ganaderos en el piedemonte llanero.**

### **4.1 Introducción**

El desarrollo de tecnologías para incrementar la producción y la productividad en el sector agropecuario, con el fin de mejorar los ingresos de los productores rurales, es el objetivo fundamental de las ciencias agronómicas y zootécnicas, y en Colombia dicho objetivo está aún muy lejos de ser cumplido, ya que una porción importante de los productores rurales son pobres (45,5%), según indica el DANE, (2015).

El bajo desarrollo del campo colombiano en las últimas décadas, se ha dado como consecuencia de problemas estructurales del sector agropecuario y es reflejo de la exclusión e inequidad que se ha producido por la alta concentración de la tierra en manos de pocos (Junguito, Perfetti y Becerra, 2014). Adicionalmente, estos problemas se exacerban debido a otras condiciones, tales como la mala gestión de los escasos recursos públicos asignados para el campo (Gómez et al., 2011), la subutilización del potencial productivo de la tierra, la poca investigación en temas agropecuarios y la falta de adopción de tecnologías ya existentes (Cano, 2013).

En lo correspondiente a generación y transferencia de tecnologías generadas para el sector agropecuario, muchas de ellas no recogen las condiciones y perspectivas de los productores, y por esta razón se omiten muchas de las variables o aspectos importantes para que su adopción sea exitosa. Por esta razón, la identificación de barreras y oportunidades, de los productores y sus unidades productivas, es uno de los aspectos más

importantes para poder entender la forma en la que se debe hacer la transferencia de tecnologías ya que de lo contrario la adopción masiva de las mismas puede ser muy baja.

De igual forma, es importante considerar que las barreras para la implementación de tecnologías por cada tipo de productor son diferentes, por lo que es importante contar con estrategias diferenciales que permitan identificar cuáles tecnologías son aplicables para cada uno de ellos (Tsionas y Kumbhakar, 2004). Dicho de otra forma, no todas las tecnologías son para todos los productores ya que por sus condiciones socioeconómicas, ambientales, de infraestructura, acceso a mercados, entre muchas otras variables, puede dificultarse su adopción.

Por esta razón el uso de metodologías que permitan considerar este tipo de problemas es bastante importante, principalmente si la implementación de medidas se debe realizar en territorios en vía de desarrollo y con gran cantidad de productores diversos, como es el caso de Colombia, en donde históricamente se ha pretendido mejorar la productividad rural de forma desligada de la realidad de los productores (Byerlee et al. (2008), que en muchos casos para tener éxito en sus transformaciones productivas deberían contar con asistencia técnica, acceso al mercado crediticio, subsidios, etc (Cano et al., 2016). Sin embargo, no siempre es claro cuáles productores requieren cada uno de los aspectos antes mencionados, ya que así como para algunos el problema es la falta de asistencia técnica, para otros puede ser el acceso al crédito.

En ese sentido los modelos de programación lineal se convierten en una herramienta útil para identificar barreras y oportunidades que faciliten la transferencia de tecnología de forma localizada y enfocada en cada tipo de productor agrícola, ya que es un método matemático que permite analizar y elegir la mejor entre varias alternativas o la combinación parcial de ellas, bajo parámetros diferenciales de cada tipo de productor, como son el tamaño de la tierra, el capital de inversión, la disponibilidad de mano obra, entre otras.

Por esta razón, esta clase de modelos son aplicables para contestar algunas de las preguntas formuladas en este trabajo de investigación y permiten finalmente definir entre las diversas alternativas tecnológicas planteadas a lo largo del documento, cuáles de ellas son aplicables y en qué forma debe hacerse su implementación por cada tipo de productor, para poder optimizar sus ingresos.

## 4.2 Metodología

### 4.2.1 Modelo de programación lineal

De acuerdo con lo descrito en la introducción, la metodología principal utilizada para determinar la adopción de tecnologías por los productores del piedemonte fue a través de un modelo de programación lineal. Esta metodología ha sido utilizada desde la década de 1940 para resolver problemas en diversas ramas de la economía, siendo altamente influyentes en su uso masivo los trabajos y actividades de la Cowles Commission for research in economics, la Rand Corporation, el Departamento de Matemáticas de la Universidad de Princeton y el Carnegie Institute of Technology. (Alvarado, 2009).

Posteriormente, su uso en el ámbito agropecuario ha sido ampliamente difundido, generándose diversas publicaciones sobre su aplicabilidad a lo largo de los años, hasta la fecha. En 1974, Wilton et al, ya hacían una recopilación de trabajos relevantes de la aplicabilidad de modelos de optimización lineal para resolver problemas de sistemas de ganadería bovina. Para dar unos ejemplos, trabajo como los de Brokken (1971a, b), McDonough (1971) y Scott y Broadbent (1972), utilizaron programación lineal para determinar óptimos de alimentación para la fase de producción de sistemas de ganadería en confinamiento, Meyer y Newett (1970), y Kennedy (1972), utilizaron la misma metodología para determinar los pesos óptimos para la compra y venta de ganado de engorde.

En el 2002, Annetts y Audsley publicaron la utilización de programación lineal, considerando variables ambientales, necesarias para mejorar la sostenibilidad en sistemas de producción agrícolas, optimizando los beneficios productivos y los resultados ambientales; su objetivo se centró en la identificación de opciones de cultivos y maquinaria que fueran rentables y amigables con el medio ambiente. En 2016, Gameiro, Rocco y Caixeta Filho, trabajaron en Brasil, generando un modelo de optimización para un sistema de lechería, con el objetivo de medir los potenciales beneficios económicos que resultan de la integración de cultivos y animales en la misma finca maximizando las ganancias económicas y minimizando el impacto ambiental.

Según Hillier y Lieberman (2014), los modelos de programación lineal, generalmente, constan de ecuaciones lineales y / o desigualdades, así como de una función objetivo lineal

que debe ser optimizada (maximizada o minimizada), de acuerdo a un conjunto de restricciones que limitan la respuesta. Yang (1965) afirma que la programación lineal considera principalmente como supuestos que los factores de producción por unidad son fijos e invariables (relación factor – producto, son constantes), los recursos del productor (tierra, mano de obra, etc) son divisibles y acumulables para lograr el máximo ingreso neto y cada alternativa agropecuaria es independiente de la otra y la selección de una de ellas no implica necesariamente la selección de la otra.

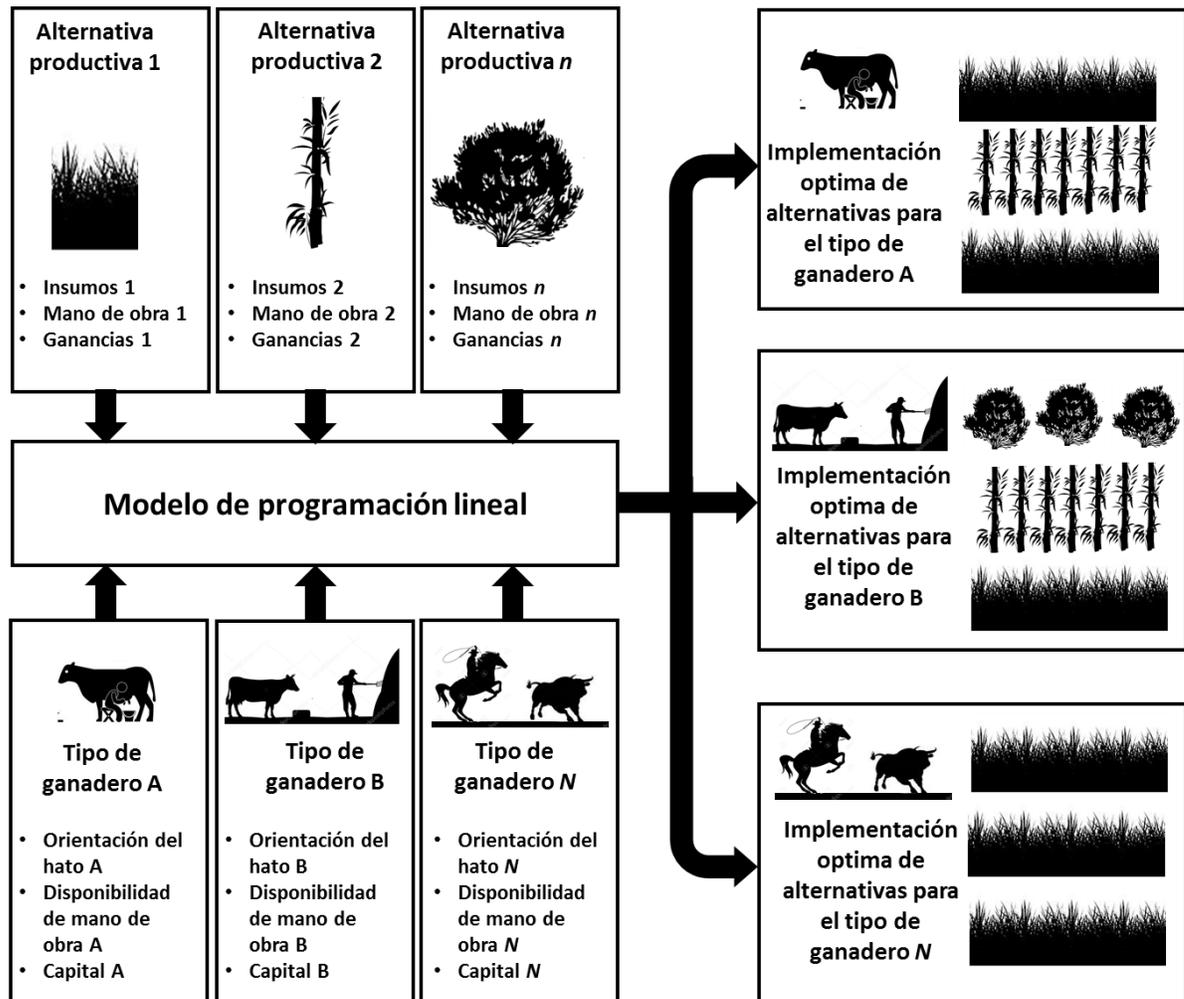
Con base en lo anterior, se puede decir que el uso de modelos de optimización lineal es una metodología común, vigente, efectiva y poderosa, para tomar decisiones en los sistemas productivos agropecuarios y que además es relevante para la optimización de la asignación de recursos a invertir y de la eficiencia en la planificación de la producción, productividad agrícola (Igwe, Onyenweaku y Nwaru, 2011), por esta razón puede ser utilizada para determinar cuáles alternativas dietarias pueden ser adoptadas por los productores ganaderos en el piedemonte llanero.

Por lo anterior, en este trabajo se construyó un modelo de programación lineal donde se maximizó la función objetivo que correspondió a la capitalización acumulada al final del periodo de modelación. Este modelo se parametrizó con los datos obtenidos para la región, con el fin de representar por separado sus tipos de sistemas productivos y las distintas condiciones de los productores que la componen, ya que los distintos tipos de productores deben evaluarse por separado, de acuerdo con O'Donnell et al. (2008), quien afirma que cada tipo de unidad productiva tiene sus propias barreras que deben ser representadas particularmente para determinar su eficiencia técnica.

Los principales parámetros del modelo se obtuvieron de los resultados de las encuestas descritas en el capítulo I, donde se determinaron los distintos tipos de productor de la región y a estos se hizo una descripción de sus gastos, mano de obra, tipos de insumos utilizados y número de animales. Del capítulo II se utilizaron los datos correspondientes a producción de leche y carne y las emisiones de metano asociadas a cada sistema productivo.

En la Figura 4-1 se puede observar gráficamente el planteamiento del modelo, en donde se describe la forma en la que las alternativas productivas y los distintos tipos de ganaderos se evalúan dentro del modelo, para obtener resultados óptimos de implementación de alternativas por cada tipo de productor.

Figura 4-1 Planteamiento del modelo de programación lineal



### 4.2.2 Parámetros del modelo

Para la modelación se utilizaron datos de costos de implementación de las alternativas dietarias propuestas para reconversión ganadera.

Los sistemas productivos a evaluar bajo la distinta alternativa fueron los determinados en el capítulo I, y corresponden a:

- Productores pequeños orientados a la cría (Cr\_P)
- Productores grandes orientados a la cría (Cr\_G)
- Productores pequeños orientados a ceba (Ce\_P)
- Productores grandes orientados a ceba (Ce\_G)

- Productores pequeños orientados al doble propósito (DP\_P)
- Productores grandes orientados al doble propósito (DP\_G)

Las alternativas productivas utilizadas en este trabajo fueron:

- La finca típica con un productor que no tiene acceso al crédito ni tampoco tiene la oportunidad de vender mano de obra (LB1)
- La finca típica con un productor que tiene acceso al crédito y tiene la oportunidad de vender una parte de su mano de obra, es decir que se puede ayudar económicamente a lo largo del año con ingresos adicionales a los proporcionados por el negocio ganadero (LB2)
- La oportunidad de transformar la finca a cualquier alternativa entre las 5 propuestas, sin acceso al crédito ni tampoco la oportunidad de vender mano de obra (E3)
- La oportunidad de transformar la finca a cualquier alternativa entre las 5 propuestas, exceptuando las cercas vivas, sin acceso al crédito ni tampoco la oportunidad de vender mano de obra (E4)
- La oportunidad de transformar la finca a cualquier alternativa entre las 5 propuestas, exceptuando las cercas vivas, con acceso al crédito y la oportunidad de vender mano de obra (E5)

En los escenarios E4 y E5 se excluyó la medida de las cercas vivas, ya que en todas las corridas del modelo en una etapa previa, siempre fue adoptado por los productores, por esta razón se decidió dar la oportunidad a las otras alternativas de ser adoptadas.

Para todos los casos la simulación se realizó durante un periodo de 10 años, tiempo suficiente para capitalizar, sacar un turno de madera de los sistemas silvopastoriles y transformar, en términos productivos, una finca.

Los parámetros del tamaño de la finca, disponibilidad de mano de obra, tamaño de los hatos y tamaño familiar, para cada tipo de sistema productivo, los datos se tomaron a partir de la tipificación descrita en el capítulo I.

En cuanto a los parámetros correspondientes a las ganancias de peso vivo y producción de leche bajo los distintos alimentos (pasturas y suplementos), los datos utilizados se

tomaron de la modelación con Ruminant realizada en el capítulo II, al igual que los datos utilizados con respecto a las emisiones de metano por litro de leche o de carne producido.

Con base en las ganancias de peso de los animales y la producción de leche, previamente determinada, se estimaron las posibles ganancias económicas anuales de cada sistema productivo, asumiendo un precio por kilogramo de carne en pie de \$3.600 y por litro de leche de \$750

De igual forma las emisiones asociadas a los distintos alimentos también se tomaron del capítulo II, y con estos datos se estimó la reducción potencial de cada sistema adoptado.

Al modelo se introdujo adicionalmente para cada tipo de productor, un gasto anual de manutención familiar, impuestos sobre la tierra y gastos intrínsecos del sistema productivo (vacunas, insumos, etc), con lo que se buscó garantizar que la capitalización estimada por el modelo año a año correspondiera a un capital neto.

## 4.3 Resultados y discusión

### 4.3.1 El modelo

Para optimizar el sistema productivo y conocer la mejor alternativa que maximice las utilidades del productor, se construyó un modelo de programación lineal multiperiodo empleando la herramienta Solver del programa Microsoft Excel. El modelo busca identificar para cada productor tipo, la mejor alternativa de implementación tecnológica bajo sus propias restricciones como el tamaño de la finca, la mano de obra familiar disponible, los gastos familiares y la posibilidad de acceder a créditos de capital. Cada alternativa de implementación tiene parámetros asociados como ingresos y costos por hectárea, la mano de obra requerida y en algunos casos condiciones para el uso de la tierra en el tiempo.

