UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EFECTO DE CUATRO NIVELES DE FERTILIZACIÓN ORGÁNICA Y QUÍMICA SOBRE LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE PASTOS EN GUATAVITA CUNDINAMARCA

Jenny Carolina Gachetá Sánchez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá, Colombia

2019

EFECTO DE CUATRO NIVELES DE FERTILIZACIÓN ORGÁNICA Y QUÍMICA SOBRE LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE PASTOS EN GUATAVITA CUNDINAMARCA

Jenny Carolina Gachetá Sánchez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ciencias Agrarias

Director:

PhD. Heliodoro Argüello Arias

Codirector:

Dr. Jairo Leonardo Cuervo Andrade

Línea de Investigación:

Suelos y aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá, Colombia

2019

A mi hijo por ser mi inspiración, a mi familia por su motivación y a mi amigo.

«Un ser humano es parte del todo que llamamos universo, una parte limitada en el tiempo y en el espacio. Está convencido de que él mismo, sus pensamientos y sus sentimientos, son algo independiente de los demás, una especie de ilusión óptica de su conciencia. Esa ilusión es una cárcel para nosotros, nos limita a nuestros deseos personales y a sentir afecto por los pocos que tenemos más cerca. Nuestra tarea tiene que ser liberarnos de esa cárcel, ampliando nuestro círculo de compasión, para abarcar a todos los seres vivos y a toda la naturaleza».

Albert Einstein

Agradecimientos

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Corredor Tecnológico de Bogotá y Cundinamarca derivado 1, el cual financió el proyecto.

Agradezco a mi director de tesis, el profesor Heliodoro Argüello, y a mi codirector de tesis, el profesor Jairo Leonardo Cuervo.

A su vez, doy gracias a José Luis Castillo, quien me apoyó en el desarrollo técnico del proyecto y fue un actor importante en la parte experimental de la investigación y me apoyo de muchas maneras para finalizar mi maestría.

A los productores y dueños de las fincas en donde desarrollé mi trabajo, como la señora Mercedes Sarmiento, Rosalba Cortés y el señor Camilo Aurelio Garzón, también les agradezco por su trabajo.

Resumen

Los suelos utilizados para la actividad ganadera en el municipio de Guatavita, Cundinamarca (Colombia), en su mayor parte son de baja fertilidad y alta acidez, lo cual genera bajos rendimientos en la producción de pasturas. Algunas especies nativas se adaptan a estas condiciones, pero no se logra obtener una alta producción de biomasa para los sistemas ganaderos. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de cuatro tratamientos de fertilización química y fertilización orgánica sobre la producción y calidad de forrajes en pequeños productores de leche de Guatavita, con el fin de generar un modelo de manejo de pasturas en sistemas de producción lechero que pueda ser implementado por los productores de la zona y que contribuya a mejorar la producción y rendimiento de pastos en la región. Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar, en parcelas de 500 m^2 para cada tratamiento. Se aplicó cal agrícola a todo el suelo de acuerdo con lo sugerido por el análisis de laboratorio, con el objetivo de corregirla acidez, balancear relaciones catiónicas y mejorar las condiciones del suelo para la solubilidad y disponibilidad de nutrientes aplicados en los tratamientos. Se implementaron cuatro tratamientos experimentales: T0 = 0 % fertilización (control), T1= 50 % fertilización química, – 50 % fertilización orgánica, T2= 75 % fertilización química – 25 % fertilización orgánica y T3= 100 % fertilización química. Se realizaron muestreos semanales hasta el día 60 después del pastoreo. Se evaluó el rendimiento de la materia seca (RMS), microorganismos benéficos del suelo, FDA, FDN, digestibilidad, proteína en el pasto se determinaron los índices de eficiencia en el uso del nitrógeno, como eficiencia agronómica y balance parcial de nitrógeno. Los resultados sugieren que el RMS incrementó significativamente con la aplicación de los tratamientos de fertilización con respecto al tratamiento control entre 11,2 y 22 kg/ha de materia seca por kilogramo de nitrógeno aplicado. El contenido de microrganismos benéficos, como aerobios comunes fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo, se incrementó en los tratamientos en los cuales se aplicó la fertilización orgánica. La proteína del pasto aumentó significativamente con respecto al tratamiento control, pero no hubo diferencias a través de los tiempos de pastoreo evaluados. Para los parámetros de FDA, FDN y digestibilidad

no hubo diferencias significativas entre tratamientos ni entre los tiempos de pastoreo evaluados.

Palabras clave: praderas, proteína, fibras, digestibilidad, uso eficiente de nutrientes.

Abstract

The soils used for livestock production in the municipality of Guatavita, Cundinamarca (Colombia), are mostly with low fertility and high acidity, which generates low pasture yield. Some native species are well adapted to these conditions, but they cannot produce a high yield of biomass for the livestock systems. The aims of the present study is to evaluate the effect of four chemical fertilization treatments and organic fertilization on the production and quality of forages in small milk production systems in Guatavita, in order to generate a model of soil management that could be implemented by the producers in the area and contributes to improve production practices as well as yield for the pastures in the region. A completely randomized experimental block design was used in plots of 500 m2 per treatment. Agricultural lime was applied to the entire soil according to the laboratory analysis, with the objective of correcting the the acidity, balancing cationic relations and improving the soil conditions for the solubility and availability of nutrients applied in the treatments. Four experimental treatments were implemented: T0 = 0 % fertilizer (control), T1= 50 % chemistry fertilizer and 50 % organic fertilizer, T2 = 75 % chemistry fertilizer and 25 % organic fertilizer and T3= 100 % chemistry fertilizer. Weekly samplings were carried out until day 60 after grazing. Dry matter yield (DMY), beneficial soil microorganisms, Fiber acid Detergent (FAD), fiber Neutral Detergent (FND), digestibility, prairie protein and nitrogen use efficiency rates were determined. It was found that the DMY increased significantly with the application of fertilization treatments with respect to the control treatment between 11.2 and 22 kg / ha of dry matter per kilogram of nitrogen applied. The content of beneficial microorganisms such as common aerobes nitrogen fixers and phosphorus solubilizers increased in the treatments in which organic fertilization was applied. The grass protein increased significantly with respect to the control treatment, but there were no differences through the grazing times evaluated. For the parameters of FDA,

FDN and digestibility there were no significant differences between treatments nor between the grazing times evaluated.

Key words: Prairie, protein, fibers, digestibility, efficient use of nutrients.

Contenido

Introducción 1
1. Planteamiento del problema 3
2. Pregunta de investigación 3
3. Objetivo general 4
3.1. Objetivos específicos 4
4. Marco teórico conceptual 5
4.1. Características generales del área de influencia y producción lechera del municipio de Guatativa 5
4.2. Caracterización de pastos y forrajes de la zona de estudio 6
4.2.1. Kikuyo (*Pennisetum clandestinum)* 6
4.2.2. Ryegrass (*Lolium perenne)* 8
4.2.3. Falsa Poa (*Holcus lanatus)* 8
4.2.4. Trébol blanco (*Trifolium repens)* 8
4.2.5. Carretón (*Trifolium pratense L)* 9
4.2.6. Lotus (*Lotus uliginosus)* 10
4.2.7. Azul orchoro (*Dactylis glomerata)* 10
4.3. Componentes del valor nutritivo de los pastos 11
4.3.1. Composición química 12
4.3.2. Proteína cruda (PC) 12
4.3.3. Carbohidratos 14
4.3.4. Lignina 15
4.3.5. Digestibilidad 16
4.3.6. Otros componentes 16
4.4. Factores que influyen en la calidad nutricional de los pastos y forrajes 17
4.4.1. Factores genéticos 18
4.4.2. Factores fisiológicos de los pastos 20
4.4.3. Factores morfológicos 20

4.4.4. Factores ambientales ... 20
4.4.5. Suelo ... 22
4.4.6. Manejo agronómico de la pradera ... 22
4.5. Funciones de los nutrientes en las praderas ... 22
4.5.1. Absorción de nutrientes en pastos ... 24
4.5.2. Nitrógeno (N) ... 25
4.5.3. Fósforo ... 27
4.5.4. Potasio (K) ... 30
4.5.5. Calcio (Ca) ... 31
4.5.6. Magnesio (Mg) ... 33
4.5.7. Azufre (S) ... 34
4.5.8. Hierro (Fe) ... 36
4.5.9. Boro ... 37
4.5.10. Cobre (Cu) ... 38
4.5.11. Manganeso (Mn) ... 38
4.5.12. Zinc (Zn) ... 39
5. Requerimientos nutricionales de las praderas de clima frío ... 40
5.1.1. Efecto de la fertilización en la producción de forraje ... 41
5.1.2. Efecto de la fertilización en la calidad del forraje ... 41
5.1.3. Métodos y épocas de aplicación de los fertilizantes ... 43
5.1.4. Fuentes y costos de fertilizantes ... 45
5.1.5. Encalado ... 47
6. Materiales y métodos ... 50
6.1. Características de las unidades productivas evaluadas ... 51
6.2. Características de los suelos ... 52
6.3. Diseño experimental ... 53
6.3.1. Microorganismos del suelo ... 55
6.3.2. Rendimiento en materia seca ... 56
6.3.3. Composición forrajera ... 57
6.3.4. Eficiencia en el uso de nutrientes ... 57
6.3.5. Eficiencia agronómica ... 57
6.3.6. Punto adecuado de pastoreo ... 58
6.4. Análisis estadístico utilizado ... 58
7. Resultados ... 61
7.1. Rendimiento de materia seca ... 61

7.2. Microorganismos del suelo 65
7.3. Composición forrajera 67
7.3.1. Proteína 71
7.3.2. Digestibilidad 72
7.3.4. Fibras FDN y FDA 75
7.3.5. Eficiencia en el uso de nutrientes 77
8. Conclusiones y recomendaciones 79
Bibliografía 82