A continuación se describe el modelo y sus parámetros:

#### Conjuntos

*I*: Opciones. Donde  $i = 1$ : Banco mixto,  $i = 2$ : Cerca viva,  $i = 3$ : P Mulato.

*K*: Alternativas de suplementación. Donde  $k = 1$ : Concentrado comercial,  $k = 2$ : Silo maíz.

$T$ : Periodos (años). Donde  $T = \{1, \dots, 10\}$ .

$T'$  Es el subconjunto de periodos donde se excluye el último periodo del conjunto  $T$ .

$J$ : Rangos de periodos donde se implementa una opción  $i \in I$ , varían cada año. Donde  $J = \{1, \dots, 10\}$ .

## Parámetros

$F$ : Tamaño de la finca (ha).

$Mf$ : Mano de obra familiar.

$S$ : Costo de un jornal.

$G$ : Gastos familiares

$C^1$ : Costos por hectárea de la pradera tradicional por periodo.

$C_{ijt}^2$ : Costos por hectárea de la pradera mejorada con la opción  $i \in I$  en el periodo  $t \in T$  en el rango de implementación  $j \in J$ .

$C_k^3$ : Costos por hectárea de la alternativa con suplementación tipo  $k \in K$  en un periodo.

$R^1$ : Ingreso por hectárea en pastura tradicional en un periodo  $t \in T$ .

$R_{ijt}^2$ : Ingreso por hectárea en pastura mejorada con la opción  $i \in I$  en el rango de implementación  $j \in J$  en el periodo  $t \in T$ .

$R_k^3$ : Ingreso por hectárea con la alternativa de suplementación tipo  $k \in K$  en un periodo.

$A$ : Jornales requeridos por hectárea en pastura tradicional en un periodo  $t \in T$ .

$H_{ijt}$ : Jornales requeridos por hectárea con la opción  $i \in I$  en el periodo  $t \in T$  en el rango de implementación  $j \in J$ .

$D_k$ : Jornales requeridos por hectárea en un periodo para la alternativa con suplementación de tipo  $k \in K$ .

$\lambda_{jt}$ : Parámetro binario, define si el periodo  $t \in T$  hace parte del rango de periodos  $j \in J$  de implementación.

$Q$ : Capital inicial.

$N$ : Tasa de interés del crédito de trabajo.

## Variables

$x_t$ : Hectáreas de la pradera tradicional en el periodo  $t \in T$ .

$y_{ij}$ : Hectáreas donde se implementa la opción  $i \in I$  en el rango de implementación  $j \in J$ .

$u_{kt}$ : Hectáreas donde se implementa la alternativa con la suplementación de tipo  $k \in K$ .

$Mc_t$ : Mano de obra contratada en  $t \in T$ .

$Mv_t$ : Mano de obra vendida en  $t \in T$ .

$cap_t$ : Capital remanente en  $t \in T$ .

$e_t$ : Crédito de capital de trabajo para el periodo  $t \in T$

## Función objetivo:

La función objetivo  $Z$  maximiza las utilidades del productor definidas como los ingresos del último periodo y el capital remanente en el mismo periodo, este capital es el resultado de la suma de las utilidades en todos los periodos previos.

$Max Z$

Donde:

$$Z = Cap_t + R^1 x_t + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} R_{ijt}^2 y_{ij} + \sum_{k \in K} R_k^3 u_{kt} \quad t = 10 \quad (1)$$

## Sujeto a:

- Restricciones del uso de la tierra:

Este tipo de restricciones garantizan que la tierra utilizada no sea mayor a la tierra disponible. El parámetro  $\lambda_{jt}$  determina si las hectáreas  $y_{ij}$  empleadas en la implementación de la opción  $i \in I$  en el rango de periodos  $j \in J$  involucran al periodo  $t \in T$ .

$$x_t + \sum_{k \in K} u_{kt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \lambda_{jt} y_{ij} \leq F \quad \forall t \in T, \quad (2)$$

- Mano de obra contratada:

Las restricciones de tipo (3) establecen la mano de obra requerida para cada periodo, esta no debe ser mayor a la mano de obra contratada y la mano de obra familiar, también existe

la posibilidad de vender mano de obra familiar, con lo cual se reduce la mano de obra disponible para el sistema productivo.

$$Ax_t + \sum_{k \in K} D_k u_{kt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} H_{ijt} y_{ij} \leq Mf + Mc_t - Mv_t \quad \forall t \in T, \quad (3)$$

- Capital

El capital disponible para invertir en un periodo son los ingresos y el capital remanente del periodo anterior además de un posible crédito, con este capital se deben cubrir los costos del periodo presente. Estas restricciones establecen que el capital remanente en el periodo  $t + 1$  es el resultado de los ingresos del periodo  $t$  menos los costos del periodo  $t + 1$ . La compra y venta de jornales afectan el capital disponible del presente periodo y no el próximo como si ocurre con los ingresos. Las restricciones también garantizan el gasto familiar y el pago del posible crédito de capital del periodo anterior.

$$\begin{aligned} Cap_{t+1} = & Cap_t + R^1 x_t - C^1 x_{t+1} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} R_{ijt}^2 y_{ij} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ijt+1}^2 y_{ij} + \sum_{k \in K} R_k^3 u_{kt} \\ & - \sum_{k \in K} C_k^3 u_{k,t+1} + S(Mv_{t+1} - Mc_{t+1}) - (1 + N)e_t + e_{t+1} - G \quad \forall t \\ & \in T', \quad (4) \end{aligned}$$

En el primer periodo el capital inicial  $Q$  y la posibilidad de vender jornales familiares son las únicas fuentes de capital para cubrir los costos del sistema, los ingresos en este periodo servirán para cubrir costos del sistema en el próximo periodo.

$$\begin{aligned} Cap_t = & Q - C^1 x_t - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ijt}^2 y_{ij} - \sum_{k \in K} C_k^3 u_{kt} + S(Mv_t - Mc_t) + e_t - G \quad t \\ = & 1 \quad (5) \end{aligned}$$

En (6) se garantiza que no se pueda optar por crédito en el último periodo, puesto que no podría pagarse, las restricciones (7) y (8) garantizan que las variables de mano de obra sean valores enteros positivos y que las variables que representan número de hectáreas, capital y crédito sean mayores que cero.

$$e_t \leq 0 \quad t = 10, \quad (6)$$

$$Mc_t, Mv_t \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall t \in T, \quad (7)$$

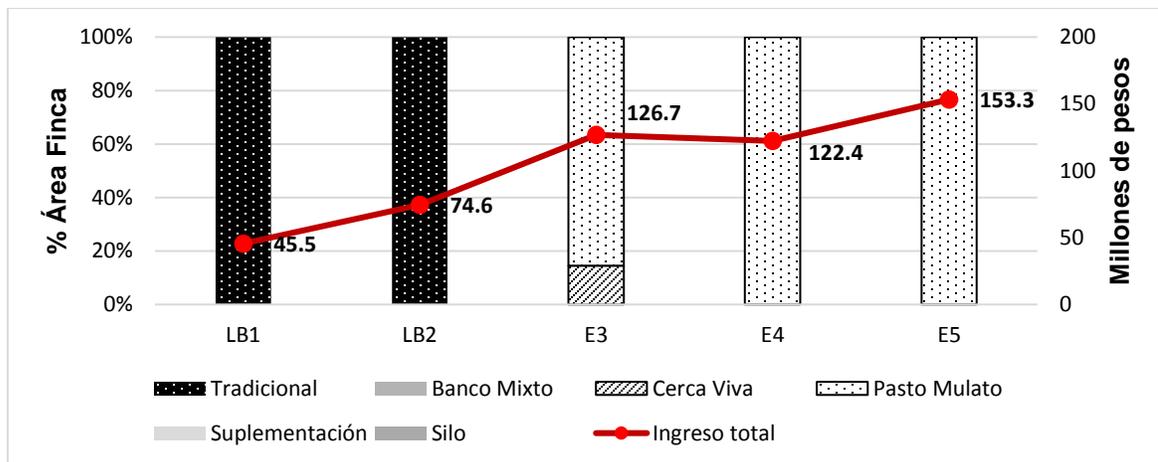
$$x_t, y_{jt}, u_{kt}, Cap_t, e_t \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad (8)$$

### 4.3.2 Adopción de dietas mejoradas en productores pequeños orientados a cría (Cr\_P)

Con base en las características encontradas de los productores de cría de tamaño pequeño se realizó la parametrización y modelación bajo distintos escenarios, considerando que este productor tipo cuenta con una finca de 12 hectáreas, 493 jornales familiares disponibles al año de los cuales puede vender hasta 73 y una carga estimada de 2,36 UGG/ha.

Cómo se puede observar en la Figura 4-2, bajo la oferta de distintas alternativas de reconversión productiva, la alternativa óptima para maximizar el capital cambia, ya que bajo LB1, que es la condición inicial del productor sin acceso a crédito ni venta de mano de obra, la capitalización al año 10 es de 45,5 millones de pesos, mientras que haciendo la transformación completa de la finca y vendiendo mano de obra (E5), la capitalización asciende a los 153,3 millones de pesos, lo que es 236% más dinero.

**Figura 4-2:** Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Cr\_P bajo los escenarios modelados

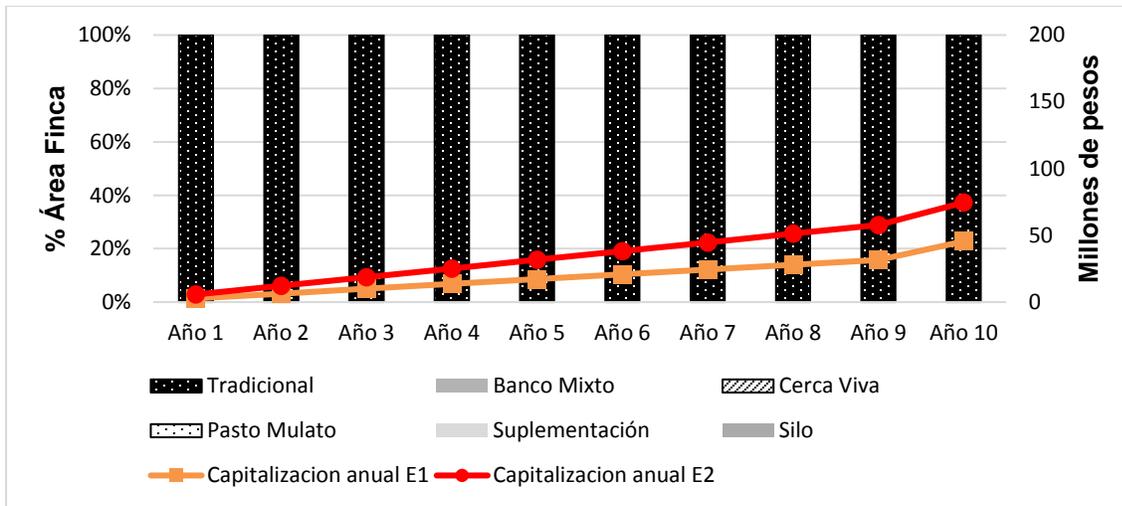


Al realizar un análisis, de los resultados bajo cada uno de los escenarios, se puede observar el proceso de adopción de las medidas y explicar paulatinamente la adopción a la luz de las restricciones y dotaciones con las que cuenta el productor.

En la Figura 4-3, se observa una comparación entre LB1 y LB2, escenarios donde se obliga al modelo a mantener durante el periodo de modelación (10 años), la composición de la finca tal cual es en la actualidad, es decir con los pastos degradados sin ninguna

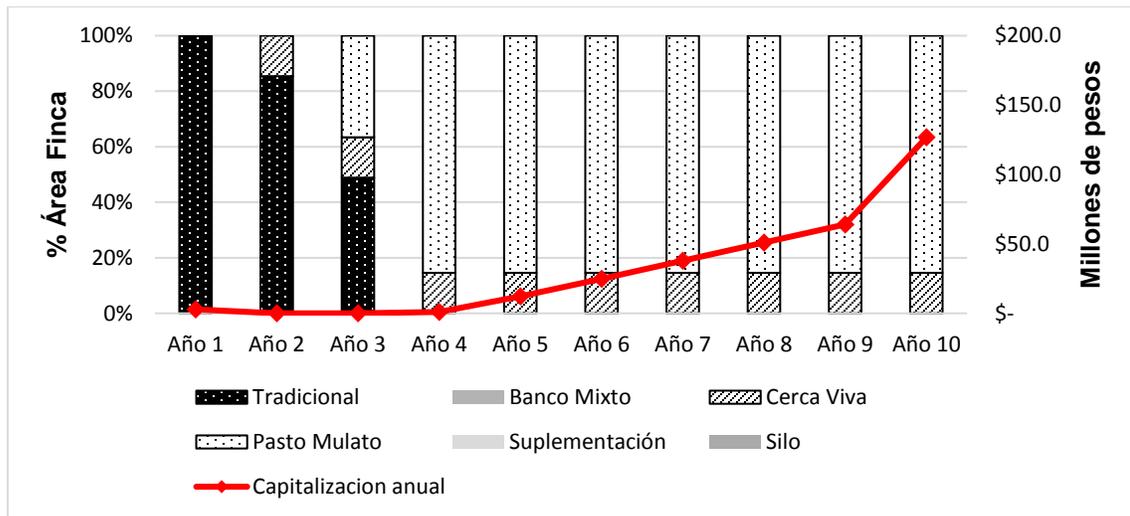
transformación productiva. Se puede identificar que existe una diferencia entre los dos escenarios obteniendo en LB2 una capitalización mayor a la obtenida en LB1 lo que indica que el acceso a la venta de mano de obra es uno de los factores que puede marcar una diferencia económica importante en las ganancias de los productores. Vale la pena recordar que al ser un modelo multiperiodo a medida que las ganancias se van obteniendo en el tiempo se aumenta la capacidad de transformación del sistema productivo por esta razón la venta de mano de obra representa año a año un capital adicional que se convierte en una condición habilitante para el inicio de una transformación productiva o para acelerar el proceso de transformación.

**Figura 4-3:** Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Cr\_P



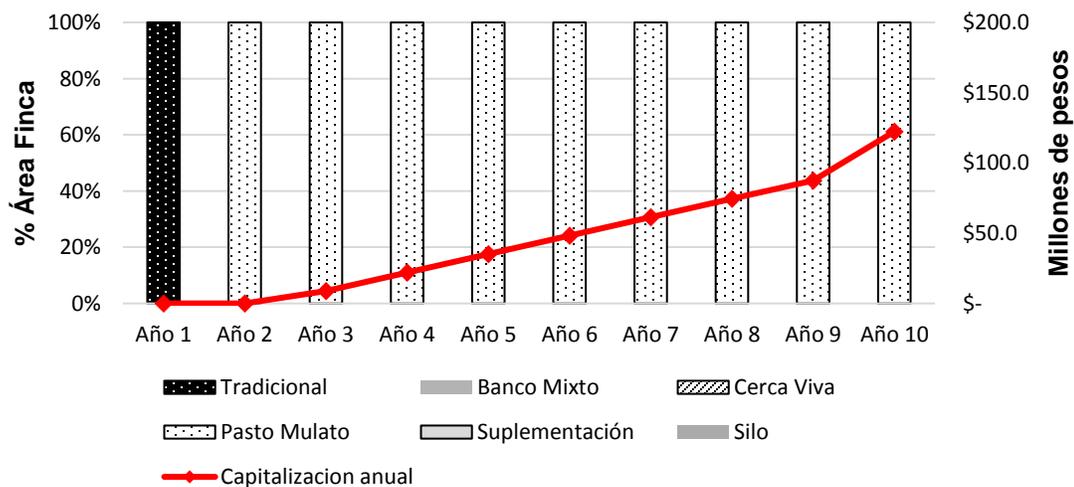
Bajo el escenario E3 (Figura 4-4), donde se permite al modelo seleccionar entre las cinco alternativas posibles, se observa que partir del año 2 el productor inicia una transformación de su finca implementando 1,75 hectáreas de pastos mejorados con cercas vivas, en el año 3, implementa 4,39 hectáreas de pasturas mejoradas y desde el año 4 en adelante la finca se transforma completamente quedando sus 12 hectáreas repartidas entre 10,25 ha de pasturas mejoradas y 1,75 ha con pastos mejorados y cercas vivas. Bajo estas condiciones de transformación el productor puede aspirar a unos ingresos al final del año 10 cercanos a los 127 millones de pesos.

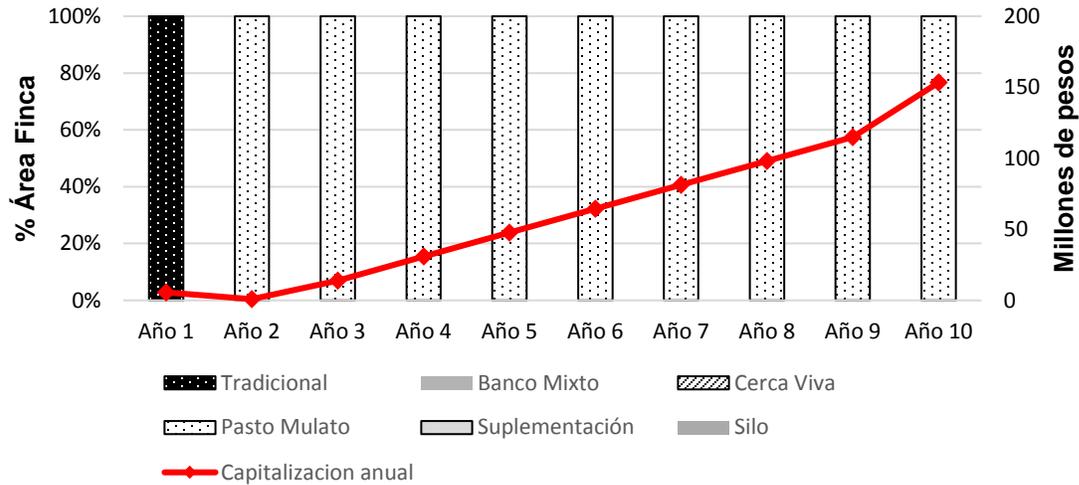
**Figura 4-4:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo Cr\_P



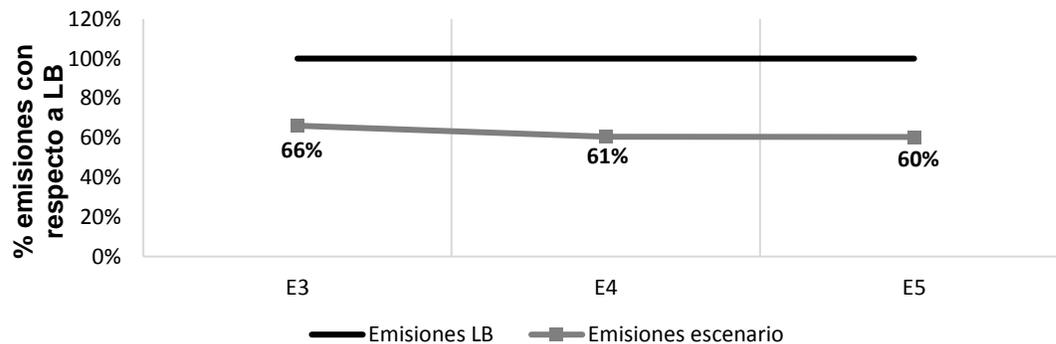
Bajo el escenario E4, se observa que el productor realiza inmediatamente en el año 2, una transformación de toda su matriz productiva hacia los pastos mejorados obteniendo en el año 10 unos ingresos totales de 122 millones (Figura 4-5). El escenario E5 presenta un comportamiento similar a E4 en cuanto a la transformación productiva, sin embargo al final del año 10 se observa una capitalización total de 153 millones de pesos, lo que indica que la venta de mano de obra de ese tipo de productor representa un porcentaje importante de sus ingresos (Figura 4-5).

**Figura 4-5:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo Cr\_P



**Figura 4-6:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Cr\_P

En cuanto a la reducción de emisiones acumuladas en las emisiones de metano entérico para la finca típica Cr\_P, en la Figura 4-7 se observa que el escenario 5 (E5), es donde se reducen más emisiones, hasta ser solamente el 60% de lo que emitía la finca bajo el sistema de pastoreo tradicional. Esto no quiere decir que bajo E3 y E4 no haya disminución en las emisiones, ya que bajo todos los escenarios hay reducciones por unidad de producto. Al ser E5 el escenario donde se presenta mayor capitalización en el año 10 y de igual forma donde más se reducen las emisiones, es el escenario más sostenible ya que es donde más dinero se produce con menos emisiones de metano.

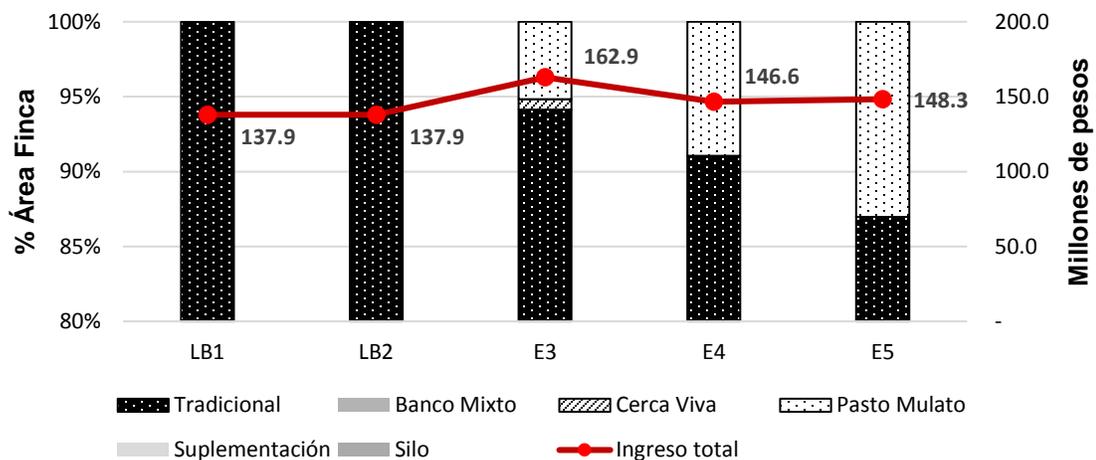
**Figura 4-7:** Porcentaje de reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> por escenario de conversión

### 4.3.3 Adopción de dietas mejoradas en productores grandes orientados a cría (Cr\_G)

Con base en las características encontradas de los productores de cría de tamaño grande, se realizó la parametrización y modelación bajo distintos escenarios, considerando que este productor tipo cuenta con una finca de 317 hectáreas, 115 jornales familiares disponibles al año y una carga estimada de 0,64 UGG/ha.

Cómo se puede observar en Figura 4-8, bajo la oferta de distintas opciones de reconversión productiva, la alternativa óptima para maximizar el capital cambia, ya que bajo LB1, la capitalización al año 10 es de 137,9 millones de pesos, mientras que haciendo la transformación completa de la finca utilizando la alternativa de cercas vivas (E3), la capitalización asciende a los 162,9 millones de pesos, lo que significa un ganancia adicional del 18%.

**Figura 4-8:** Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Cr\_G bajo los escenarios modelados

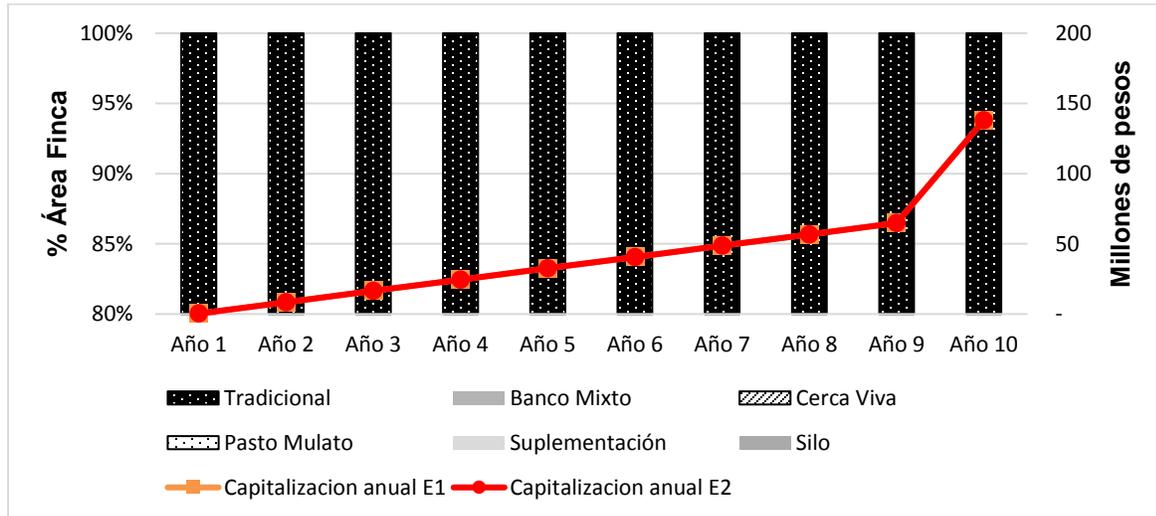


Bajo cada uno de los escenarios, el modelo representó un proceso de adopción diferente de la aplicación óptima de cada una de las medidas y de esta forma se puede explicar la forma en la que se puede dar la adopción de las tecnologías con base en las restricciones y dotaciones con las que cuenta el productor.

En la Figura 4-9, se observa una comparación entre LB1 y LB2, donde se encontró que no existe una diferencia entre estos escenarios, lo que indica que para el productor no es

relevante el acceso al crédito para mejorar sus ingresos bajo las condiciones actuales, y que en cuanto a la mano de obra en ninguno de los dos escenarios cuenta con jornales extra para vender.

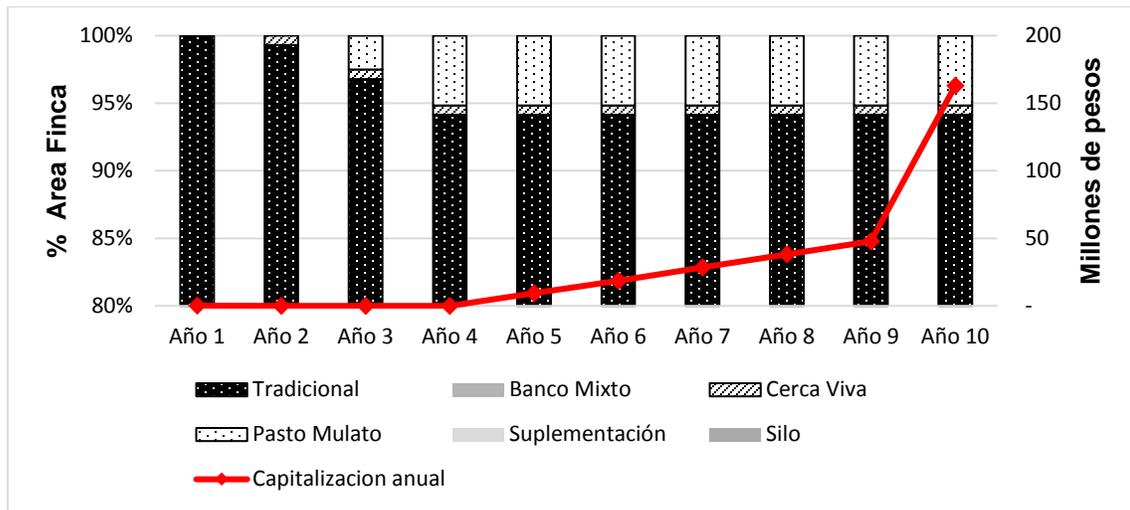
**Figura 4-9:** Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Cr\_G



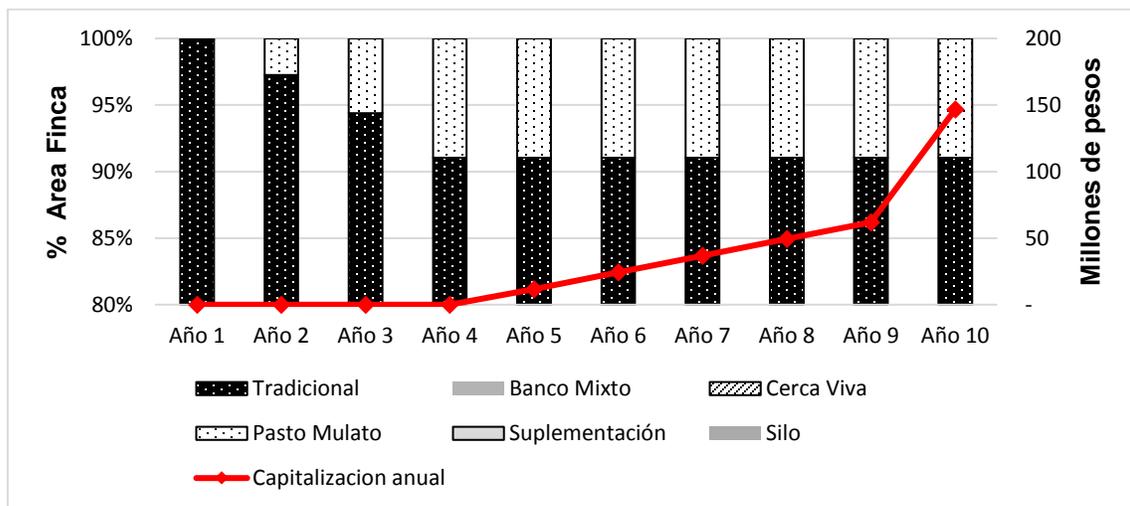
Bajo el escenario E3 (Figura 4-10), donde se permite al modelo seleccionar entre las cinco alternativas posibles, se observa que a partir del año 2 el productor inicia una transformación de su finca implementando 2,2 hectáreas de pastos mejorados con cercas vivas, en el año 3, implementa 7,96 hectáreas de pasturas mejoradas y en el año 4 aumenta dicha área hasta 16,35 hectáreas, quedando sus 317 hectáreas repartidas entre 7,96 ha de pasturas mejoradas, 2,5 ha con pastos mejorados y cercas vivas, y el resto del área se conserva con los pastos degradados con lo que ya contaba el productor. Bajo estas condiciones de transformación el productor puede aspirar a unos ingresos al final del año 10 cercanos a los 163 millones de pesos.

Bajo el escenario E4, se observa que el productor realiza en los años 2, 3 y 4 una transformación de 8,73 ha, 9,1 ha y 10,54 ha respectivamente, las cuales siembra en pastos mejorados manteniendo hasta el final del periodo 10 un total de 28,37 ha en pasto mulato y conservando 288,63 ha con sus pastos originales. Bajo esta distribución del área de la finca, el productor tipo Cr\_G, obtiene en el año 10 unos ingresos totales de 147 millones (Figura 4-11).