Lista de figuras

Figura 1. Factores que afectan el valor nutritivo de las pasturas. 18
Figura 2. Ubicación parcelas de investigación Guatavita Cundinamarca. Mapa de Google Earth, Europa technologies, 2017. Derechos de autor (2016) de Google 52
Figura 3. Rendimiento de la materia seca (RMS) kg/ha para un ciclo de 60 días de época lluviosa. 64
Figura 4. Grupos de microorganismos presentes en el suelo para los cuatro tratamientos de fertilización implementados. 66
Figura 5. Comportamiento de la proteína del forraje para los tratamientos evaluados. 72
Figura 6. Comportamiento de la digestibilidad del forraje con los diferentes tratamientos de fertilización en diferentes estadios de corte. 73
Figura 7. Momento óptimo de cosecha utilizando la relación entre digestibilidad del forraje y producción de materia seca. 75
Figura 8. Comportamiento de la digestibilidad del forraje con los diferentes tratamientos de fertilización en diferentes estadios de corte. 76
Figura 9. Comportamiento de la FDA del forraje con los diferentes tratamientos de fertilización en diferentes estadios de corte. 76

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Inventario de bovinos para el municipio de Guatavita Cundinamarca año 2013 5

Tabla 2. Producción de leche (litros/día) de acuerdo con el tipo de lechería del municipio de Guatavita, Cundinamarca..... 6

Tabla 3. Contenidos bromatológicos de los pastos presentes en Guatavita Cundinamarca 12

Tabla 4. Elementos esenciales para el crecimiento de las plantas 23

Tabla 5. Fertilizantes nitrogenados utilizados en fertilización de praderas..... 25

Tabla 6.Características de una solución saturada de fertilizantes fosfatados 29

Tabla 7. Requerimientos de macronutrientes y nutrientes secundario para pastos seleccionados expresados en kg/ha año 40

Tabla 8. Requerimientos de micronutrientes para trébol rojo y gramíneas expresados en g/ton materia seca 40

Tabla 9. Composición y precio de fertilizantes utilizado en nutrición de praderas en Colombia 45

Tabla 10. Composición y precio de materiales encalantes utilizados en la corrección de acidez 49

Tabla 11. Área de las unidades productivas evaluadas 51

Tabla 12. Fertilización aplicada en cada unidad productiva para un pastoreo, dependiendo de los tratamientos y de los análisis fisicoquímicos de suelos kg/ha 54

Tabla 13. aporte de nutrientes de la fertilización aportada en cada tratamiento y en cada una de las unidades productivas 54

Tabla 14. características del fertilizante orgánico utilizado en los tratamientos ... 55

Tabla 15. Resultados de análisis fisicoquímico de suelos..... 61

Tabla 16. Producción inicial de materia seca en las parcelas de las fincas evaluadas..... 63

Tabla 17. Análisis estadístico para la variable materia seca en forraje. 64

Tabla 18. Porcentaje de composición de especies presentes en las parcelas estudiadas dentro de las cuatro unidades productivas seleccionadas 67
Tabla 19. Cálculo de índice de Shannon y Simpson de diversidad y dominancia 68
Tabla 20. Índice de similitud de Jaccad..... 68
Tabla 21. Porcentaje promedio de cobertura de leguminosas al final del ensayo para cada tratamiento 70
Tabla 22. Cantidad de materia seca producida kg/ha con la aplicación de en kg/ha de NPK para cada tratamiento 77
Tabla 23. Balance parcial de nitrógeno para cada tratamiento evaluado a los 60 días 78

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AGV	Ácidos grasos volátiles
BPN	Balance parcial de nutrientes
CC	Contenidos celulares
CE	Carbohidratos estructurales
CMS	Consumo de materia seca
CNE	Carbohidratos no estructurales
Cooprolag	Cooperativa de lecheros de Potrero Largo
DA	Digestibilidad aparente de la materia seca
DAP	Fosfato di amónico
dFDA	Digestibilidad de la fibra en detergente ácido
dFDN	Digestibilidad de la fibra en detergente neutro
DMI	Consumo voluntario
EA	Eficiencia agronómica
EN	Energía neta
Eng	Energía en ganancia de peso
ENl	Energía en producción de leche
ENm	Energía de mantenimiento
ER	Eficiencia de recuperación
EUN	Eficiencia del uso de nutrientes
FDA	Fibra de detergente ácido
FDN	Fibra en detergente neutrón
LDA	Lignina de detergente ácido

Abreviatura	Término
MAP	Fosfato monoamónico
MS	Materia seca
NDT	Nutrientes digestibles totales
NNP	Nitrógeno no proteico
PC	Proteína cruda
UFC	Unidades formadoras de colonia

Introducción

El municipio de Guatavita Cundinamarca se encuentra dentro de la zona agroecológica del trópico alto andino colombiano, las condiciones climáticas de esta zona del país favorecen la producción de leche. Las principales especies de pastos presentes en la zona para la producción de leche son: 80 % kikuyo (*Pennisetum clandestinum)*, y 20% distribuidos en Ryegrass (*Lolium* spp.), azul orchoro (*Dactylis glomerata*), falsa poa (*Holcus lanatus*), tréboles (*Trifolium* spp*.)* y alfalfa (*Medicago sativa*) (CAR, 2006).

Dentro de los grandes problemas que presenta la producción lechera de la zona, se resalta la estacionalidad de la producción de pastos y forrajes, ya que los largos periodos de sequías disminuyen su disponibilidad e incrementan el uso de suplementos para los animales. Adicionalmente, la región presenta un periodo de heladas que inician desde el mes de diciembre y se prolongan hasta el mes de febrero, lo cual dificulta la continuidad, estabilidad en la producción y calidad de los forrajes (Chamorro y Rey, 2010).

Para el ganado de leche, la mejor fuente de nutrientes es el forraje, ya que se adapta a sus necesidades fisiológicas. Sin embargo, su composición, producción y calidad se afecta por las condiciones climáticas, condiciones desuelo y por el manejo agronómico que se le aplique (Díaz, 2001).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante generar estrategias de manejo de fertilización de praderas que permitan a los productores de leche generar un volumen de biomasa abundante de pastos y forrajes de excelente calidad, el cual necesariamente ha de convertirse en la fuente principal de obtención de leche y carne para la alimentación humana (Castro *et al*., 2008).

Los suelos de la región contienen los nutrientes necesarios para el desarrollo de las praderas, sin embargo, las condiciones del suelo, como la acidez, pH, saturación de aluminio, capacidad de intercambio catiónico, la formación de complejos insolubles de fósforo con aluminio y hierro, la baja saturación de bases y altas concentraciones de hierro, impiden que los nutrientes sean absorbidos por las plantas (Bernal, 2003).

La fertilización de los pastos y forrajes es el factor de mayor influencia en la producción de biomasa de calidad, la falta de un buen programa de fertilización limita los sistemas de

producción por diversos factores, uno de ellos es la baja calidad nutricional del forraje, sumado a factores de manejo y alimentación inadecuados, seguido por deficiencias en el consumo de agua y problemas de salud ruminal, lo que conllevan a ineficientes sistemas de producción (Buelvas, 2009).

En Colombia, la producción de pastos y forrajes no representa un cultivo para los productores, por tanto, no se le proporciona el manejo adecuado de suelos y fertilización. Por esta razón, es importante brindarles a los productores soportes técnicos y científicos para buscar un balance en la utilización de fertilizantes químicos, abonos orgánicos y abonos verdes, además de garantizar las condiciones físicas y microbiológicas que permitan mejorar dicha producción (Mejía y Ochoa, 2014).

De acuerdo con lo anterior, es importante establecer e implementar un manejo de suelos para praderas que incluya el manejo adecuado de la fertilización, retención de humedad y mecanización que permitan determinar el momento indicado de cosecha para las especies de pastos cultivadas, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona.

Con base en lo anterior el objetivo principal de este estudio fue determinar el efecto de la fertilización química y orgánica sobre la calidad y producción de forrajes en fincas de pequeños productores lecheros del municipio de Guatavita en Cundinamarca. Con esta implementación de manejo de suelos se busca aumentar la calidad de los pastos y forrajes en la zona, con el fin de realizar un manejo sostenible.

1. Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas de los sistemas lecheros de la zona está relacionado con el inadecuado manejo de la alimentación de los animales, que abarca praderas, consumo voluntario y suplementación. En este sentido, aunque la alimentación constituye un porcentaje importante de los costos de producción, resulta insuficiente para llenar los requerimientos nutricionales de los animales debido al manejo deficiente que se realiza a las praderas.

La actividad lechera de la zona puede llegar a ser insostenible y poco competitiva, ya que los costos unitarios de producción de la leche en los últimos años han sufrido incrementos dramáticos, los cuales están asociados con el uso de insumos agrícolas, especialmente fertilizantes nitrogenados (FAO, 2013).

Las praderas son la base de la alimentación para la mayoría de los sistemas de producción de leche en la región. De acuerdo con el tipo de productor y de las tecnologías y manejo que implemente en su sistema, pueden presentarse deficiencias nutricionales para el animal, ya que los forrajes de la zona se caracterizan por su alto contenido de fibra, lo cual está determinado por los largos periodos de rotación (mayor a 90 días), bajos niveles de nitrógeno, carbohidratos solubles, desequilibrios minerales, mal manejo de suelos y de la fertilización, sumado a las variables climáticas y biofísicas (Romero y Márquez, 2002). Estos desequilibrios hacen necesario desarrollar e implementar nuevas técnicas basadas en el uso adecuado de los forrajes para corregir las deficiencias de nutrientes y en mejorar los niveles de producción bovina (Romero y Márquez, 2002).

2. Pregunta de investigación

¿Qué efecto tiene reemplazar una proporción de fertilizantes químicos por fertilizantes orgánicos sobre la producción y calidad de los pastos en una región productora de leche en el municipio de Guatavita Cundinamarca?

3. Objetivo general

Evaluar el efecto de la combinación de cuatro niveles de fertilización orgánica y química sobre la producción y calidad de pastos en suelos ácidos del municipio de Guatavita, Cundinamarca.