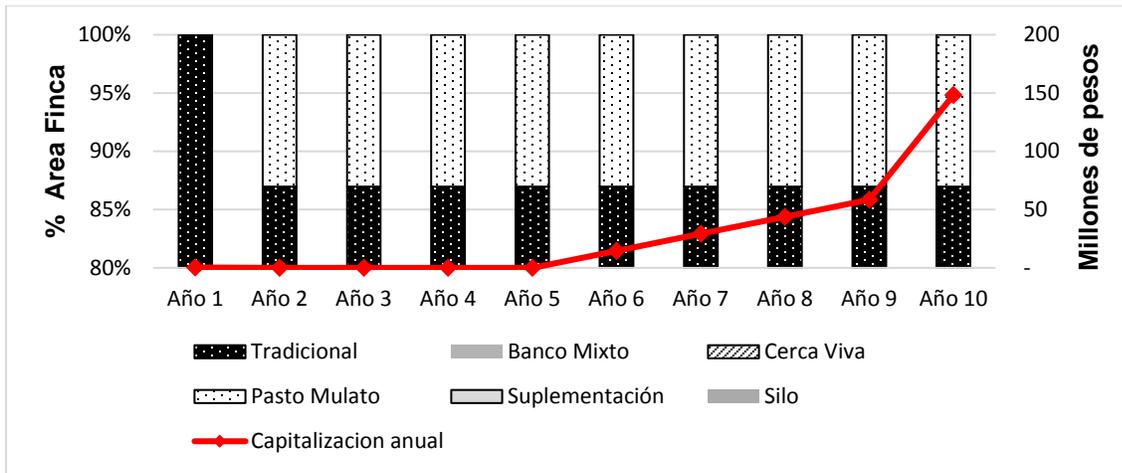
**Figura 4-10:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo Cr\_G



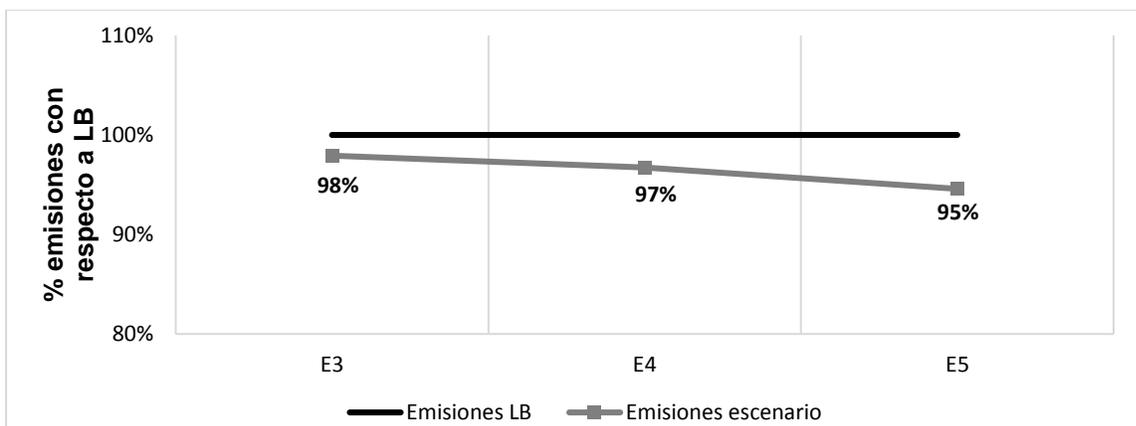
**Figura 4-11:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo Cr\_G



Bajo el escenario E5 se observa que el productor realiza inmediatamente en el año 2, una transformación de 41,3 ha hacia los pastos mejorados, manteniendo esta área hasta el final del periodo de modelación y conservando con los pastos originales de la finca 275,7 ha, obteniendo en el año 10 unos ingresos totales de 148 millones (Figura 4-12). La transformación más rápida hacia pasturas mejoradas en E5 con respecto a E4, se debe a que en E5 el productor toma un crédito de inversión entre los años 2, 3 y 4, lo que lo habilita económicamente para invertir en su finca.

**Figura 4-12:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Cr\_G

En cuanto a la reducción de emisiones acumuladas en las emisiones de metano entérico para la finca típica Cr\_G, en la Figura 4-13 se observa que el escenario 5 (E5), es donde se reducen más emisiones, hasta el 95% de lo que emitía la finca bajo el sistema de pastoreo tradicional. Bajo E3 y E4 la disminución es un poco más reducida (98% y 97% de lo que emitía, respectivamente). Vale la pena mencionar que debido al tamaño de estas fincas, realizar una reconversión productiva es complicada, por esta razón y dado que el modelo busca la maximización de los ingresos al año 10, hace la reconversión productiva en el punto en el cual le va a implicar el resultado antes descrito. Es decir que si el modelo se corriera con un horizonte de tiempo más lejano probablemente haría una reconversión total de la finca. Sin embargo un periodo de modelación de 10 años puede ser más realista dado que en muchos casos un productor no va a invertir todo su capital, apuntando a tener un retorno a muy largo plazo, menos aun cuando como se observa el retorno es bajo.

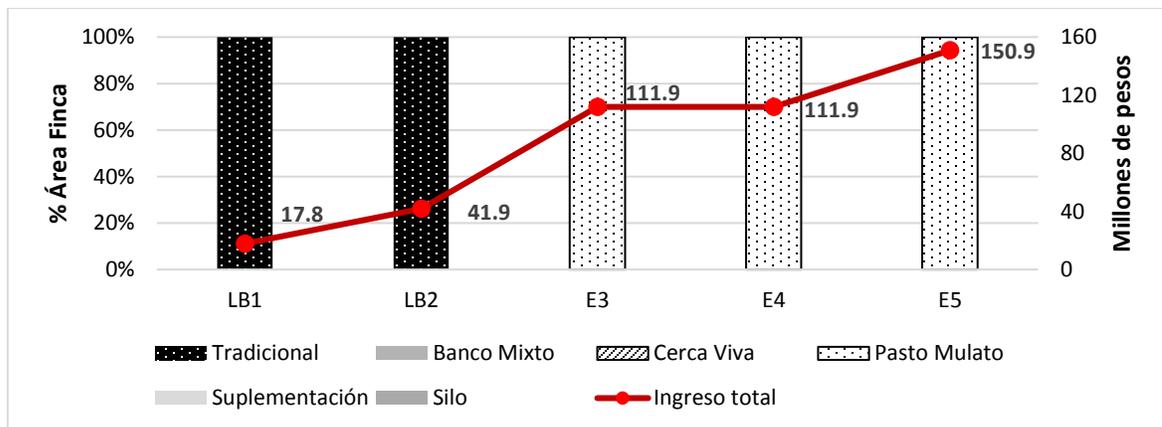
**Figura 4-13:** Porcentaje de reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> por escenario de conversión

### 4.3.4 Adopción de dietas mejoradas en productores pequeños orientados a ceba (Ce\_P)

Con base en las características encontradas de los productores de ceba de tamaño pequeño se realizó la parametrización y modelación bajo distintos escenarios, considerando que este productor tipo cuenta con una finca de 12 hectáreas, 408 jornales familiares disponibles al año de los cuales puede vender solamente 60 y una carga estimada de 2,15 UGG/ha.

Haciendo la simulación de la línea base sin acceso a crédito ni venta de mano de obra (LB1), la capitalización al año 10 es de 17,8 millones de pesos, lo que quiere decir que ese negocio prácticamente solo le da para sobrevivir al productor, mientras que haciendo la transformación completa de la finca y vendiendo mano de obra la capitalización asciende a los 151 millones de pesos (Figura 4-14), lo que representa 747 % más dinero de lo obtenido en la línea base.

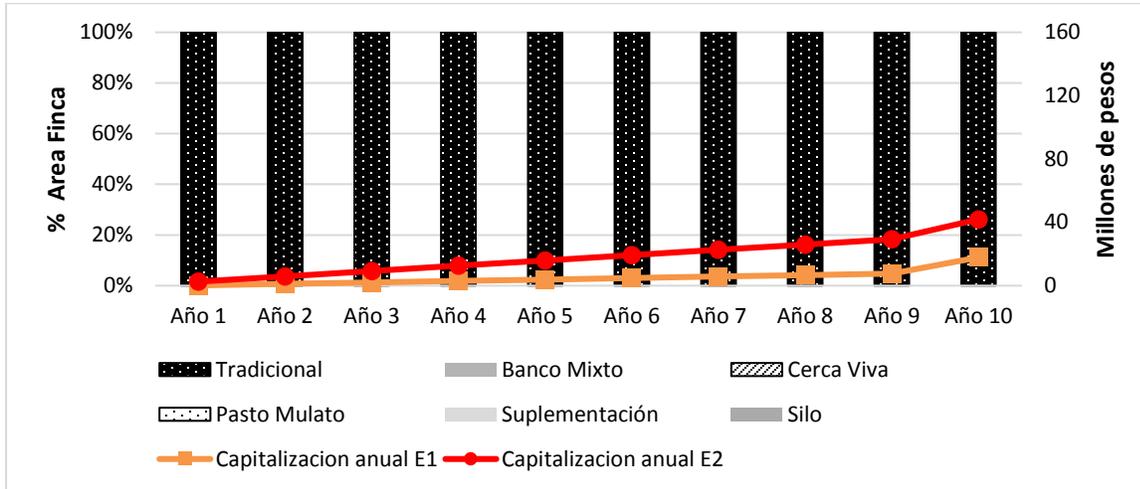
**Figura 4-14:** Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Ce\_P bajo los escenarios modelados



Al realizar un análisis de los resultados bajo cada uno de los escenarios se puede describir el proceso mediante el cual se realizó la transformación productiva y se puede determinar algunos de los parámetros que influyeron en la toma de decisión del cambio. En la Figura 4-15 se observa una comparación entre el LB1 y el LB2, que son los escenarios donde se obliga al modelo a mantener durante los 10 años la composición original de pasturas de la finca, donde se puede indicar que existe una diferencia entre ambos no muy alta pero si lo

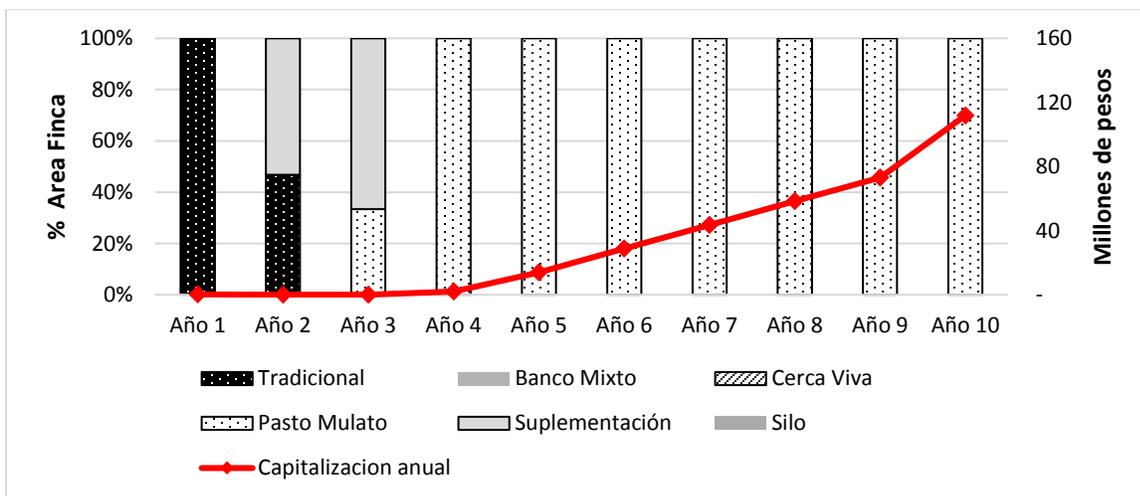
suficientemente importante para ser una limitante para implementar algún tipo de medida, por falta de flujo de caja.

**Figura 4-15:** Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Ce\_P



Bajo los escenarios (E3 y E4), la respuesta del modelo es igual y como se observa en la Figura 4-16, a partir del segundo año de modelación, el productor comienza a implementar en su finca una suplementación con concentrados comerciales, suministrándole al 55% de su hato en el año 2 y aumentándola a un 75% en el año 3. En este mismo año el productor hace la reconversión de 4 hectáreas a pastos mejorados y en el año 4 hace una transformación completa de su finca a pastos mejorados con híbridos de mulato, la cual mantiene hasta el final del periodo modelado.

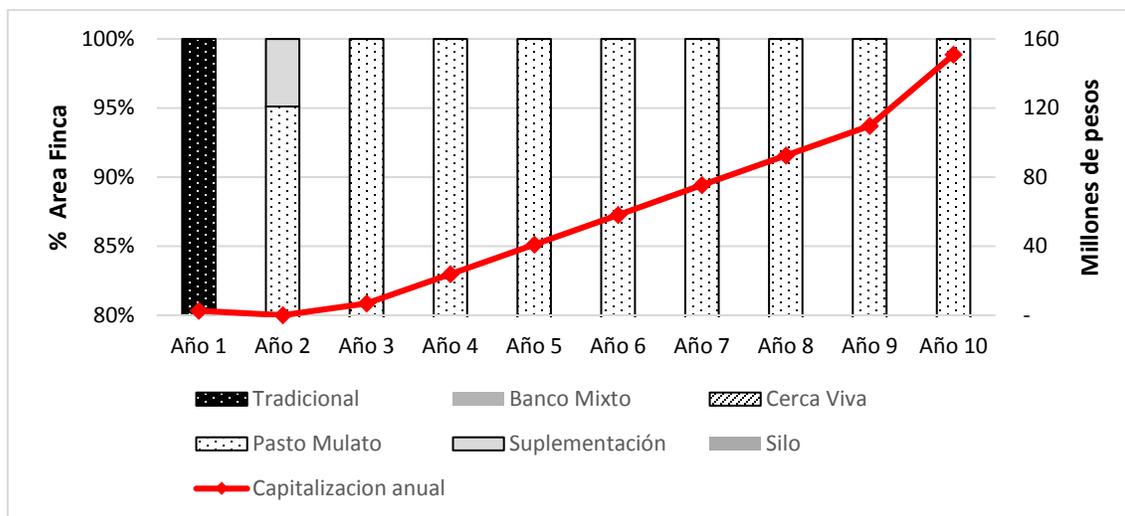
**Figura 4-16:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 y E4 para la finca tipo Ce\_P



Bajo E5 (Figura 4-17), se presenta un comportamiento similar en la tendencia (más no en tasa) de adopción anual de tecnologías ya que suplementa una cuarta parte del hato durante el segundo año mientras realiza una transformación del 75% de su finca a pasturas mejoradas. En el año 3 y hasta el final del período de modelación mantiene una transformación completa de la finca a pasturas mejoradas con híbridos de *Brachiaria*. La condición que habilita al productor en E5 para hacer una transformación más rápida que en E3 y E4, es que en E5 el productor puede tomar un préstamo en el año 2 y además vende su mano de obra todos los años.

En todos los escenarios de transformación productiva de la finca para el productor Ce\_G, es importante observar que en una primera fase la suplementación es la mejor alternativa para este productor, como una medida provisional que le permite capitalizar dinero para invertirlo posteriormente en la renovación de sus praderas, sin embargo la suplementación no es una opción que va a mantener permanentemente dado que a largo plazo por los altos costos del concentrado, esta práctica no es sostenible.

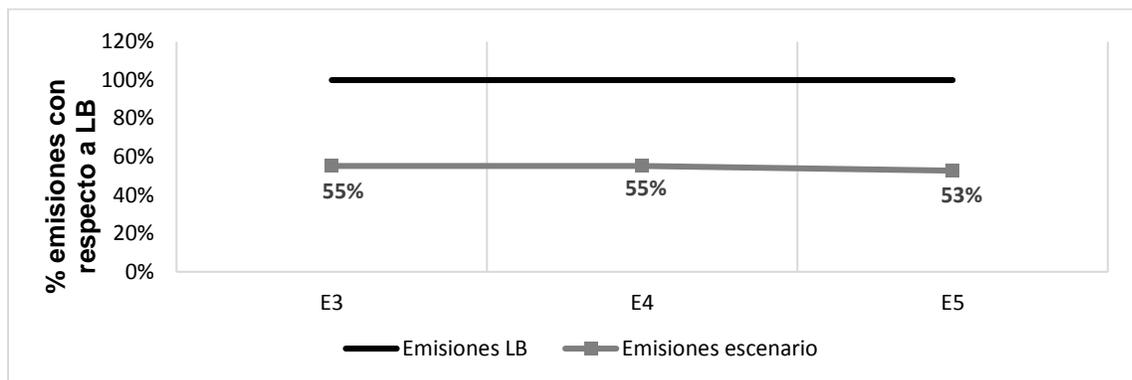
**Figura 4-17:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo Ce\_P



Finalmente con respecto a las emisiones acumuladas de metano para la finca del productor típico Ce\_P, en la Figura 4-18, se observa que en E5 es donde se reducen más las emisiones, hasta en un 63% con respecto a la finca con pastos tradicionales. De igual forma las reducciones que presentan E3 y E4 son importantes que están alrededor del 55% con respecto al sistema original. Es importante decir que bajo esta reconversión del sistema productivo, el kilogramo de carne que se produzca tendrá una carbono intensidad

baja, en cualquiera de los escenarios, equivalente a la mitad de lo que se tiene en la actualidad. Esto quiere decir que cualquiera de estas alternativas es sostenible ambiental y económicamente para ser implementada.

**Figura 4-18:** Porcentaje de reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> por escenario de conversión



#### 4.3.5 Adopción de dietas mejoradas en productores grandes orientados a ceba (Ce\_G)

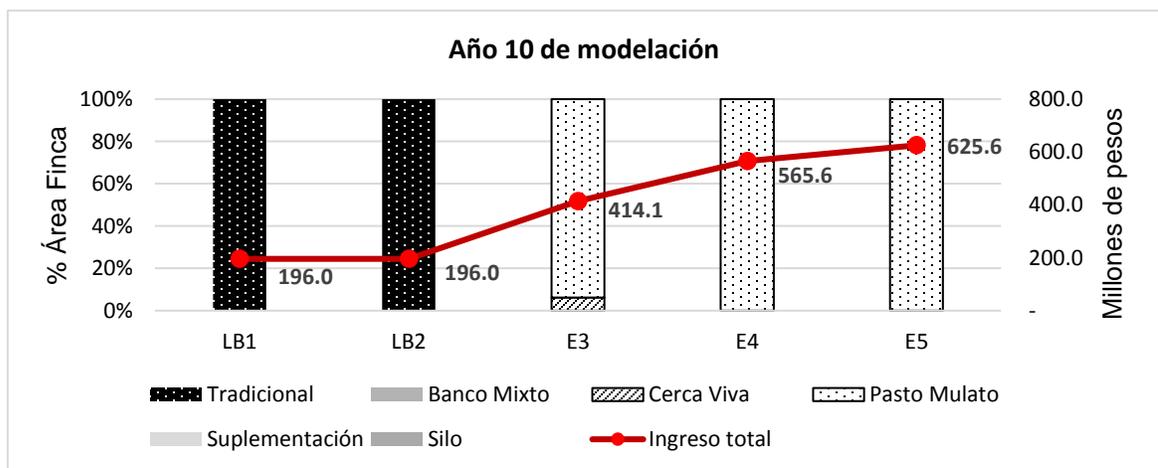
Con base en las características encontradas de los productores de ceba de tamaño grande se realizó la parametrización y modelación bajo distintos escenarios, considerando que este productor tipo cuenta con una finca de 72 hectáreas, 261 jornales familiares disponibles al año de los cuales puede vender hasta 38,5 y una carga estimada de 2,04 UGG/ha.

Cómo se puede observar en la Figura 4-19, bajo la oferta de distintas opciones de reconversión productiva, la alternativa óptima para maximizar el capital cambia, ya que bajo LB1, que es la condición inicial del productor sin acceso a crédito ni venta de mano de obra, la capitalización al año 10 es de 196 millones de pesos, mientras que haciendo la transformación completa de la finca y vendiendo mano de obra (E5), la capitalización asciende a los 625,6 millones de pesos, lo que implica un aumento en los ingresos del 219%.

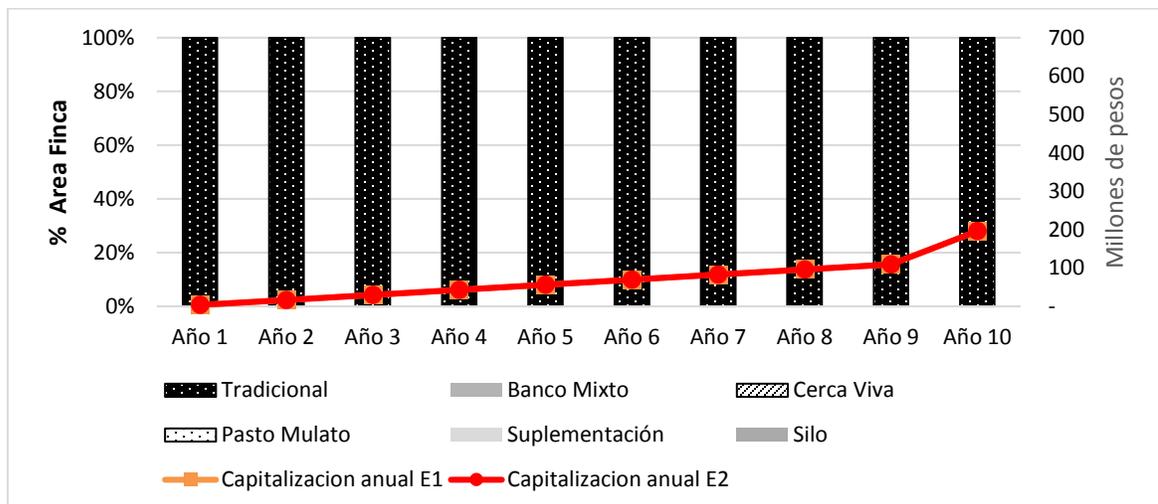
Al realizar un análisis, de los resultados bajo cada uno de los escenarios, se puede observar el proceso de adopción de las medidas y explicar paulatinamente la adopción a la luz de las restricciones y dotaciones con las que cuenta el productor.

Tal y como se muestra en la Figura 4-20 donde se hace una comparación entre LB1 y LB2, se puede concluir que no son diferentes, lo que indica que para el productor no es relevante el acceso al crédito para mejorar sus ingresos bajo las condiciones actuales, al igual que la venta mano de obra, ya que en ambos casos la mano de obra la utiliza en su totalidad para aportar a la demanda interna de la finca.

**Figura 4-19:** Comparación de la capitalización al año 10 de la finca Ce\_G bajo los escenarios modelados

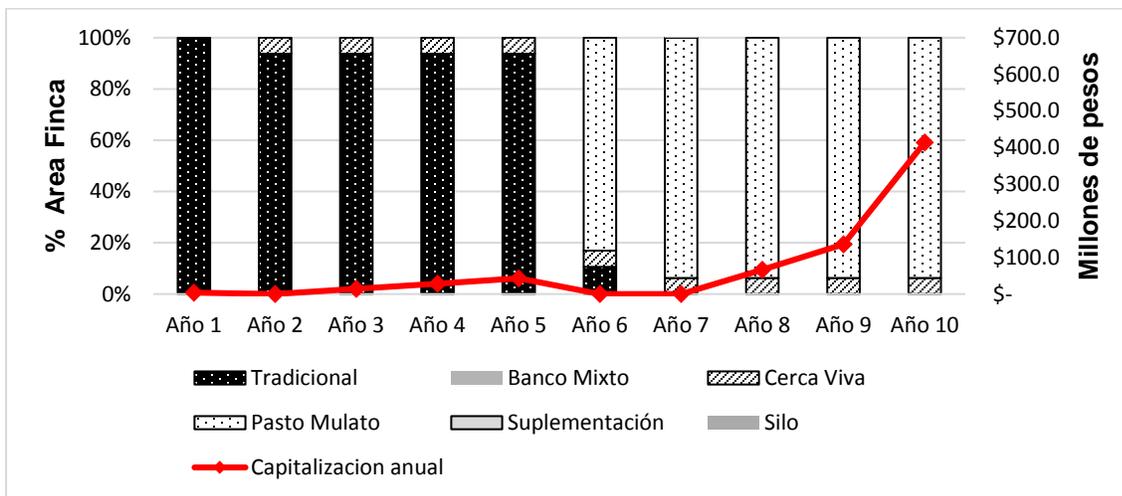


**Figura 4-20:** Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo Ce\_G



Bajo el escenario E3 (Figura 4-21), se observa que en el año 2 el productor siembra 4,5 hectáreas de pastos mejorados con cercas vivas, y se mantiene con este sistema durante cuatro años, mientras capitaliza suficiente dinero para en el año 6 hacer una inversión para transformar 59,8 ha en pasturas mejoradas, y en el siguiente año de nuevo implementa 7,7 hectáreas con el mismo forraje, manteniendo el sistema entre los años 7 a 10 con 67,5 hectáreas con cercas vivas y el área restante con pasto mulato. Bajo estas condiciones de transformación el productor puede aspirar a unos ingresos al final del año 10 cercanos a los 414 millones de pesos.

**Figura 4-21:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo Ce\_G

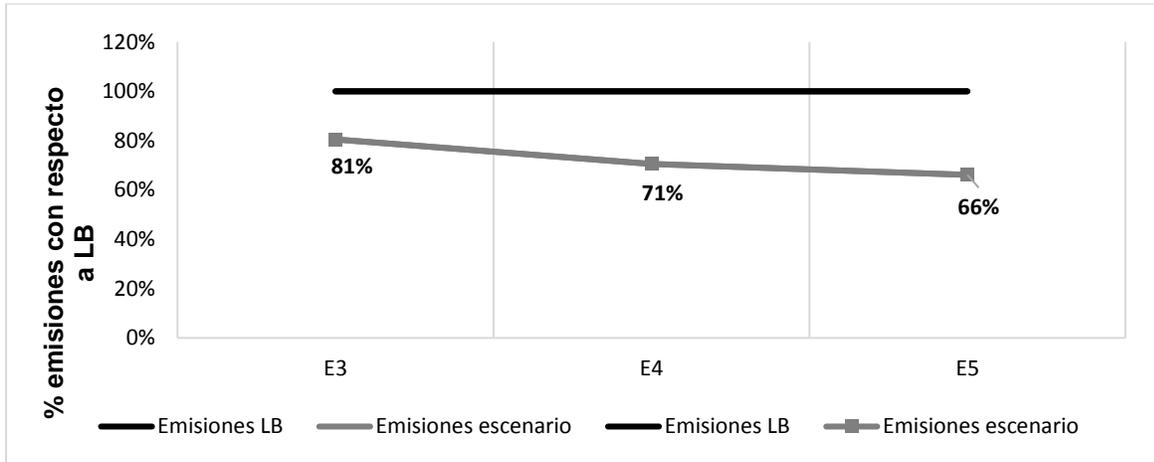


Bajo el escenario E4, se observa que el productor comienza en el año 2, una transformación hacia los pastos mejorados, implementado 18 ha en el segundo año, 23,5 ha en el tercero y 30,5 en el cuarto. Posteriormente mantiene el sistema con las 72 ha en pastos mejorados hasta el año 10, obteniendo en ese año unos ingresos totales acumulados de 565,6 millones de pesos (Figura 4-22).

En el escenario E5 la transformación de la finca presenta una tendencia parecida a E4, ya que se transforma finalmente toda el área en pasturas mejoradas, sin embargo el proceso de transformación es más rápido. Esto sucede ya que en E5 el productor solicita un crédito en los años 2 y 3 y vende mano de obra de los años 2 al 7. Al final del año 10 se observa una capitalización total de 255,6 millones de pesos (Figura 4-23).

En cuanto a la reducción de emisiones acumuladas en las emisiones de metano entérico para la finca típica Ce\_G, en la Figura 4-24 se observa que el escenario 5 (E5), es donde



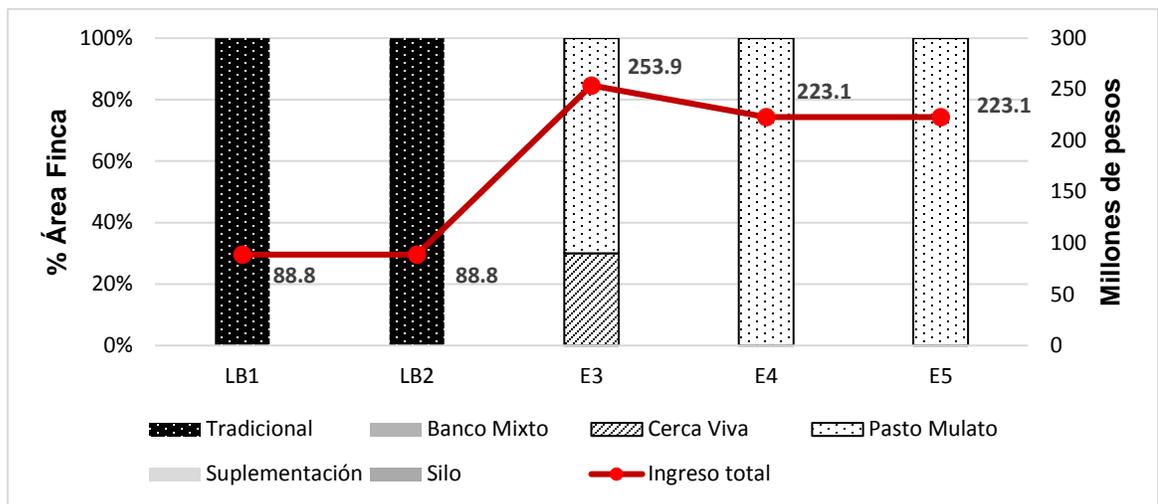
**Figura 4-24:** Porcentaje de reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> por escenario de conversión

#### 4.3.6 Adopción de dietas mejoradas en productores pequeños orientados a doble propósito (DP\_P)

Con base en las características encontradas de los productores pequeños de doble propósito del piedemonte, se realizó la parametrización y modelación bajo distintos escenarios, considerando que este productor tipo cuenta con una finca de 13 hectáreas, 151 jornales familiares disponibles al año de los cuales puede vender hasta 22,5 y una carga estimada de 1,83 UGG/ha.