3.1. Objetivos específicos

- Establecer el nivel de fertilización química y orgánica con la cual se obtienen los mejores rendimientos y calidad de los pastos.
- Determinar el contenido nutricional, curva de crecimiento y producción de biomasa de las praderas evaluadas.
- Definir el punto óptimo de pastoreo para esa zona a partir de las características bromatológicas de las praderas.

4. Marco teórico conceptual

4.1. Características generales del área de influencia y producción lechera del municipio de Guatavita

De acuerdo con estudios realizado por Boada (2011), para el municipio de Guatavita y sus alrededores, la distribución de la precipitación a través del año presenta un periodo lluvioso extenso que inicia en el mes de abril y se extiende hasta el mes de octubre, sus mayores valores se han reportado en los meses de junio y julio (139 y 146 milímetros, respectivamente). El periodo seco o de baja intensidad de lluvias inicia en el mes de noviembre y va hasta marzo. Se reportan los menores registros en diciembre y enero (21 y 16 mm, respectivamente). El valor total anual promedio es de 625 mm al año para este municipio.

De igual forma, el mismo estudio reporta que la temperatura media sobre los 2700 msnm está alrededor de los 12 °C, hay una temperatura mínima media de 7,7 °C con valores mínimos extremos de entre –3 °C y –5°C en los meses de enero y febrero.

La producción de leche en la zona ha crecido en los últimos años, sustituyendo cultivos de papa. De acuerdo con los datos del censo agropecuario de la Gobernación de Cundinamarca (2014), el inventario de bovinos de Guatavita para el año 2013 se relaciona en la tabla 1:

Tabla 1. Inventario de bovinos para el municipio de Guatavita Cundinamarca año 2013

Total de machos	Total hembras	Total bovinos
Número de animales		
1990	7560	9550

Fuente: Estadísticas de la Gobernación de Cundinamarca2011-2013 (2014).

Como información complementaria, en este mismo informe de la Gobernación de Cundinamarca se indica que el porcentaje de orientación bovina a producción de leche fue del 70 %, la raza predominante de animales es Holstein y existían 1220 granjas lecheras en el municipio en el año 2013.

La producción tradicional de pequeños productores tiene unos rendimientos de leche más bajos que la lechería especializada, tal como se indica en la tabla 2.

Tabla 2**.** Producción de leche (litros/día) de acuerdo con el tipo de lechería del municipio de Guatavita, Cundinamarca

Lechería tradicional			**Lechería especializada**		
Vacas para ordeño	Producción por vaca (litros/día)	Producción total (litro/día)	Vacas para ordeño	Producción por vaca (litros/día)	Producción Total (litro/día)
3122	10	31 220	446	18	8028

Fuente: Estadísticas Gobernación de Cundinamarca (2014).

4.2. Caracterización de pastos y forrajes de la zona de estudio

Como se dijo anteriormente las especies de pastos que predominan en Guatavita y sus alrededores para la producción de leche son: en un 80 % kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y en menor proporción ryegrasses *(Lolium*spp.), avena (*Avena sativa*), azul orchoro (*Dactylis glomerata*), falsa poa (*Holcus lanatus*), tréboles (*Trifolium* spp.) y alfalfa (*Medicago sativa*) (CAR, 2006).

4.2.1. Kikuyo (*Pennisetum clandestinum)*

Es una gramínea perenne de origen africano, es la gramínea más común y mejor adaptada de climas fríos. Se encuentra en altitudes que varían entre 1700 y 2800 msnm, es poco

exigente en agua y fertilizantes, tolera sequías, pero es susceptible a las heladas (Cárdenas, 2005).

Este pasto es rizomatoso, forma un follaje compacto y bajo. Los rizomas llegan a medir hasta de cinco metros de largo, las inflorescencias crecen en las axilas de las hojas, las espiguillas tienen dos flores, una inferior y estéril, la superior fértil, en la cual se observan los filamentos de los estambres que pueden llegar a medir cinco centímetros de largo (León, 2000).

Según (Correa *et al, 2008),* la proteína cruda (PC) en kikuyo es en promedio de 20,5 %, lo cual coincide con lo encontrado por Naranjo (2002). Sin embargo, para el departamento de Nariño, Apráez y Moncayo (2000) encontraron un contenido de proteína para kikuyo de (11,4 % a 15,8 %). A su vez, León *et al.,* (2007) en Cundinamarca, encontraron que el contenido de PC promedio para kikuyo fue de (22,9 %). Para los departamentos de Antioquia y Cundinamarca, los promedios reportados para PC son un poco más altos que lo requerido para vacas Holstein de alta producción al inicio de la lactancia (NRC, 2001), Sin embargo, el alto contenido de proteína en este pasto es posible solo si se aplican intensos programas de fertilización nitrogenada (Carulla, 1999; Rodríguez, 1999).

El kikuyo puede llegar a producir grandes cantidades de materia seca durante un año, sin embargo, sus parámetros de calidad están directamente relacionados con el manejo de la fertilización, por lo cual, para los pequeños productores es frecuente encontrar pastos con bajos niveles de carbohidratos solubles y proteína cruda, altos niveles de fibra y lignina, lo cual influyen en el consumo en pastoreo, la digestibilidad del forraje y el comportamiento de los animales (Carpenter,1999).

Las condiciones ambientales también influyen directamente sobre la calidad de los pastos. Los factores como el tipo de suelo, altura sobre el nivel del mar, pH del suelo, fertilidad, temperatura ambiente, precipitación y radiación solar pueden afectar los parámetros de calidad de los forrajes (Carpenter, 1999).

El kikuyo (*Pennisetum clandestinum Hoechst Ex Chiov*) es la base de la alimentación de los sistemas de producción lechera especializada en Colombia (Escobar y Carulla 2003), debido a que este pasto presenta un hábito de crecimiento rápido que lo hace muy competitivo y agresivo ante otras especies (Fukumoto y Lee, 2003). Además, es muy

resistente al pisoteo y responde muy bien a la fertilización orgánica y química (Mila y Corredor 2004).

4.2.2. Ryegrass (*Lolium perenne)*

El pasto ryegrass perenne se distribuye entre los 1800 y 3600 msnm. Por encima de los 3000 msnm su crecimiento disminuye y se deben prolongarlos períodos de recuperación entre 2 y 4 semanas (Oregon State University, 1999). Las condiciones de suelo para el adecuado desarrollo de este pasto deben ser de media a alta fertilidad, con un drenaje adecuado y pH superior a 5,5. Es exigente a la nutrición de nitrógeno, fósforo y potasio (Oregon State University, 1999). En condiciones de baja disponibilidad de fósforo, la producción de materia seca se limita ya que este nutriente es necesario para el rebrote y su deficiencia reduce la extracción y translocación de nitratos (NO_3) de las raíces a la parte superior de la planta (Kim *et al*., 2003).

4.2.3. Falsa Poa (*Holcus lanatus)*

Esta especie está ampliamente distribuida en Asia, África y América, es de origen europeo, de climas moderados, es resistente a heladas, no es exigente en pH, ni en nutrientes de suelo, por lo tanto, crece muy bien en suelos con baja fertilidad, frescos y con buena humedad (Ramírez *et al*., 1991).

Muñoz (1980) describe esta especie como una gramínea perenne, de 60 a 80 cm de alto, de hojas laminadas planas, de 3 a 12 cm de largo por 3 a 10 mm de ancho. Según Balocchi y López (1996), *Holcus lanatus* presenta mayores rendimientos de materia seca si se compara con otras especies como *Agrostis capillaris* y *Dactylis glomerata*. Produce entre 8600 y 8900 kg MS/ha/año), el contenido de proteína para esta especie varía entre un 13 y 19 %, mientras que la digestibilidad presenta valores entre un 58 y 68 %.

4.2.4. Trébol blanco (*Trifolium repens)*

La migración de los animales a través de Europa y Asia propagó el trébol blanco. Las zonas en donde más se cultiva el trébol blanco son Europa Occidental, América, Australia y

Nueva Zelanda. Luego de su introducción en el Ecuador a finales del siglo XIX, se ha adaptado de manera que se encuentra en casi todos los ecosistemas de la Sierra en la forma de un trébol de poco desarrollo (Paladines *et al.,* 2003).

El trébol blanco es una leguminosa considerada como la mejor adaptada al pastoreo en las zonas templadas del planeta. El trébol blanco usualmente no se siembra como cultivo puro, ya que en estas condiciones otras especies, principalmente gramíneas, son más competitivas y de crecimiento más rápido. Además, se ven estimuladas por el nitrógeno fijado por la leguminosa, lo que genera mayor competencia y reducción en el crecimiento de las leguminosas (Paladines *et al.*, 2003).

El trébol blanco es una planta perenne de 10-50 cm de altura, tallos rastreros y enraizantes, hojas trifoliadas, foliolos obovados, denticulados, a menudo con una mancha blanca en el haz y flores con corola blanca o rosada. Presentan una pequeña bráctea en su base, flores agrupadas en cabezuelas globosas, pedunculadas (Benito *et al*., 2000).

4.2.5. Carretón (*Trifolium pratense L)*

El trébol rojo *Trifolium pratense L* es una leguminosa herbácea de polinización cruzada, cosmopolita. Está presente en el Norte de África, Europa, Asia y América (Correa, 2006). El trébol rojo presenta un crecimiento rápido y una muy buena capacidad para fijar nitrógeno atmosférico debido a la asociación con bacterias nitrificantes del género *Rhizobium*, *Agrobacterium, Bacillus y Curtubactrium* (Sturz *et al*., 1997).

En Colombia se conoce con el nombre de *carretón* y se distribuye en zonas ubicadas a más de 1800 msnm y se utiliza para alimentación animal por su aporte de proteínas y minerales (Correa, 2006).

El carretón es una planta perenne de 10 a 60 cm, de pilosidad variable, tallos erectos o ascendentes, hojas trifoliadas con foliolos ovales, flores con corolas rosadas o purpúreas, membranosas en la fructificación, agrupadas en cabezuelas globosas, sésiles, cubiertas en su base por las estípulas de las hojas superiores (Chiapusio *et al.*, 2007).

Es tolerante al frío, pero no es muy resistente a la sequía, prefiere suelos profundos y con buena concentración de bases, buen contenido de humedad y buen drenaje. Tolera

texturas arcillosas, ya que no requiere gran profundidad de suelo, no tolera encharcamientos ni excesos de humedad (Chiapusio*et al.*, 2007).

4.2.6. Lotus (*Lotus uliginosus)*

El *Lotus uliginosus* es una leguminosa perenne que está presente en regiones templadas de Europa, Asia, Norte de África, Australia, Norte y Suramérica.Tolerasuelos ácidos, sequía y baja concentración de nutrientes (Seaney y Henson, 1970). El promedio anual de precipitación para el óptimo crecimiento de esta leguminosa es de 1000 mm (Ayres *et al.,* 2006).

El lotus crece al ras del suelo con tallos de 50 a 100 cm, la raíz principal crece profunda en el suelo y se ramifica, es tolerante a suelos salinos y con mal drenaje y se desempeña mejor bajo altas presiones de pastoreo (Miller *et al.,* 2001).

El Lotus es resistente al ataque de insectos o enfermedades, ya que produce una serie de sustancias hormónales y metabolitos secundarios como los terpenos, polifenoles (taninos condensados) o esteroides, los cuales son almacenados en las vacuolas de las células vegetales de la planta y son utilizados como mecanismos de defensa ante posibles patógenos (Murillo, 2003).

En condiciones de campo, En términos generales la tasa de fijación de nitrógeno para el *Lotus uliginosus* puede variar entre 90 y 224 kg N/ha/año (Cárdenas, 2003). Esto coincide con lo encontrado por Castro y Cárdenas (2008), quienes determinaron que el Lotus presenta valores promedio de fijación de nitrógeno de 90 a 224 kg de N/ha/año.

4.2.7. Azul orchoro (*Dactylis glomerata)*

Es originario de Eurasia y el norte de África. Es perenne, crece en macollas distribuidas en las praderas, posee gran cantidad de tallos florales que alcanzan hasta 1,3 metros de largos, hojas plegadas y vainas comprimidas. Su inflorescencia sobresale por encima de los demás tallos en forma de racimos de espiguillas, sus raíces penetran el suelo a

bastante profundidad, por lo cual son tolerantes a largos periodos de sequía (Peng *et al*., 2008; Xie *et al*., 2010).

Esta gramínea se adapta a diferentes condiciones climáticas, se presenta en alturas entre 1500 y 3100 msnm. En alturas mayores crece bien, pero su desarrollo es muy lento, presenta una óptima producción en casi todo tipo de suelos, pero sus rendimientos son mucho mayores en suelos fértiles, profundos y bien drenados. Bajo estas condiciones, su crecimiento es muy rápido y sus propiedades bromatológicas son muy apetecibles para el ganado. Debido a que presenta características de alto rendimiento, calidad nutricional y tolerancia a la sombra, es una especie que se ha utilizado como forraje desde hace más de 100 años (Casler *et al*., 2000).

4.3. Componentes del valor nutritivo de los pastos

El valor nutritivo de un pasto hace referencia a la capacidad de los forrajes para producir leche o carne, puede variar dependiendo de la especie, madurez de la planta, altitud en la que se encuentre y del manejo. Se puede expresar en términos de consumo, digestibilidad y la eficiencia con que los nutrientes son usados por el animal. Este valor nutricional del forraje es expresado en su mayor potencial solo cuando no hay limitaciones en la oferta forrajera (Carulla *et al.,* 2004*).*

Aproximadamente el 70 % de las variaciones en la producción animal en pastoreo se pueden explicar por la variación en el consumo. El consumo depende de la oferta forrajera y de la calidad del forraje, particularmente por las concentraciones de fibra. Las deficiencias nutricionales (proteína y minerales) pueden limitar también el consumo (Carulla *et al.,* 2004).

De acuerdo con lo descrito por Carulla *et al*. (2004), la digestibilidad es la proporción de un alimento que es absorbido en el tracto intestinal del animal, está relacionado con la cantidad y el valor energético efectivo del alimento que realmente utiliza el animal. El componente que tiene mayor influencia en la digestibilidad y el consumo es la pared celular, ya que estos dos factores disminuyen al aumentar la pared celular en un forraje, esto se debe a que los nutrientes más digestibles, como proteínas, azúcares y lípidos, se

encuentran en el contenido celular y los menos digeribles, como celulosa, hemicelulosa y lignina, se encuentran en la pared celular. Este parámetro se determina por el método de fibra en detergente neutro (FDN).

4.3.1. Composición química

La proporción de cada uno de los nutrientes presentes en las plantas, así como los posibles factores que pueden afectar su disponibilidad se denomina *composición química*, la cual es expresada comúnmente como porcentaje de la materia seca (Huhtanen *et al*., 2008; Decruyenaere *et al*., 2009). Los rangos de los principales componentes nutricionales hallados en las pasturas se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Contenidos bromatológicos de los pastos presentes en Guatavita Cundinamarca

Componentes de las pasturas	*Ryegrass (Lolium perenne)*	*Kikuyo (Penisetum clandestinum)*	*Falsa Poa (Holculs lanatus)*	*Trébol rojo (Trifolium pratense)*	*Trébol blanco (Trifolium repens)*	*Azul orchoro (Dactylus glomerata)*	*Lotus (Lotus uliginosus)*
				(%)			
Proteína cruda	18,3	20,5	13,4	31,2	30,2	10,2	32,5
Fibra en detergente ácido	27	30,3	28,1	20,1	19,6	36,4	2,1
Fibra en detergente neutro	40,8	66,9	-	39,5	40,2	66,7	34,6
Carbohidratos no estructurales	18,2	13,4	-	20,5	23,8	-	22,7
Lignina	3,2	2,5		2,5	2,7	-	6,5
Extracto etéreo	4,7	3,64	4,75	5,9	5.5	-	2,2
Cenizas	8,4	10,6	8,3	8,6	8,6	-	9,3

Fuente: *Cardona et al.* (2002) y Posada *et al*. (2013)

4.3.2. Proteína cruda (PC)

A nivel elemental, las proteínas contienen 50-55 % de carbono, 6-7 % de hidrógeno, 20-23 % de oxígeno, 12-19 % de nitrógeno y 0,2-3,0 % de azufre, son moléculas muy complejas que están presentes en todas las células vivas y están formadas hasta por 20 aminoácidos diferentes (Damodaran, 2000).

En la alimentación de rumiantes las proteínas son nutrientes vitales utilizados por los animales en funciones de mantenimiento, reproducción, crecimiento y lactación, sin embargo, el contenido de proteína en las pasturas se puede afectar por factores climáticos, la especie, el manejo, entre otros. Por esta razón, cuando hay una exigencia nutricional muy alta, el flujo de proteína microbiana al intestino puede no ser suficiente, por lo cual este requerimiento debe ser cubierto con proteína de la dieta que no se afecte por la degradación ruminal.

La proteína cruda (PC) es calculada a partir del contenido de nitrógeno total de un forraje por el factor 6,25, debido a que las proteínas en promedio tienen 16 % de nitrógeno. La proteína cruda se obtiene por el método Kjeldahl, el cual determina la proteína verdadera y otros compuestos nitrogenados no proteicos (Association Of Official Agricultural Chemists, 1984).

Los rumiantes son capaces de utilizar nitrógeno no proteico para suplir sus requerimientos de proteína, sintetizando proteína microbiana en el rumen, por lo que el parámetro de proteína cruda es un indicador muy importante. Sin embargo, PC no brinda información ni de la proporción de proteína verdadera y nitrógeno no proteico de un alimento, ni de su degradabilidad ruminal (Mieres, 2004).

El consumo se limita cuando la proteína de los forrajes se encuentra por debajo del 7 % en base seca, ya que este nivel es considerado como el mínimo para generar un balance positivo de nitrógeno (Minson y Milford, 1967).

Carulla *et al.,* (2004) encontraron que las concentraciones de proteína en pasto kikuyo varían dependiendo del manejo realizado a la pradera; se hallan valores desde12 % de hasta valores de 28 % de PC. Adicionalmente, determinaron que la fertilización nitrogenada y la madurez del forraje influyen en los niveles de proteína reportada, encontraron también una estrecha relación entre la cantidad de fibra y los niveles de proteína en el forraje, reportan que el incremento de los niveles de proteína aumenta su porción soluble y esta fracción, en su mayoría, es nitrógeno no proteico. Por el contrario, la fracción no digerible de la proteína, que es el nitrógeno ligado a la fibra en detergente ácido, crece con la madurez del forraje. También observaron que a los animales a los que se les proporcionó pasto kikuyo con proteína entre 12 y 14 % tenían bajos niveles de

nitrógeno ureico en leche, lo cual podría ocasionar deficiencias de N degradable que restringiría la actividad microbial en el rumen. Sin embargo, un excesivo aporte de proteína produce excesos de N ureico en leche con consecuencias negativas para el animal, tanto productivas como reproductivas (Abreu y Petri, 1998).

4.3.3. Carbohidratos

De acuerdo con Wattiaux y Armentano (2002), los carbohidratos son la principal fuente de energía para los rumiantes, ya que pueden representar entre 45-80 % de la materia seca. Dependiendo de su función dentro de la planta se clasifican como estructurales y no estructurales.

La producción y el rendimiento de un rumiante está determinado en gran medida por el tipo y cantidad de carbohidratos que consume. Los carbohidratos estructurales conforman gran parte de la pared celular, permiten a las células tolerar cambios en la presión osmótica entre los espacios intra y extracelulares (Wattiaux y Armentano, 2002).

Los carbohidratos no estructurales (CNE)contienen los azúcares simples y complejos que participan en el metabolismo o son almacenados, de manera que son completamente aprovechados por los microorganismos y enzimas del aparato digestivo del animal (Wattiaux y Armentano, 2002).

Algunos órganos vegetales como rizomas, estolones y raíces sirven de almacenamiento de los carbohidratos no estructurales. Estos pueden ser convertidos en compuestos más simples que luego se translocan a los puntos de crecimiento. En los primeros estadios de crecimiento del pasto, sirven como fuente de nutrientes y energía al rebrote, ya que en esta etapa las plantas carecen de hojas y, por lo tanto, no pueden realizar fotosíntesis. Esto hace que dependan de los carbohidratos almacenados en los órganos fuente.