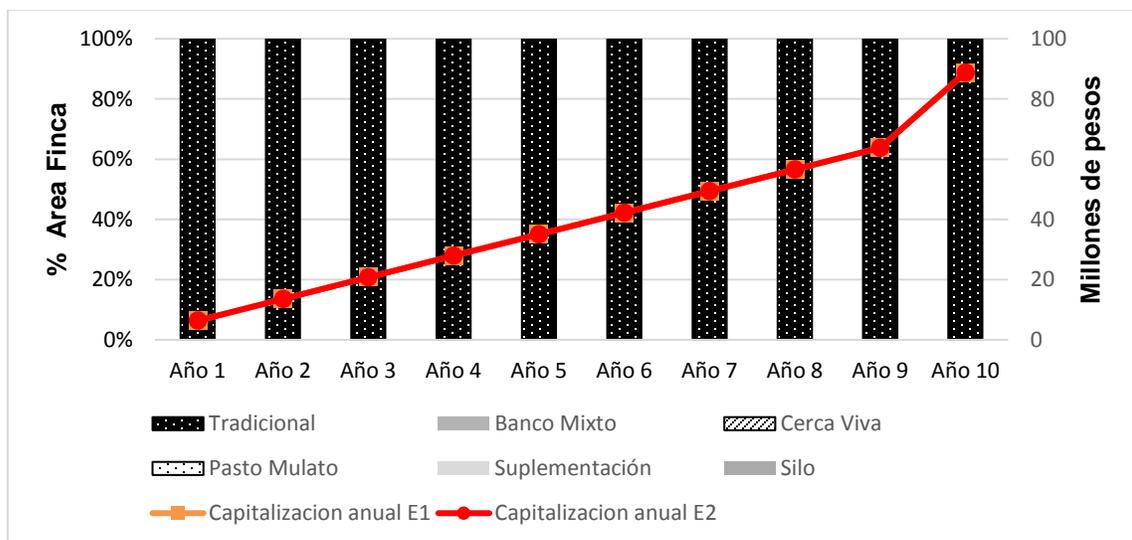
Cómo se puede observar en la Figura 4-25, bajo la oferta de distintas alternativas de reconversión productiva, la opción óptima para maximizar el capital cambia, ya que bajo LB1, que es la condición inicial del productor sin acceso a crédito ni venta de mano de obra, la capitalización al año 10 es de 88,8 millones de pesos, mientras que haciendo la transformación completa de la finca por pastos mejorados y cercas vivas (E3), la capitalización asciende a los 253,9 millones de pesos, lo que es un incremento del 186% en los ingresos acumulados. Los otros escenarios E4 y E5, también representan incrementos en los ingresos sin embargo un poco menores.

**Figura 4-25:** Comparación de la capitalización al año 10 de la finca DP\_P bajo los escenarios modelados



En la Figura 4-26, se observa una comparación entre LB1 y LB2 donde no existe una diferencia entre ellos, lo que indica que para el productor no es relevante el acceso al crédito para mejorar sus ingresos bajo las condiciones actuales, y que en cuanto a la mano de obra en ninguno de los dos escenarios la venta de jornales representa algo para su economía, ya que debe necesitarlos todos para su propia finca.

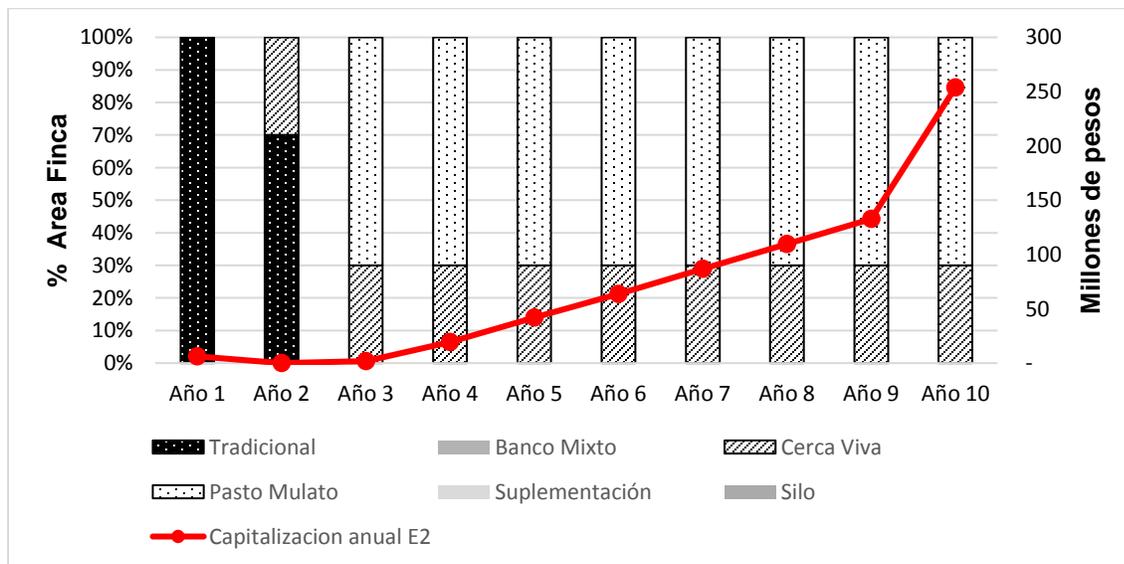
**Figura 4-26:** Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo DP\_P



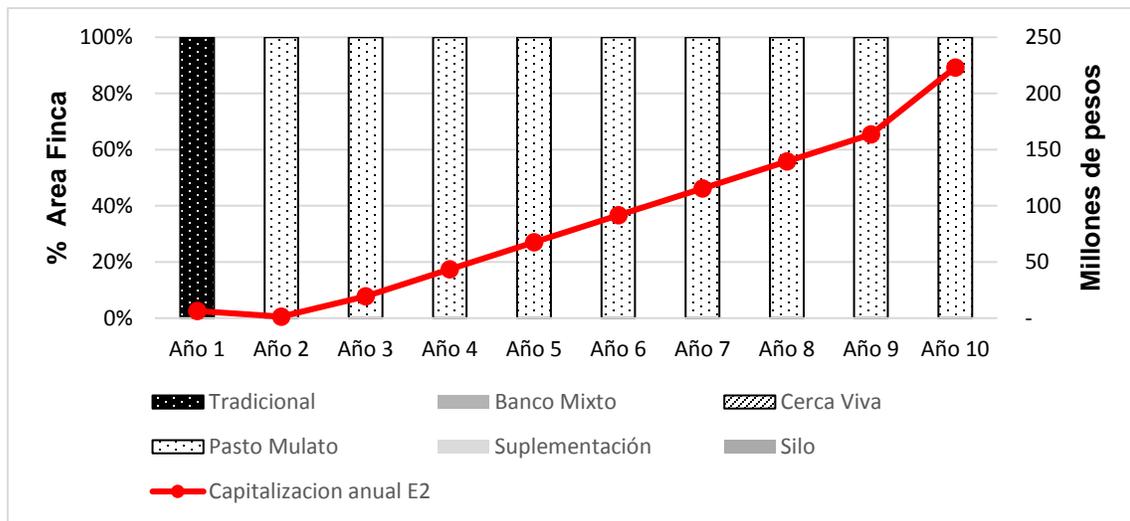
Bajo el escenario E3 (Figura 4-27), donde se permite al modelo seleccionar entre las cinco alternativas posibles, se observa que partir entre los años 2 y 3 el productor realiza la totalidad de la reconversión de sus praderas. Inicia una transformación de su finca implementando 3,9 hectáreas de pastos mejorados con cercas vivas el segundo año y 9,1 hectáreas de pasturas mejoradas en el tercer año. Desde el año 4 en adelante la finca se transforma completamente quedando con pastos mejorados y cercas vivas en las proporciones antes descritas. Bajo estas nuevas condiciones productivas, generadas por la implementación de estas dos tecnologías, el productor puede obtener unos ingresos acumulados al final del año 10 cercanos a los 254 millones de pesos.

Bajo los escenarios E4 y E5, la respuesta de maximización de los ingresos que genera el modelo es igual para ambos y como se observa en la Figura 4-28, desde el segundo año de modelación, el productor implementa en la totalidad de su finca (13 ha) praderas con pastos mejorados y mantiene esta implementación hasta el décimo año. Los ingresos que obtienen el productor en este caso son cercanos a 223 millones de pesos. Bajo estos dos escenarios es más fácil identificar que la mano de obra con la que el productor cuenta, debe invertirla toda en el manejo de la finca y por otro lado, que no necesita de créditos para poder transformar toda su finca, lo que indica que sus ingresos no son bajos respecto al área con que cuenta la finca.

**Figura 4-27:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo DP\_P

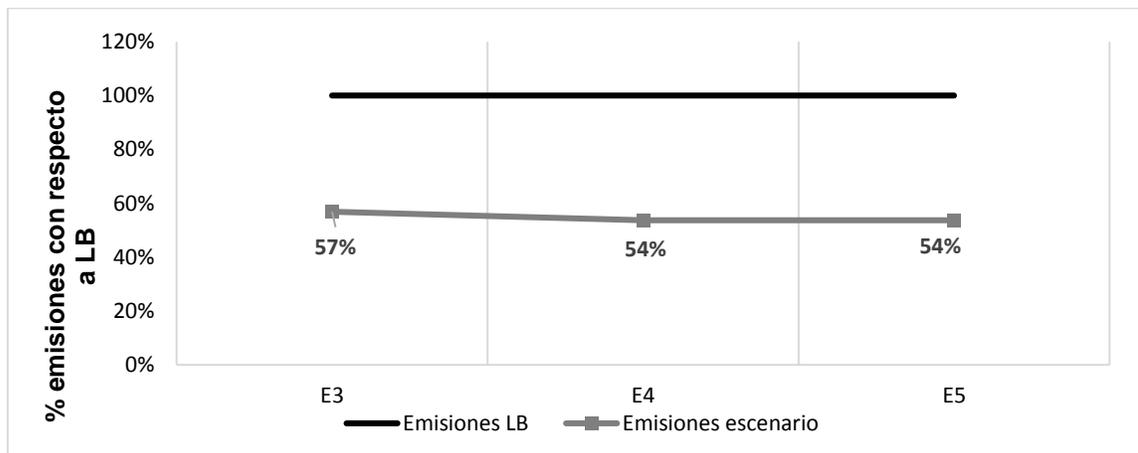


**Figura 4-28:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 y E5 para la finca tipo DP\_P



Finalmente con respecto a las emisiones de metano para la finca del productor típico DP\_P, en la Figura 4-29, se observa que E4 y E5 son los escenarios donde se reducen más las emisiones, hasta en un 54% con respecto a la finca tradicional. De igual forma las reducciones que presenta E3 son cercanas al 55% con respecto al sistema original. Las alternativas evaluadas en general son más sostenibles que el sistema original y además son mucho más rentables a pesar de tener que incurrir en costos de implementación.

**Figura 4-29:** Porcentaje de reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> por escenario de conversión



### **4.3.7 Adopción de dietas mejoradas en productores grandes orientados a doble propósito (DP\_G)**

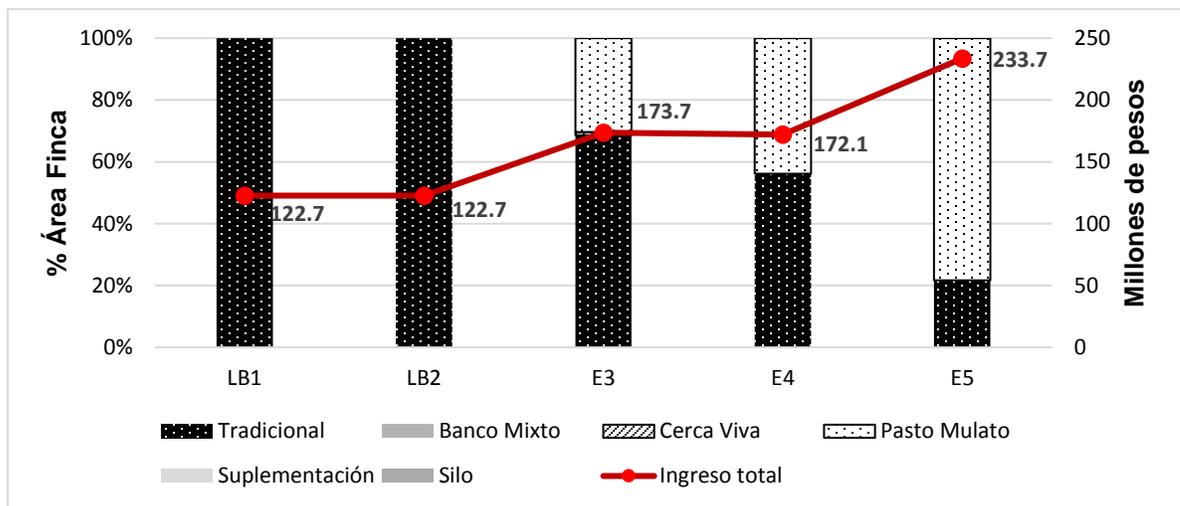
Con base en las características encontradas de los productores de doble propósito de tamaño pequeño se realizó la parametrización y modelación bajo distintos escenarios, considerando que este productor tipo cuenta con una finca de 188 hectáreas, 54 jornales familiares disponibles al año de los cuales puede vender hasta 8 y una carga estimada de 0,46 UGG/ha.

Cómo se puede observar en la Figura 4-30, bajo la oferta de distintas alternativas de reconversión productiva, la reconversión óptima para maximizar el capital cambia, ya que bajo LB1, que es la condición inicial del productor sin acceso a crédito ni venta de mano de obra, la capitalización al año 10 es de 122,7 millones de pesos, mientras que haciendo la transformación completa de la finca y vendiendo mano de obra (E5), la capitalización asciende a los 233,7 millones de pesos, lo que representa un aumento en los ingresos del 90%.

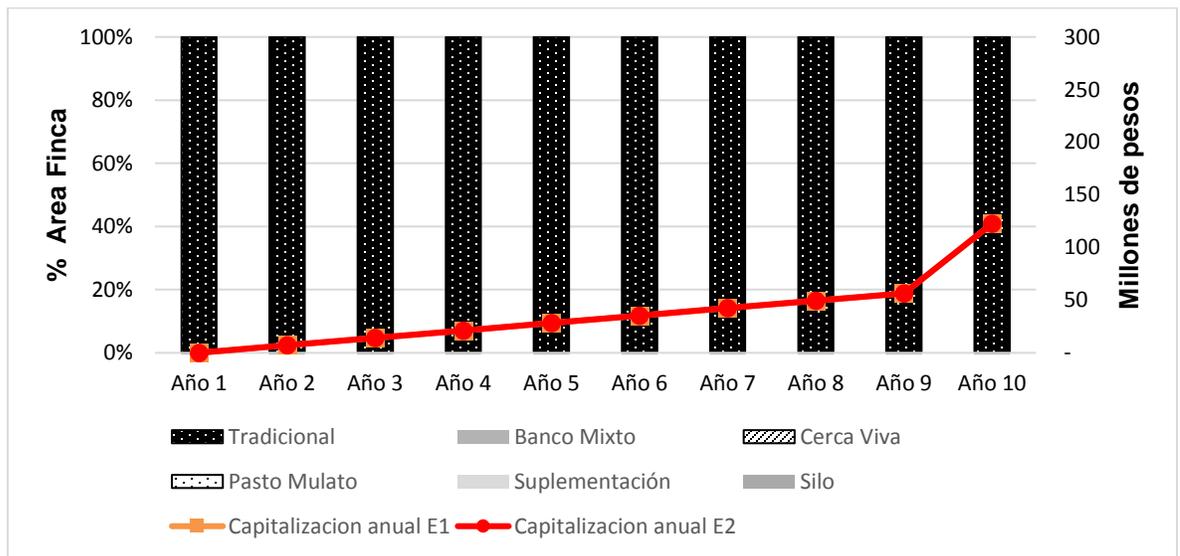
Al realizar un análisis de los resultados bajo cada uno de los escenarios, se determinó el proceso de adopción de las medidas a través del modelo y la explicación de las razones por las cuales en la mayoría de casos esta se presenta de forma paulatina de acuerdo con las restricciones y dotaciones con las que cuenta el productor.

En la Figura 4-31, se observa una comparación entre LB1 y LB2, escenarios donde el modelo mantiene durante los años de simulación, la composición de pastos de la finca tal cual es en la actualidad. Se puede concluir que LB1 y LB2 no son diferentes, lo que indica que para el productor no es relevante el acceso al crédito para mejorar sus ingresos bajo las condiciones actuales, al igual que lo que tiene que ver con la venta mano de obra, ya que en ambos casos la mano de obra la utiliza en su totalidad para aportar a la demanda interna de la finca.