Los CNE están conformados por azúcares solubles e insolubles, los primeros consisten principalmente en monosacáridos como glucosa y fructosa, disacáridos como sacarosa y maltosa, y polisacáridos como almidones y fructosas (Smith 1973).

Algunos autores señalan que los principales azúcares solubles del pasto kikuyo son sacarosa y pequeñas cantidades de glucosa y fructosa (Marais, 2001; Muscolo *et a*l.,2003).

De manera similar, Fulkerson *et al*. (1999) reportan que más del 50 % de los CNE en el pasto kikuyo son almidones y el restante son azúcares solubles. Por el contrario (Kaiser *et al.,* 2001), encontró que cerca del 55 % de los CNE en el pasto kikuyo correspondieron a los carbohidratos solubles, cuya concentración era más alta en las horas de la tarde.

El pasto kikuyo presenta menores concentraciones de carbohidratos no estructurales en comparación con pastos como Ryegrass o algunos pastos tropicales. Algunos autores como Marais (2001) han encontrado contenidos de CNE en kikuyo entre 2,74 y 11,3 % de la MS. Los valores encontrados por Kaiser *et a*l. (2001) oscilan entre 8,7 y 12,4 % de la MS. Miles *et al.* (2000) reportan valores desde 1,04 hasta 9,18 % de la MS. Watts (2005) encontró que en *Lolium perenne*, var. Blend valores que oscilaron entre 27,3 y 33,1 % de la MS. Juárez *et al.* (1999), por su parte, encontró concentraciones de CNE de15,4 % en *Digitaria decumbens* valores de 22,3 % de la MS para *Panicum máximum var.*

4.3.4. Lignina

Es un compuesto complejo que no puede ser digerible por los microorganismos o enzimas ruminales, está presente en la pared celular de los tejidos vegetales y es el polímero orgánico más abundante en el reino vegetal. En los pastos, su contenido se incrementa con la madurez, lo que genera digestión incompleta de la celulosa y la hemicelulosa en los animales, por esta razón la lignina puede ser el factor más limitante en la digestibilidad de los forrajes (Jung y Vogel, 1986; Van Soest, 1994).

Aunque algunos estudios han demostrado que el contenido de lignina en el pasto kikuyo se incrementa con la edad del pasto (Kamstra*et a*l., 1966), posteriores estudios reportan que la lignina no se modifica significativamente debido a que su hábito de crecimiento mantiene la relación tallo-hoja constante, lo que impide que cambie sustancialmente su composición química (Zapata, 2000; Soto *et a*l., 2005; Caro y Correa, 2006).

El contenido de lignina tiene una relación inversa con la digestibilidad de la materia seca y con la disponibilidad de energía de los forrajes (Van Soest, 1994; Ralph, 1996). En los estudios realizados por Caro y Correa (2006) se observó una correlación negativa entre la lignina y la digestibilidad de la MS (r = -0.25). En otro estudio llevado a cabo por Soto *et a*l.

(1980), se reporta una correlación negativa más alta entre la digestibilidad in vivo de la MS y la concentración de lignina en el pasto kikuyo (r = –0,948).

4.3.5. Digestibilidad

De acuerdo con lo descrito por Carulla *et al*. (2004), la digestibilidad es la proporción de un alimento que es absorbido en el tracto intestinal del animal, está relacionado con la cantidad y el valor energético efectivo del alimento que realmente utiliza el animal. El componente que tiene mayor influencia en la digestibilidad y el consumo es la pared celular, ya que estos dos factores disminuyen al aumentar la pared celular en un forraje. Esto se debe a que los nutrientes más digestibles, como proteínas, azúcares y lípidos, se encuentran en el contenido celular y los menos digeribles, como celulosa, hemicelulosa y lignina, se encuentran en la pared celular. Este parámetro se determina por el método de fibra en detergente neutro (FDN).

4.3.6. Otros componentes

Extracto etéreo: en los pastos, los lípidos son una pequeña fracción que no varía considerablemente. Es un grupo de diversos compuestos, como galactolípidos y los fosfolípidos. De estos, los ácidos grasos más relevantes son el ácido linolénico, ácido linoleico y ácido palmítico.

Cenizas totales: residuo inorgánico que resulta de la calcinación de la materia orgánica. Las cenizas no representan todas las sustancias inorgánicas presentes en el forraje original debido a que se presentan pérdidas por volatilización o por las diferentes interacciones químicas entre los demás componentes de químicos del forraje (Pearson, 1993).

Energía: los datos de energía bruta o energía total no aportan mucha información para determinar el valor nutritivo de los forrajes. La energía neta es la realmente disponible para el animal después de descartar la energía perdida por materia fecal, orina, gas y calor producido en la digestión y metabolismo. Existen tres fracciones de la energía: energía de mantenimiento (ENm), para ganancia de peso (ENg) o para producción leche (ENl) (Ronnenkamp y Hay, 2011).

El uso de nitrógeno en las pasturas aumenta la producción de biomasa y el contenido de proteína de los forrajes. Sin embargo, esto no siempre mejora su calidad debido a que la energía presente en los glucósidos disminuye. Igualmente, el uso de altas cantidades de nitrógeno combinado con incrementos de temperatura ambiental generala metabolización de los nitratos. Si adicionalmente existe mucha luminosidad, los glucósidos se metabolizan y se fijan en las estructuras de la planta, de esta manera la planta crece mucho más y forma un mayor número de estructuras, lo que directamente aumenta el contenido de lignina. No obstante, de este componente no se obtiene energía (Van Soest *et al.,* 1978).

Consumo voluntario: es una actividad de comportamiento representada por la ingesta de alimentos por un animal en un periodo determinado. El factor de mayor relevancia en la producción de leche y en el estado corporal de los animales es el consumo voluntario de materia seca (DMI), ya que esto determina la cantidad real de nutrientes aprovechables para la producción animal (Forbes, 1986).

El pasto kikuyo, al parecer, presenta unas características que limitan el consumo de materia seca, como el alto contenido de fibra, el bajo contenido de CNE y el bajo contenido de MS (Brand *et al.,* 1999; Marais, 2001). El alto contenido de nitratos, así como el bajo contenido de azúcares, hace poco palatable este pasto (Marais, 2001, Miles *et al.,* 2000). Dugmore (1998) encontró un efecto negativo del contenido de PC y de NNP en el pasto kikuyo, sobre el CMS. Según este autor, esta reducción equivale a 0,62 % y 1,1 % por cada 1 % de incremento en el contenido de PC y NNP, respectivamente.

4.4. Factores que influyen en la calidad nutricional de los pastos y forrajes

El valor nutritivo de los pastos y forrajes varía en sus distintas etapas de crecimiento y en las diferentes fracciones de la planta, esta variación adicionalmente está determinada por las condiciones ambientales, edafológicas, material genético y manejo de las praderas (figura 1).

Figura 1. Factores que afectan el valor nutritivo de las pasturas.

Fuente: Adaptado de Trujillo y Uriarte (2003).

4.4.1. Factores genéticos

La composición química y digestibilidad de los pastos y forrajes varía entre las especies. Estas diferencias se observan cuando se comparan las gramíneas con las leguminosas, ya que se ha encontrado que las leguminosas presentan un mayor contenido de proteína y de elementos minerales que las gramíneas en un mismo estado fisiológico (Pirela, 2005).

De acuerdo con diversos estudios sobre la composición química del kikuyo, se ha reportado que contiene aproximadamente 20,5 % de proteína cruda. Osorio (1999) y Naranjo (2002) determinaron un rango entre el 11,4 a 15,8 % de PC en el departamento de Nariño y León *et al.* (2007) encontró en el departamento de Cundinamarca un 22,9 %. Para pasto Ryegrass, Villalobos y Sánchez (2010) reportaron valores de25,21 % de proteína cruda.

Según Bauchart*et al.* (1984), los ácidos grasos más abundantes para el pasto Ryegrass son el ácido palmítico y el ácido esteárico, como lo confirman Czerkawski (1967) y Elgersma *et al*. (2003). Una tendencia similar fue reportada por Wyss *et al.* (2006) en

mezclas de gramíneas solas o de gramíneas con trébol rojo, e igualmente por Clapham *et al.* (2005) en trece gramíneas forrajeras diferentes.

Los principales ácidos grasos insaturados presentes en las gramíneas son el ácido linolénicoy ácido linoléico (18:2) (Dewhurst*et al.,* 2001; French *et al.,* 2000). Esta misma es la tendencia fue hallada en las muestras de pasto kikuyo por Czerkawski (1967), Elgersma*et al.* (2003), Wyss*et al*. (2006) y Clapham *et al.* (2005). También hallaron un mayor contenido de ácido linolénico en las diferentes especies de gramíneas que fueron evaluadas.

El contenido de hemicelulosa en muestras de pasto kikuyo asciende al 26,2 % de la MS, de modo que varía en un rango que va entre 21,5 y 29,4 % de la MS (Correa *et al.,* 2008). Sin embargo, Apráez y Moncayo (2000) reportaron valores más altos que oscilan entre 30,9 y 35,7 % de la MS en el departamento de Nariño. Kamstra *et al.* (1966), por su parte, encontraron que el contenido de hemicelulosa del pasto kikuyo varió en función de la edad de rebrote: oscila entre 29,6 y 39,2 % de la MS. Estos autores estimaron, además, que un porcentaje significativo de la hemicelulosa en el pasto kikuyo está constituido por xilosa y arabinosa. La glucosa y la galactosa representan un porcentaje más bajo de la hemicelulosa en este pasto.

Diferentes autores, como Marais (2001), Kamstra *et al.* (1966), Laredo y Mendoza (1982) y Soto, *et al.* (1980), reportan que la hemicelulosa se presenta en una concentración más alta con relación a la celulosa en muestras de pasto kikuyo de Cundinamarca. Esto concuerda con lo encontrado por Brand *et al*. (1999) en Sudáfrica en pasto kikuyo manejado bajo pastoreo continuo. En pastos tropicales, tales como el *Pennisetum purpureum* Schum, el contenido de celulosa es invariablemente superior al de la hemicelulosa (Braga *et al.* 2001). Correa *et al.* (2004), al trabajar con pasto maralfalfa (*Pennisetum sp*), también encontraron que la hemicelulosa representa un porcentaje mucho menor de la FDN que la celulosa.

Marais (2001) y Muscolo *et al*. (2003) reportan que los azúcares solubles presentes en el pasto kikuyo son sacarosa con pequeñas cantidades de glucosa y fructosa. Fulkerson *et al*. (1999), por su parte, afirman que más del 50 % de los CNE en el pasto kikuyo son almidones y el restante son azúcares solubles. Kaiser *et al.* (2001) determinaron que cerca

del 55 % de los CNE en el pasto kikuyo correspondieron a los carbohidratos solubles, y estableció que este contenido se incrementaba en horas de la tarde.

4.4.2. Factores fisiológicos de los pastos

El crecimiento, estado de madurez y la edad de la planta son los factores más determinantes de la calidad nutritiva del forraje. Después de los primeros estadios de crecimiento de los pastos, se presenta un incremento rápido en el porcentaje de materia seca y un cambio en los componentes orgánicos e inorgánicos. La formación de lignina, celulosa y hemicelulosa, que son componentes estructurales de las plantas, aumentan a medida que avanza su estado de madurez. Esto ocurre a mayor velocidad que el incremento de los carbohidratos solubles. La madurez de los pastos influye de manera directa sobre el contenido de la FDN y la digestibilidad de la FDN (dFDN), ya que al madurar la planta genera reservas de lignina para proveer soporte estructural, lo que aumenta los niveles de lignina, pero disminuye la (dFDN) (Dupchak, 2003).

4.4.3. Factores morfológicos

El kikuyo es una planta estolinífera que constantemente desarrolla tallos durante su etapa de crecimiento. Después de la cuarta hoja por tallo se produce un incremento en la proporción de material senescente y se reduce la proporción de hojas verdes (Reeves *et al*., 1996). De esta forma, la madurez del pasto afecta la relación tallo/hoja ya que la lámina foliar por lo general es de más alto valor nutritivo que los tallos para los animales. La digestibilidad se reduce con la madurez debido a la lignificación de las células del xilema y al incremento de la concentración de esclerénquima, las células del parénquima del tallo son digeribles, sin embargo, el anillo lignificado circundante no es digerido fácilmente por el rumen de los animales (Akin *et al,* 1990).

4.4.4. Factores ambientales

Las condiciones ambientales influyen directamente en las modificaciones morfológicas, el rendimiento y la calidad de los pastos y forrajes. La temperatura, la radiación solar, el régimen de lluvias y la precipitación son los factores ambientales que más influyen en estos cambios (Del Pozo, 2002).

- **La temperatura:** la concentración de carbohidratos no estructurales en las plantas incrementa con la presencia de bajas temperaturas. Sin embargo, las variaciones de temperatura afectan la concentración de CNE, bajas temperaturas diarias y altas temperaturas nocturnas disminuyen la tasa de crecimiento y mejora la digestibilidad del kikuyo. A su vez, las altas temperaturas incrementan la FDA, la celulosa, la lignina y sílice (Henderson y Robinson, 1982). El rango óptimo de temperatura para kikuyo es de 16 a 21 °C, sin embargo, este rango es bajo para las demás especies de pastos tropicales. Las temperaturas menores de 10 °C reducen drásticamente la tasa de fotosíntesis para el pasto kikuyo. Los brotes se afectan por heladas moderadas, sin embargo, los estolones no se afectan mucho. Al aumentar la temperatura por encima de 21 °C o bajar de 8 °C se restringe el crecimiento del kikuyo (Wilson, 1985).

- **Precipitación**: las plantas C4 son más eficientes en el uso del agua y toleran mejor la sequía y el calor, probablemente por la reducción de la fotorrespiración (Treharne y Nelson, 1975). El pasto kikuyo requiere para su crecimiento entre 632 y 1290 mm de agua anuales para regímenes bimodales de lluvia (Russell y Webb, 1976). Sin embargo, este pasto tolera épocas de sequía debido a su sistema radicular profundo en suelos bien drenados. Por otra parte, las diferentes especies de tréboles son más susceptibles a largas épocas de sequía, se afectan las tasas de ramificación de estolones y se reduce el tamaño de las hojas (Belayne *et al*., 1996). Después los tréboles se recuperan rápidamente, ya que los estolones sobreviven al estrés hídrico por más tiempo que las hojas (Brock y Kim, 1994). Las diferentes especies asociadas a los tréboles dentro de la pradera los ayudan a tolerar la sequía protegiéndolo de la radiación solar directa y manteniendo las temperaturas del suelo más bajas (Brock y Hay, 1993). El requerimiento hídrico anual del trébol varía entre 1000 y 1900 mm.

- **Radiación solar**: el kikuyo no tolera muy bien el sombrío debido a que contiene menos clorofila II que otros pastos, como *Panicum maxumum, Axonopus compressus y Stenotaphrum secundatum*. De igual forma, el kikuyo es poco eficiente en la conversión de energía lumínica a dióxido de carbono fijado. La energía lumínica anual convertida bajo condiciones de campo para kikuyo es 1,7 %, comparada con 2,4 de Ryegrass (Cooper, 1970).

4.4.5. Suelo

El pasto kikuyo prospera en suelos fértiles con buen drenaje, con altos contenidos de nitrógeno o materia orgánica. Pueden tolerar bajos contenidos de humedad y alta salinidad (Russel, 1976). El kikuyo es muy sensible a deficiencias de magnesio, fósforo, potasio, azufre, hierro, cobre, manganeso y es menos sensible a la deficiencia de calcio, boro, molibdeno y zinc, es muy eficiente en la utilización del fósforo del suelo, pero requiere de fósforo libre en el suelo para su establecimiento. Es muy tolerante a la acidez en el suelo, puede tolerar hasta el 60 % de saturación de acidez, sin embargo, bajo estas condiciones la absorción de calcio y potasio son limitadas (Marais, 2001).

En cuanto al pasto Ryegrass exige suelos de media a alta fertilidad, drenados y pH superior a 5,5. Requiere buenos contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio (OregonStateUniversity,1999). El fósforo es indispensable para un adecuado rebrote y la producción de materia seca también se ve limitada por la disponibilidad de fósforo.

4.4.6. Manejo agronómico de la pradera

El manejo agronómico que se le realice a las praderas afecta directamente el crecimiento, producción y calidad de los forrajes, los manejos de suelos, fertilización, manejo de plagas y enfermedades, altura de corte o pastoreo, la carga animal, el tiempo de ocupación, entre otros (Decruyenaere *et al*., 2009).

4.5. Funciones de los nutrientes en las praderas

La deficiencia de los diferentes nutrientes en el suelo pude afectar la producción y calidad de las pasturas debido a la función que cada uno de estos elementos desempeña dentro de la planta. Adicionalmente, el desbalance de algunos nutrientes que se presentan deficientes o excesivos en el suelo pueden afectar negativa o positivamente la absorción de otros elementos esenciales para el desarrollo y crecimiento de los forrajes.

De acuerdo con Melgar y Díaz (2008), un elemento es considerado esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas si la planta no puede completar su ciclo de vida sin

él, ya que está involucrado en funciones metabólicas vitales. En la tabla 4 se presentan los elementos esenciales que la planta requiere

Tabla 4. Elementos esenciales para el crecimiento de las plantas

Macronutrientes		**Micronutrientes**	
Carbono	C	Boro	B
Hidrógeno	H	Cloro	Cl
Oxígeno	O	Cobre	Cu
Calcio	Ca	Hierro	Fe
Magnesio	Mg	Manganeso	Mn
Nitrógeno	N	Molibdeno	Mo
Fósforo	P	Zinc	Zn
Potasio	K	Niquel	Ni
Azufre	S		

Fuente: Mills y Benton (1996)

Existen muchos factores que afectan la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, tales como:

Reacción del suelo (pH):la reacción del suelo se refiere a las relaciones de acidez y basicidad. Se trata de una propiedad que puede explicar algunos procesos químicos y algunas condiciones físicas, además de tener un considerable impacto sobre la vida microbiana de este medio. La reacción del suelo viene expresada por el pH (escala logarítmica de la concentración de hidrógenos libres en la solución), que corresponde a su fase acuosa o disolución salina, pero tanto los hidrógenos libres y la hidrólisis de compuestos de aluminio, hierro, junto a la dinámica de carbonatos, bicarbonatos o sulfatos, son los que regulan sus distintos valores. En función de ellos son posibles tres condiciones: acidez, neutralidad y alcalinidad (Castro y Gómez, 2008).

Contenido de sales: el suelo es salino cuando contiene electrolitos libres en exceso que dificultan el desarrollo adecuado de los cultivos. Se pueden presentar algunos efectos tóxicos de iones asociados a sales de sodio y generar aumento en la presión osmótica de la solución en la rizosfera de las plantas, lo cual limita la absorción de los nutrientes (Castro y Gómez, 2008).

Desnitrificación: en condiciones anaeróbicas el oxígeno para algunas bacterias está ligado a los nitratos para sus propias oxidaciones, de esta manera se disminuye la cantidad de nitratos, lo cual da lugar a la formación de nitrógeno molecular que escapa a la atmósfera y de otros productos gaseosos intermedios (óxido nítrico N_2O, óxido nitroso NO) que también se pierden en la atmósfera: $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ (Gómez, 2011).