**Figura 4-30:** Comparación de la capitalización al año 10 de la finca DP\_G bajo los escenarios modelados

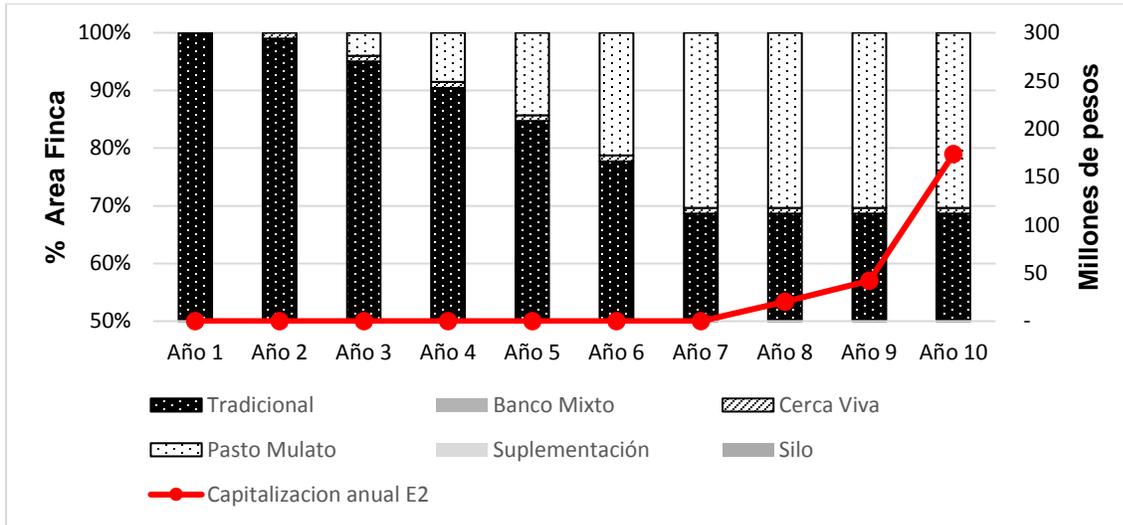


**Figura 4-31:** Capitalización bajo las condiciones LB1 y LB2 para la finca tipo DP\_G



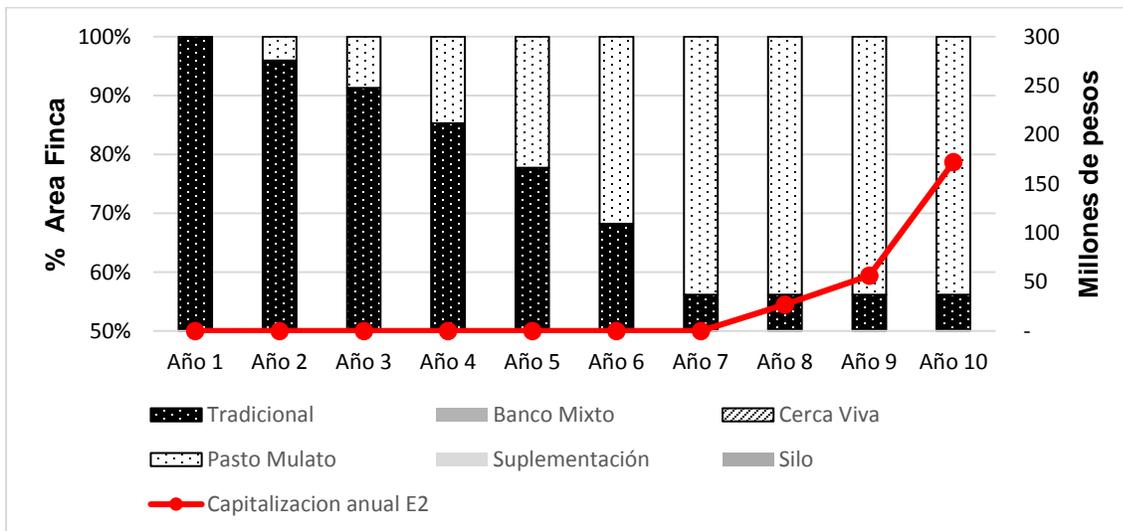
Bajo el escenario E3 (Figura 4-32), se observa que en el año 2 el productor siembra 2 hectáreas de pastos mejorados con cercas vivas, los cuales mantiene hasta el periodo final de la modelación (año 10). El tercer año comienza a sembrar pastos mejorados, de forma progresiva, hasta llegar en el séptimo año a 57 ha transformadas en este tipo de praderas. A partir del año 7, la composición de la finca se mantiene constante en 129 ha en praderas tradicionales, 2 ha con cercas vivas y 57 ha con pastos mejorados.

**Figura 4-32:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E3 para la finca tipo DP\_G



Bajo el escenario E4, se observa que el productor comienza una transformación hacia los pastos mejorados, implementando 7,58 ha en el segundo año, 8,83 ha en el tercero, 11,24 ha en el cuarto, 14,2 ha en el quinto, 18 ha en el sexto y 22,68 ha en el séptimo año. Posteriormente mantiene el sistema con las 82,5 ha en pastos mejorados y 105,5 ha se mantienen en praderas tradicionales, hasta el año 10. El ingreso obtenido acumulado al final del periodo de modelación es de 172 millones de pesos (Figura 4-33).

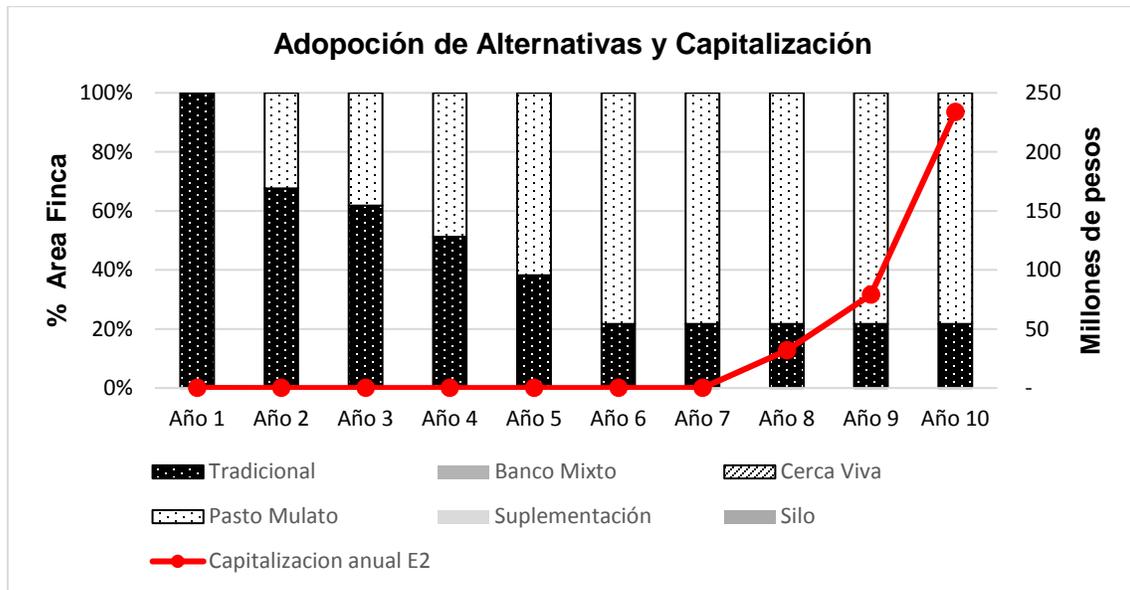
**Figura 4-33:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E4 para la finca tipo DP\_G



En el escenario E5 la transformación de la finca presenta una tendencia parecida a E4, sin embargo el proceso de transformación es más rápido. Esto sucede ya que en E5 el

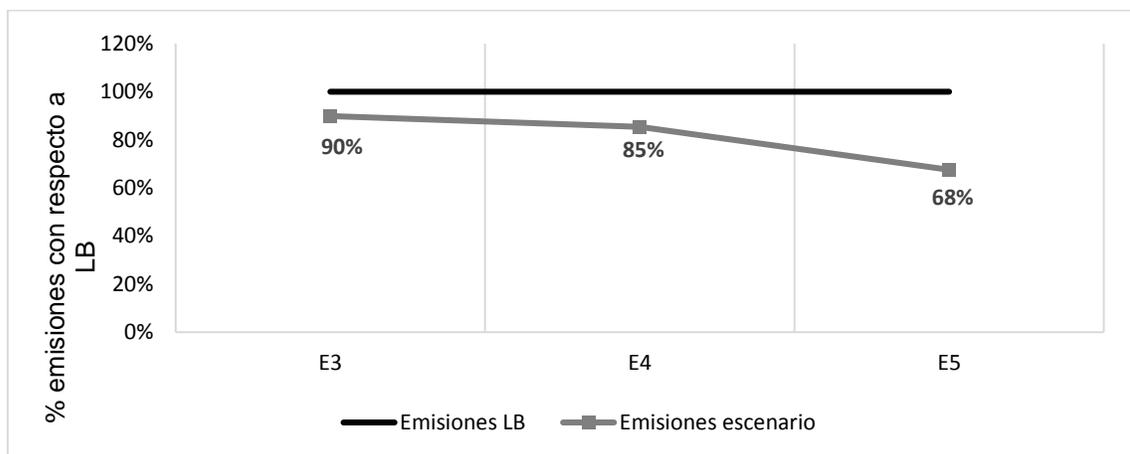
productor solicita unos créditos desde el segundo hasta el séptimo año. A partir del sexto año el sistema quedará conformado por 147,2 ha en pastos mejorados y 40,8 ha que se mantienen en praderas tradicionales, hasta el final del año 10. Al final del periodo de modelación se observa una capitalización total de 234 millones de pesos (Figura 4-34).

**Figura 4-34:** Adopción de alternativas y capitalización bajo E5 para la finca tipo DP\_G



En cuanto a la reducción de emisiones acumuladas en las emisiones de metano entérico para la finca típica DP\_G, en la Figura 4-35 se observa que E5, es donde se reducen más emisiones, hasta ser solamente el 68% de lo que emitía la finca bajo el sistema de pastoreo tradicional.

**Figura 4-35:** Porcentaje de reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> por escenario de conversión



## 4.4 Conclusiones

En trabajos realizados utilizando modelos de programación lineal, Scarpari M.S. y Beauclair (2010) sostienen que "la planificación agrícola optimizada es una actividad fundamental en la rentabilidad de los negocios porque puede aumentar los beneficios de una operación con bajos costos adicionales"; lo anterior se observa en los resultados obtenidos a lo largo de este capítulo bajo la implementación de los distintos escenarios de intensificación productiva modelados.

También se evidenció que este tipo de modelos permiten hacer un acercamiento aproximado a la realidad productiva y al utilizarse seleccionando variables clave, pueden ayudar a entender la complejidad y estimar los beneficios potenciales del uso de sistemas de producción integrados, tal y como se ha encontrado en otros trabajos (Gameiro, Rocco y Caixeta Filho, 2016). Sin embargo no se puede dejar de lado el hecho de que este tipo de análisis tiene varias limitaciones dado que el comportamiento del sistema "finca" en su conjunto no es lineal.

Con respecto a los sistemas de producción estudiados, los cuales son típicos de la región del piedemonte, se determinó que en la actualidad algunos tienen unos ingresos muy bajos, sin embargo todos tienen suficientes ganancias cada año para suplir los gastos familiares y mantener sus sistemas productivos; estos resultados son similares a los obtenidos por Majeke et al. (2013). Adicionalmente, todos los tipos de productores tienen al final de cada año dinero para ahorrar o hacer inversiones en las fincas de acuerdo a sus ingresos. Con base en lo anterior, se encontró que bajo las condiciones actuales, todos los tipos de productores pueden adoptar al menos una de las medidas de intensificación productiva propuestas.

Las medidas de compra y suplementación con silo de maíz y la implementación de bancos mixtos forrajeros, no son las alternativas económicamente más favorables para los productores de la zona, ya que bajo ninguno de los escenarios y para ningún productor tipo el modelo sugirió su implementación. Esto se debe principalmente a que los costos del silo de maíz son muy altos comparados con su calidad nutricional y en el caso de los bancos mixtos, la demanda de mano de obra es muy alta, lo que hace que esta medida sea muy costosa. No obstante este tipo de alternativas pueden ser útiles para los

productores en época de verano para mantener vivos a sus animales, así esto signifique gastar dinero y no obtener ganancias ni en la producción de leche ni en el peso vivo de los animales.

Al ser un modelo de programación lineal la herramienta utilizada para evaluar la adopción de las medidas de intensificación productiva y considerando que el objetivo de estos modelos es la maximización de los ingresos al final del periodo evaluado (10 años), la implementación de los sistemas silvopastoriles con cercas vivas se convierte en la alternativa más adoptada por los productores y la que genera mayores ingresos netos totales al final del periodo de simulación. Esta adopción masiva se presenta ya que después del año 8 de su implementación los productores pueden talar los árboles y esto les generará un ingreso importante. Por esta razón de darse una modelación con un periodo más largo de tiempo, es posible que el modelo hubiera seleccionado en más de una ocasión esta misma medida, abarcando un área mayor adoptada. Se debe considerar que esta medida además de ayudar a reducir las emisiones ruminales aporta a la mitigación del cambio climático, ya que los arboles fijan carbono. Sin embargo en este estudio no se incluyó.

Las fincas de cría grandes son las que reducen menos cantidad de emisiones con relación a las actuales, ya que bajo el escenario donde más reducen, sus emisiones solo decrecen en un 5%. Sin embargo al ser los sistemas productivos con mayor área y cantidad de animales cobra relevancia este valor. Las fincas de ganadería de ceba y doble propósito pequeñas son las que potencialmente pueden reducir más cantidad de emisiones de metano ya que bajo la implementación del escenario E5 estas fincas pueden disminuir respectivamente en 47% y 46% las emisiones generadas por unidad de producto bajo los sistemas actuales.

Evidentemente el escenario E5, mostró por lo general que los mejores resultados en cuanto a capitalización para todos los tipos de productor dependen de la posibilidad de vender mano de obra y tener acceso al crédito, lo que es acorde con la tesis de Cano (2016), que afirma que la exclusión financiera de los productores rurales es una de las principales barreras para el desarrollo del campo.

Bajo la implementación optima de las alternativas productivas en los escenarios donde se logra la mayor capitalización, el aumento en los ingresos oscila entre el 18%, en la cría

grande, y el 747%, en la ceba pequeña. Esto indica que hay sistemas de producción en donde la inversión para tecnificación tiene un mayor potencial económico, lo que podría ser un estímulo para que los productores de estos sistemas generen cambios en sus sistemas pecuarios.

## Referencias

- Alvarado Boirivant, J. (2009). La programación lineal aplicación de las pequeñas y medianas empresas. *Reflexiones*, 88(1).
- Annetts, J. E., y Audsley, E. (2002). Multiple objective linear programming for environmental farm planning. *Journal of the Operational Research Society*, 933-943.
- Brokken, R. F. (1971a). Programming models for use of the Lofgreen-Garrett net energy system in formulating rations for beef cattle. *Journal of animal science*, 32(4), 685-691.
- Brokken, R. F. (1971b). Programming models for use of the Lofgreen-Garrett net energy system in formulating rations for beef cattle. *Journal of animal science*, 32(4), 685-691.
- Byerlee, D.; De Janvry, A.; Sadoulet, E.; Townsend, R.; Klytchnikova, I. (2008). *World Development Report 2008: Agriculture for Development*. World Development Report; no. 30. Washington, D.C.: World Bank Group. Recuperado de: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2007/01/8711994/world-developmentreport-2008-agriculture-development> (Consultado el 20 de octubre de 2017).
- Cano, C. G. (2013). "La agricultura colombiana de cara a los pactos bilaterales de comercio", Borradores de Economía, núm. 778, Banco de la República
- Cano, C. (2016) A manera de introducción: reflexiones e hipótesis sobre el sector agropecuario. En Cano, Carlos Gustavo, Ana María Iregui, María Teresa Ramírez, y Ana María Tribín (editores), *El desarrollo equitativo, competitivo y sostenible del sector agropecuario en Colombia* (pp. 1-14), Bogotá: Banco de la República.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE (2015). "Condiciones de vida de la población residente en el área rural dispersa censada", *Censo Nacional Agropecuario*, Boletín núm. 4, Bogotá.
- Junguito, R.; Perfetti, J. J.; Becerra, A. (2014). "Desarrollo de la agricultura colombiana", Cuadernos de Fedesarrollo, núm. 48, Fedesarrollo.
- Gameiro, A. H., Rocco, C. D., y Caixeta Filho, J. V. (2016). Linear Programming in the economic estimate of livestock-crop integration: application to a Brazilian dairy farm. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 45(4), 181-189.

- Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. (2014). *Introduction to operations Research*. 10th ed. McGraw Hill Higher Education, Columbus, OH.
- Holmann, F. (2000). El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras. XVI reunión latinoamericana de producción animal (ALPA). Montevideo, Uruguay.
- Igwe, K. C., Onyenweaku, C. E., y Nwaru, J. C. (2011). Application of linear programming to semi-commercial arable and fishery enterprises in Abia State, Nigeria. *International Journal of Economics and Management Sciences*, 1(1), 75-81.
- Kennedy, J. O. S. (1972). A model for determining optimal marketing and feeding policies for beef cattle. *Journal of Agricultural Economics*, 23(2), 147-160.
- Majeke, F., Majeke, J., Mufandaedza, J., y Shoko, M. (2013). Modeling a Small Farm Livelihood System using Linear Programming in Bindura, Zimbabwe. *Research Journal of Management Sciences*, 2(5), 20-23.
- Meyer, C. F., y Newett, R. J. (1970). Dynamic programming for feedlot optimization. *Management Science*, 16(6), B-410.
- O'Donnell, C. J.; Rao, D. S.; Battese, G. E. (2008). "Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios", *Empirical Economics*, vol. 34, núm. 1, pp. 231-255.
- Scarpari M.S. y Beauclair E.G.F., (2010). Optimized Agricultural Planning Of Sugarcane Using Linear Programming, *Revista Investigacion Operacional*, 31(2), 126-132
- Tsionas, E. G.; Kumbhakar, S. C. (2004). "Markov switching stochastic frontier model", *Econometrics Journal*, núm. 7, pp. 398-425.
- Wilton, J. W., Morris, C. A., Leigh, A. O., Jenson, E. A., y Pfeiffer, W. C. (1974). A linear programming model for beef cattle production. *Canadian Journal of Animal Science*, 54(4), 693-707.
- Yang, W. Y. (1965). Metodología de las investigaciones sobre administración rural: destinadas a aumentar la eficacia de la producción (No. 631.1 YANm). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.



## **5. Conclusiones y recomendaciones generales**

### **5.1 Conclusiones**

Las principales conclusiones de este trabajo están alrededor de los principales resultados obtenidos en los diferentes capítulos de este documento, ya que de cada uno de ellos quedan aspectos importantes por resaltar.

En cuanto a las alternativas de intensificación evaluadas en este trabajo, es importante recalcar que corresponden a actividades que se han promovido y se promueven actualmente en la región, destacándose que muchos de los proyectos que se están desarrollando en la zona están marcados alrededor de estas y por esa razón la relevancia de este trabajo fue determinar qué tan adoptables e importantes para la economía de los productores podían convertirse.

Los productores ganaderos del piedemonte son diversos y principalmente las actividades que se centran en la región corresponden a la ganadería de cría seguida de la ganadería de ceba y posteriormente de la ganadería doble propósito. Estas actividades son importantes para la región, ya que la mayoría de familias dependen económicamente de ellas o una parte de sus ingresos proviene de esta actividad económica.

La cría es la actividad que se desarrolla actualmente en las fincas con mayor área y principalmente estos sistemas productivos corresponden a fincas localizadas en las zonas más lejanas de las cabeceras municipales, donde el precio de la tierra es bajo y la accesibilidad es más difícil. Por estas razones su productividad no es muy alta y los costos de una reconversión productiva si lo son, tanto por la cantidad necesaria, como por la dificultad de transporte de insumos a estas fincas. Por lo anterior se concluye que en muchos casos es más fácil y económica la implementación de medidas en sistemas de ganadería doble propósito y de ceba.

Los productores de ceba, cría y doble propósito pequeños, deben tener factores externos al tamaño de sus predios para tomar la decisión del tipo de negocio ganadero que desarrollan, ya que como es sabido el sistema doble propósito es más rentable que la ceba y este sistema a su vez lo es más que la cría. Por esta razón la decisión de la actividad productiva a la cual se va dedicar una finca pequeña está condicionada fuertemente por la oferta ambiental del predio y diversos factores habilitantes como son la cercanía de las vías y de los mercados.

Por otro lado, es evidente que la eficiencia productiva de las fincas grandes, principalmente las de cría, es muy baja, esto se debe principalmente a la disponibilidad abundante del recurso tierra y a la escases y altos costos de otros recursos como mano de obra e insumos. Sin embargo en las ganaderías de tamaño mediano y pequeño se observa que se ha generado un aprovechamiento mayor de los recursos, ya que presentan indicadores de producción más altos.

Dadas las restricciones de adopción de tecnologías identificadas en este trabajo, es importante en el futuro generar alternativas que demanden menor cantidad de mano de obra ya que como se observó en el primer capítulo la tendencia generalizada en todas las fincas es que los administradores y mayordomos que trabajan son personas de una edad avanzada lo que indica que en un futuro próximo no habrá un relevo generacional en las fincas, por lo tanto se espera que en el futuro haya un mayor escasez de mano de obra en las zonas rurales.

En términos generales los forrajes que se encuentran actualmente en la zona no tienen las mejores características nutricionales, tal cual se identificó en los análisis bromatológicos utilizados en el desarrollo de este trabajo, lo que se contradice con la información encontrada en otras publicaciones donde se reportan condiciones mucho mejores en la calidad de estos materiales. Por lo tanto se puede estimar que la mayoría de pastos en la región están degradados, sobrepastoreados o desaprovechados. Sin embargo una pequeña fracción de productores tiene algunas áreas con forrajes un poco mejores, principalmente los de las fincas pequeñas.

Con respecto a los modelos de programación lineal, son herramientas que a pesar de ser utilizadas desde hace tiempo, generan información y criterios técnicos y económicos que

permiten priorizar la implementación de tecnologías dentro de los sistemas productivos, por lo que son herramientas válidas para tomar decisiones administrativas dentro de empresas ganaderas.

Sin embargo una de las limitaciones de trabajar con estas herramientas es que no permiten incluir variables sociales como la decisión propia que el productor tiene sobre su finca y sobre los activos que administra, ya que el modelo simplemente se enfoca en hacer una optimización matemática de los recursos. Otro de los aspectos importantes para el buen uso de estos modelos es que las variables introducidas para acercarse más a la realidad deben ser ampliamente conocidas y debe recogerse una información de alta calidad de lo contrario se puede incurrir en resultados de mala calidad.

Con respecto a los resultados de adopción de tecnologías, tiene relevancia el hecho de que la totalidad de los productores con las condiciones que tienen actualmente, están en capacidad de hacer algún tipo de reconversión productiva, lo que indica que este proceso no se ha dado por varias razones entre ellas puede ser la falta de conocimiento de las alternativas, la falta de accesibilidad a las tecnologías, los costos de implementación más elevados de lo que se estimó para este estudio o simplemente porque bajo las condiciones actuales los sistemas están generando ganancias económicas suficientes para satisfacer a los productores sin necesidad de hacer ningún tipo de inversión. Esta última condición puede ser más importante a tener en cuenta en aquellos ganaderos que tienen mayores áreas productivas.

Sin embargo, con respecto a la apreciación anterior, en la región en la actualidad se pueden observar fincas donde se han implementado ese tipo de sistemas, sin embargo no ha sido de forma masiva, por lo que se deben desarrollar mayores estudios sobre los mecanismos que se deben implementar para que estas medidas se adopten.

Las metodologías utilizadas a lo largo de este documento son aplicables no sólo para la región de estudio sino que se pueden escalar tanto a nivel regional, como a nivel nacional, siempre y cuando se cuente con información apropiada.

Como se observa en el documento las emisiones actuales de gases de efecto invernadero son altas dentro de cada uno de los sistemas y aún más si se les compara con el tamaño de las fincas, lo que es un indicador evidente de la baja productividad de la región. Sin

embargo es importante observar que bajo las medidas implementadas a través del modelo de programación lineal, se puede aumentar la producción de carne y de leche, mejorar la rentabilidad de los productores y además tener reducciones acumuladas superiores al 50%.

Con base en los resultados del proyecto, se puede afirmar que de implementarse las alternativas evaluadas, de forma masiva en las fincas de la región del piedemonte llanero, sería posible que los municipios donde las fincas ganaderas se localizan puedan cumplir con los objetivos planteados por el gobierno de la reducción del 20% de las emisiones sectoriales.

Los resultados de este trabajo pueden servir como una herramienta para la búsqueda de recursos internacionales de financiación para la implementación de este tipo de alternativas de intensificación sostenible, aprovechando el momento coyuntural en el que está el ambiente internacional con respecto a las reducciones de emisiones de gases efecto invernadero.

Finalmente, los resultados de este proceso de investigación permiten sugerir que para la implementación de políticas públicas en la zona de estudio y para la toma de decisiones de los productores al momento de intensificar sus fincas, los datos y metodologías presentados en este documento pueden ser de gran ayuda para garantizar estrategias óptimas.

## **5.2 Recomendaciones**

Con base en los resultados encontrados en este trabajo, se generan inquietudes con respecto al potencial de mitigación de alternativas tecnológicas diferentes a las evaluadas sobre los sistemas de producción del piedemonte. En este sentido se recomienda determinar el potencial económico y de reducción de emisiones de otras alternativas tales como las praderas con otras especies forrajeras, variedades e híbridos mejorados diferentes al pasto mulato, la implementación de algunos pastos de corte, la siembra de maíz para la elaboración de silo dentro de la misma finca (reducir los costos de implementación), etc.

Otra de las recomendaciones para trabajos futuros, corresponde al abordaje de otras problemáticas ambientales de interés como lo son la reducción de las emisiones de óxido nítrico producido por las heces de los animales, la fijación de carbono generada por las raíces de los pastos mejorados, la reducción en la fertilización nitrogenada de las praderas, la explotación de propiedades como la inhibición biológica de la nitrificación que generan los exudados en la raíces de algunos forrajes, etc. De esta forma en algún momento podrá hacerse un abordaje más completo del sistema ganadero y de esta forma será posible estimar más acertadamente las reducciones potenciales en los sistemas de producción bovinos.

De igual forma, este tipo de trabajos puede implementarse en un futuro no solo para determinar reducción de emisiones generadas por unidad de producto, ya sea kilogramos de carne o litros de leche, sino también para evaluar los resultados de la implementación de alternativas productivas que adicionalmente aumenten la fijación de carbono dentro de las fincas, utilizando dicha variable como uno de los criterios importantes dentro de la modelación. Ejemplos de lo anterior son la implementación de sistemas forestales, la restauración de bosques degradados y la conservación de aquellos que aún no han sido intervenidos. La inclusión de estas variables, permitirá evaluar el sistema productivo ganadero en su totalidad, incluyendo los animales, los cultivos y las praderas, permitiendo demostrar cuantitativamente que las fincas ganaderas en muchos casos puede ser sumideros de carbono más que emisores, esto como resultado del balance entre la cantidad de emisiones generadas y las capturas de carbono realizadas. Con base en lo anterior sería posible trabajar en la generación de información para promover la generación de un certificado de producción baja en emisiones, lo que podría a mediano plazo significar un pago diferencial a los productores que generen menos emisiones durante su proceso productivo de leche y carne.

Otra de las recomendaciones para realizar a futuro en este tipo de trabajos, es la inclusión de una valoración económica de los kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes reducidos por cada uno de los distintos sistemas ganaderos reconvertidos. Esto se puede hacer a partir del precio del carbono que haya en los mercados internacionales, de esta forma es posible introducir en el modelo de programación lineal esta variable como un ingreso adicional al

productor que emita menos gases efecto invernadero, lo que puede ser otro factor de decisión importante para la toma de decisión en la implementación de una u otra medida.

De igual forma otro tipo de estudios que se puede realizar con este tipo de herramientas, es la generación de modelos de programación lineal que se enfoquen principalmente en la minimización en las emisiones, lo que sería un enfoque diferente a utilizado en este trabajo que se enfocó principalmente en la maximización de utilidades. De igual forma podrían utilizarse modelos multiobjetivo en donde se busquen óptimos tanto para el aumento en los ingresos como para la reducción de emisiones.

Otra de las recomendaciones más importantes, con base en el trabajo realizado, es la necesidad de que se conforme una alianza interinstitucional que permita generar una base de datos nacional de análisis bromatológicos de forrajes, en donde se incluyan principalmente aquellos datos generados por las universidades y centros de investigación de nivel nacional, regional y departamental. Contar con esta información en el futuro es de suma importancia para poder tener claridad sobre la calidad de los alimentos que consumen los animales en todo el país y con esta información poder generar alternativas productivas mejor aterrizadas a las condiciones locales.

No obstante, para lograr hacer una transferencia de tecnologías apropiada a cada tipo de productor, se requiere integrar y promover alternativas alimenticias, desarrollar modelos innovadores de sistemas productivos, diagnosticar el estado actual de los sistemas, caracterizar y realizar investigación aplicada a nivel de finca con métodos participativos (Holmann, 2000). Esto permitirá generar mejores estrategias enfocadas en las necesidades propias de cada productor.

Dado que en la actualidad como consecuencia del desarrollo tecnológico acelerado de las últimas décadas a nivel computacional y de almacenamiento de información, junto con la tendencia mundial de muchas instituciones de generar investigaciones de libre acceso y el incremento progresivo en la velocidad de navegación y descarga de internet, hay una oferta masiva de datos generados en trabajos de investigación que están disponibles para ser utilizados. En este sentido, el uso de modelos matemáticos de todo tipo, incluyendo los usados en este trabajo, pueden convertirse en una de las herramientas más relevantes para aprovechar dicha información, generando resultados importantes a bajo costo. Por

esta razón se debe difundir entre la comunidad académica este tipo de metodologías de investigaciones subvaloradas aun por no ser convencionales. Con base en lo anterior, se recomienda utilizar las metodologías descritas en este trabajo para aprovechar datos de alta calidad y resolución, tales como los generados en el censo nacional agropecuario, para generar información a nivel nacional que puede ser utilizada para la formulación de políticas productivas y ambientales en distintos niveles administrativos del país.

En cuanto al modelo Ruminant utilizado en este trabajo para simular la producción de carne, leche y emisiones de metano, es una herramienta que sirve para generar datos y tomar decisiones sobre sistemas de ganadería bovina, sin embargo es necesario realizar una validación del mismo para Colombia y de igual manera evaluar el modelo para utilizarlo como una herramienta de monitoreo y de verificación de la reducción de emisiones en fincas que se identifiquen con las políticas nacionales de reducción en la intensidad de carbono.

Finalmente, se recomienda realizar un trabajo de validación en campo con los resultados de las metodologías utilizadas en la construcción de esta tesis (tanto en la modelación de emisiones como en el modelo de programación lineal), ya que como se mencionó a lo largo del documento el uso de modelos tiene asociadas incertidumbres que podrían hacer que los resultados en la vida real varíen.