Inmovilización: este fenómeno se produce por la actividad de los microorganismos del suelo, los cuales utilizan los elementos aportados por los fertilizantes como nutrientes para su desarrollo, compitiendo con las plantas en su absorción. Los nutrientes más afectados son el N, P y S. Por ejemplo, en el caso del nitrógeno, la inmovilización ocurre cuando el amonio y los nitratos son tomados por los microorganismos del suelo y no pueden ser absorbidos por las raíces. La regla práctica para conocer el nivel crítico de inmovilización del nitrógeno es la relación carbono-nitrógeno (C:N). Los niveles C:N superiores a 20-30:1 resultan en la inmovilización. Es decir que con esta relación no hay liberación neta de nitrógeno en la materia orgánica en descomposición y los nutrientes lo toman del suelo. La incorporación de materiales ricos en nutrientes susceptibles de ser inmovilizados reduce los problemas de competencia para la absorción del nutriente por los microorganismos (Gómez, 2011).

4.5.1. Absorción de nutrientes en pastos

La fertilidad del suelo es la capacidad que tiene de proveer nutrientes a las plantas y las condiciones para su disponibilidad y absorción. La fertilidad química involucra la provisión de micro y macronutrientes requeridos por la planta para su crecimiento y desarrollo. La fertilidad física incluye factores y procesos edáficos que determinan las condiciones para que los nutrientes sean absorbidos por las plantas. La fertilidad biológica determina la cantidad de organismos presentes en el suelo que pueden mejorar tanto la fertilidad física como la fertilidad química. Significa que la condición física y biológica del suelo determina

la expresión final de la fertilidad del suelo para un cultivo determinado (Melgar y Díaz,2008).

4.5.2. Nitrógeno (N)

El nitrógeno forma parte esencial de los organismos y de la metería orgánica del suelo. La fuente principal de N es el aire y de allí es tomado por lo microorganismos, solos o asociados con plantas. De esta forma, los iones son trasformados de su forma N_2 gaseosa a la forma de ion amonio (NH_4^+). El nitrógeno gaseoso es inerte y solo entra al sistema biológico cuando es fijado, es decir, combinado con otros elementos, en especial con carbono, hidrógeno y oxígeno (Marschner, 1998).

La cantidad de nitrógeno en los suelos está controlada por condiciones climáticas y por la vegetación presente. El clima juega un papel determinante a través del efecto de la temperatura y humedad sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas y microorganismos. En estudios realizados por Lisk (1972) se encontró correlación negativa entre el aumento de la temperatura, el contenido de N y la materia orgánica del suelo. Además, este mismo autor reportó una correlación positiva entre el aumento de la pluviometría y la concentración de N y materia orgánica del suelo.

Fertilizantes nitrogenados

En general, los fertilizantes nitrogenados tienen reacción ácida en el suelo, excepto el nitrato de calcio (tabla 5).

Tabla 5. Fertilizantes nitrogenados utilizados en fertilización de praderas

Fuente	Contenido de N	Indicie de basicidad
Sulfato de amonio	21 %	–62

Urea	46 %	–46
Nitrato de amonio	35 %	–35
Nitrato de calcio	15,5 %	+12

Fuente: adaptado de Hofman y Van Cleemput (2004).

Los fertilizantes que tienen índices de basicidad negativos poseen reacción ácida, mientras que los fertilizantes que tienen índices de basicidad positivos presentan una reacción alcalina. Este índice indica cuántos kilogramos de CaO se requieren para neutralizar la acidez generada por la aplicación de 100 kg del fertilizante (Hofman y Van Cleemput, 2004).

La generación de acidez de los fertilizantes amoniacales se debe al proceso de nitrificación del amonio que libera protones de H^+ y acidifica el suelo.

La urea tiene una reacción fuertemente alcalina, inicialmente en el área circundante. El granulo en donde el pH puede alcanzar valores entre 8,5 y 9. Cuando existe humedad suficiente, la urea se hidroliza rápidamente y forma amonio y carbonato, este último es muy inestable y se desdobla en iones de bicarbonato y en iones de hidroxilo (OH^-) (Darwich, 1998).

Balance de nitrógeno en pasturas de clima frío

En estudios realizados por Cárdenas (2003), quien utilizó un modelo de simulación en diferentes pasturas de clima frío, se encontró que, al asociar gramíneas con la leguminosa *Lotus uliginosus,* se presentó un balance de nitrógeno favorable en el suelo (valor negativo), cuando *F. arundinacea* + *Lotus* (–22 kg N/ha/año) es comparada con especies de gramíneas puras como *P. clandestinum*. En el mismo estudio también se observó que pastos del género *Lolium* presentaron balances positivos y con valores altos, por lo que concluye que dichas gramíneas son ineficientes en el uso del nitrógeno aplicado y que la asociación con leguminosa favorece el balance del nitrógeno en el suelo. Esto se traduce en una menor necesidad de fertilizantes nitrogenados para la pradera. Estos reportes coinciden con los realizados por (Whitehead,1995) para pasturas de Ryegrass asociadas con *Trifolium sp*., con un balance de –39 a –130 kg N/ha/ año. También Ledgard *et al.*

(1999) encontraron balances de –34 kg N/ha/año sin fertilización nitrogenada en pasturas de Ryegrass asociada con tréboles y –24 kg N/ha/año en pasturas con 400 kg N/ ha/año.

Eficiencia en el uso de nutrientes (EUN)

Se refiere a la eficiencia con las que el animal convierte alimentos ingeridos en un producto animal. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia total} = \frac{\text{Producción total}}{100} * \text{insumo total}$$

Cuando el consumo de N aumenta, la excreción de este elemento también se incrementa y, por lo tanto, la eficiencia en el uso del N será menor. En vacas lactantes, en un estudio realizado en Noruega, se mostró cómo al incrementar las cantidades de nitrógenos aportadas al animal, mayor fue la excreción principalmente por vía urinaria, manteniéndose más o menos constante la excreción vía heces y leche (Steinshamn*et al*., 2006).

4.5.3. Fósforo

Algunas de las funciones del fósforo están relacionadas con en el crecimiento celular, la diferenciación del DNA y RNA, transferencia y utilización de energía, entre otros. Además, es muy importante para el crecimiento de los microorganismos del rumen (NRC, 2001). Este es un mineral limitante en la producción agropecuaria debido a que los suelos en Colombia son predominantemente ácidos, con altos contenidos de hierro y aluminio, lo que genera baja solubilidad de fósforo y formación de compuestos poco solubles que no están fácilmente disponibles para las plantas.

Las recomendaciones de fertilización con fósforo que usualmente se encuentran para el kikuyo son de aproximadamente 64 kg/ha/año (Palacio, 2007). Sin embargo, otros autores como Mejía *et al.* (2014) recomiendan un nivel de aplicación del P de 81 kg/ha/ año. Guerrero (1998) sugiere fertilizar con 200 kg de P/ha/ año. En estudios realizados por Jaimes y Correa (2016), encontraron que la excreción de P promedio es 93,9 kg/ha/año en hatos lecheros de Antioquia, lo que indicaría que los niveles de P aportados por los animales a través de sus excretas pueden ser suficientes para cubrir los requerimientos del kikuyo, de acuerdo con lo recomendado por Palacios (2007) y Mejía *et al.* (2014). Este

exceso de fósforo en las excretas de los animales puede estar explicado por las altas concentraciones de este elemento presentes en el pasto kikuyo, las cuales alcanzan valores de hasta 0,42 % (León *et al*., 2008) que supera lo recomendado por la NRC (2001).

Contenido de fósforo en suelos tropicales

El contenido total de P en los suelos tropicales derivados de cenizas volcánicas es relativamente bajo. Según estimaciones Sánchez y Salinas (1981), aproximadamente el 82 % de los suelos agrícolas del trópico americano presentan deficiencias de fósforo.

Todos los compuestos fosfatados del suelo son derivados del ácido fosfórico y se presentan como ortofosfato, los cuales se pueden dividir en orgánico e inorgánicos. En los inorgánicos, los iones de hidrógeno del ácido fosfórico se reemplazan por cationes, formando sales. En los orgánicos, uno o más hidrógenos del ácido fosfórico dan origen a enlaces estéricos y el resto puede ser reemplazado por cationes (Mills y Benton, 2006).

Algunos factores, como la acidez del suelo, la temperatura, la precipitación, la actividad biológica, entre otros, determinan las proporciones de las fracciones orgánicas e inorgánicas del P total en el suelo. En la materia orgánica existen cinco tipos principales de compuestos fosfatados: fosfolípidos, ácidos nucleicos, fosfatos metabólicos, fosfoproteínas y fosfato del ácido inosito hexafofórico o inositol (Sánchez, 2006).

Entre los fosfatos cristalinos, los más importantes son los siguientes: los cálcicos, los alumínicos y los férricos, los fosfatos monocálicos $Ca(H_2PO_4)_2$, el fosfato dicálcico ($CaHPO_4$) y sus formas hidratadas, las apatitas hidroxidadas (la varscita $AlPO_4 * H_2O$), Fosfatos férricos o ferrosos (vivianita $Fe_3(PO_4)$) y (estrengita Fe_4PO_4) (Sánchez, 2006).

Fertilizantes fosfatados

En los suelos tropicales se presentan muy bajas concentraciones de fosfatos totales en forma soluble. Sumado a esto, por las condiciones químicas de estos suelos, los fosfatos aplicados como fertilizantes pasan rápidamente a formas que no son tan aprovechables por las plantas. Por otra parte, los suelos alcalinos y calcáreos generan la formación de compuestos de calcio poco solubles la adsorción del H_2PO_4 en el complejo calcáreo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

La solubilidad de los fertilizantes y su velocidad de disolución determinan la eficiencia de la fertilización fosfatada. Cuando se aplica un fertilizante al suelo se produce una zona diferenciada enriquecida con ácido fosfórico, de acuerdo con la solubilidad del abono en el tiempo. Alcanzar la máxima concentración depende de la velocidad de disolución del material, esta velocidad depende del tamaño del granulo, es decir, de la superficie de la partícula, del grado de calcinación y del pH (Melgar y Camozzi, 2002).

Tabla 6.Características de una solución saturada de fertilizantes fosfatados

Compuesto	Fórmula	pH	P mol/litro
Altamente solubles en agua			
Fosfato monocálcico	$Ca(H_2PO_4)_2$* H_2O	1,0	4,5
Fosfato monoamónico	$NH_4H_2PO_4$	3,5	2,9
Fosfato monopotásico	KH_2PO_4	4,0	1,7
Pirofosfato triamónico	$(NH_4)_3$ HP_2O_7	6,0	6,8
Fosfato diamónico	$(NH_4)_2HPO_4$	8,0	3,8
Fosfato dipotásico	K_2 HPO_4	10,1	6,1
Poco solubles en agua			
Fosfato dicálcico	$CaHPO_4$	6,5	0,002
Apatita hidroxidado	$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$	6,5	0,00001

Fuente: adaptado Fassbender y Bornemiza (1987)

Después de que el fertilizante es incorporado, los procesos y equilibrios químicos presentes en el suelo afectan los aniones ortofosfatos en donde una parte del P agregado pasa a formar parte de la solución de suelo, otra parte es retenido en arcillas y óxidos, otra parte es P no lábil o de baja solubilidad (Melgar y Díaz). Cuando el P de la solución del suelo se va agotando, las fracciones lábiles orgánicas e inorgánicas lo reabastecen, los suelos arcillosos presentan una mayor retención de P. Sin embargo, este elemento es

liberado de manera progresiva a formas a la solución del suelo en donde está disponible para las plantas (Melgar y Díaz, 2008).

4.5.4. Potasio (K)

El K en el suelo está presente como componente estructural de los minerales primarios y secundarios. Está fijado en los minerales de arcilla como ion intercambiable en la superficie de los coloides del suelo y como soluto en la solución del suelo. El contenido total de K en los suelos varía entre 0,5 y 2,5 %. Sin embargo, solo está disponible para las plantas entre el 0,1 y el 2 %. Las diferentes fracciones constituyen una reserva de potasio que puede ser transformada de una forma a otra permanentemente, dependiendo de los factores que alteren el equilibrio químico del suelo (Fassbender y Bornemiza, 1987).

Dinámica del potasio en el suelo

Para el adecuado crecimiento de las plantases necesario el paso continuo de iones desde el suelo hasta las raíces de las plantas. Los iones de la fase sólida pasan a la solución del suelo donde se ponen en contacto con la superficie radical, penetran en el espacio libre en el que la planta puede absorberlos y transportarlos a los tejidos donde se necesita (Melgar y Díaz, 2008).

La meteorización de los feldespatos resulta en la liberación de potasio a la solución del suelo para la utilización de la planta. El potasio puede retornar a los espacios interlaminares de las arcillas y ser fijado. Entre 1 y 2 gramos de potasio pueden ser fijados por 100 gramos de minerales de arcilla, este fenómeno llamado *fijación del potasio* es de importancia en la agricultura.

Fijación de potasio

El proceso de acumulación de potasio en el espacio interlaminar de las arcillas es denominado *fijación* y ocurre debido a características específicas de los minerales arcillosos del grupo 2:1, como las illitas, montmorillonitas y vermiculitas. El espacio interlaminar de las illitas solo permite la acumulación de iones de K^+ y de NH_4^+.Para que se produzca la fijación es necesario que se deshidrate el ion de potasio y se introduzca en

el espacio interlaminar, saturando las cargas electrostáticas. El K fijado llena el espacio y se establece una configuración química estable con el mineral (Fassbender y Bornemiza 1987).

Funciones en la planta

El potasio tiene funciones muy importantes en procesos como la fotosíntesis y la activación de más de 60 sistemas enzimáticos en las plantas, mantiene la presión osmótica, neutraliza cargas eléctricas dentro de la célula, es altamente móvil dentro de la planta por lo que el transporte célula a célula de este elemento se realiza fácilmente (Espinosa, 2003).

Las leguminosas absorben del suelo grandes cantidades de potasio, de modo que pueden incluso llegar a acumular cantidades superiores a las de N.

La concentración de potasio varía entre 0,2 al 5,0 % en el tejido foliar. Se considera que una planta es deficiente cuando el contenido de potasio es inferior 1,96 % y alto cuando es superior al 3,08 %. Los alimentos de origen vegetal son la fuente principal de K para los animales, el contenido de este nutriente en las plantas casi siempre es suficiente para llenar los requerimientos de los animales, e incluso en algunos casos puede resultar excesivo (Espinosa, 2003).

4.5.5. Calcio (Ca)

Calcio en el suelo

En el suelo el Ca está presente en diversos minerales, incluidos fosfatos (apatita), silicatos, sulfatos (yeso)y carbonatos (calcitas y dolomitas). La meteorización de esos minerales aumenta los iones de Ca^{2+}los cuales pueden ser absorbidos dentro de los coloides orgánicos e inorgánicos del suelo, lo que contribuye a la floculación de arcillas, agregación de partículas y estructura de suelo.

El calcio se mueve en el suelo por flujo de masas, la toma de Ca por parte de las plantas es pasiva y se realiza por los pelos radicales jóvenes donde las paredes celulares aun no contienen suberina. La toma de calcio se afecta cuando los pelos radicales son atacados por nematodos o químicamente alterados por iones como amonio, sodio o aluminio. La toma de Ca también se suprime por competencia con iones de K y amonio. El calcio es

transportado a través de la xilema por corriente transpiratoria. El movimiento ascendente del calcio por el xilema es facilitado por sitios de intercambio donde el Ca es adsorbido momentáneamente y por quelatación con ácidos orgánico en la sabia del xilema. Una alta concentración de Ca en el xilema acelera su movimiento a través de la planta hacia los brotes apicales y los puntos de crecimiento. El calcio es transportado en muy pequeñas cantidades por el floema (Mill y Benton, 1996).

Función de calcio en las plantas

El calcio es un elemento clave en la estructura de las paredes celulares primarias, las microfibrillas de celulosa se unen por enlaces cruzados de glicanos, generalmente polímeros xiloglucano (XG), pero también glucoarabinoxilanos en Poaceae (Gramineae) y otras monocotiledóneas. Estas microfibrillas interconectadas están incrustadas en una matriz, en la que la pectina es la macromolécula más abundante. La pectina también es abundante en las lamelas intermedias entre las células (Pilbeam y Morley, 2006).

El calcio también es necesario para el desarrollo de los meristemos apicales y su ausencia no permite la división mitótica. Es cofactor de algunas enzimas y estimula el desarrollo de raíces y hojas (Espinosa, 2003).

La mayoría del Ca presente en la célula está localizada en el apoplasto y vacuolas, mientras en el citoplasma la concentración es baja, el calcio actúa como cementante entre las paredes de las células adyacentes y está también vinculado a la elongación de brotes y al crecimiento de pelos radicales.

Los iones de calcio (Ca^{2+}) actúan como mensajeros en la transducción de señales de estrés biótico y abiótico en plantas superiores. También participa en la regulación de procesos como división celular, polaridad celular, el tigmotropismo, gravitropismo, elongación celular, diferenciación celular, defensa de las plantas y demás respuestas al estrés, foto morfogénesis, entre otros (Shao *et al*., 2008). La entrada de calcio y el aumento de este en el citoplasma son importantes para la transducción de señales de ABA en las células guarda (Miles *et al*., 2004; Covington y Harmer, 2007).

El calcio removido de la pared celular es parte de la abscisión de las hojas y del proceso de maduración de frutas. La aplicación de Ca a hojas senescentes reduce el efecto

catabólico de las citoquinas, por lo tanto, la calidad postcosecha y la tasa de descomposición de flores, follajes, frutas y vegetales dependen de los niveles de calcio. Este elemento también está involucrado en la expresión de los síntomas de daño por heladas en las épocas frías (Mills y Benton, 1996).

Hipocalcemia

Se conoce como *parálisis*, *paraplejia* o *fiebre de leche* y se presenta generalmente la enfermedad suele aparecer antes o inmediatamente después del parto. No se presenta con mucha frecuencia envacas primerizas y es más frecuente en el tercero y el décimo parto. Los síntomas inician con temblores musculares, tropiezo al correr y finalmente la vaca se deja caer y se ausenta del medio que la rodea. El suero generalmente debe contener una concentración de calcio de 10 mg/100 ml. Si dicho nivel se presenta por debajo de 5 mg/100 ml, se puede presentar coma hipocalcémico que puede llevar a la muerte del animal (Espinosa, 2003).

4.5.6. Magnesio (Mg)

El magnesio está presente en el suelo, en los minerales primario de ferromagnesina como biotita, olivino y serpentina. También en minerales secundarios de arcilla, como clorita, illita, vermiculita o montmorillonita. Por último, en sales inorgánicas como carbonatos, sulfatos o dolomitas. El magnesio está raramente asociado con complejos de materia orgánica. Así mismo, el Mg es su mayoría no es intercambiable de los minerales primarios y secundarios. El que sí lo es pasa a ser adsorbido por los coloides del suelo. El Mg de la solución del suelo está disponible para las plantas en un rango de pH entre 5,4 y 7,0 (Mills y Benton, 1996).

Sustituciones isomórficas entre Fe^{+3} o Al^{+3} con el Mg^{+2} resultan en la creación de cargas positivas en la superficie de las arcillas. Los suelos con pH bajos favorecen la meteorización de los minerales ferromagnesinos, liberando el Mg.

Función en las plantas

El magnesio se mueve a las raíces por fluido de masas, su absorción es pasiva mediada por ionóforos en donde este se mueve por corriente electroquímica. Dentro de la planta,

este elemento es móvil por el floema y puede ser transportado de hojas viejas a hojas más jóvenes.

El núcleo de la molécula de clorofila de las plantas es el Mg, sus bajas concentraciones evitan la formación de este pigmento, lo que afecta directamente el proceso de la fotosíntesis. Adicionalmente, este elemento interviene en la formación de azúcares, en la activación de enzimas involucradas en el proceso de respiración, activa el metabolismo de grasas, carbohidratos, proteínas e interviene en el transporte de los fosfatos. Es absorbido del suelo como catión Mg^{+2}y móvil dentro de la planta (Espinosa, 2003).

Antagonismos con otros nutrientes

Altas concentraciones de calcio en la rizosfera pueden inhibir la absorción de magnesio, lo cual puede generar deficiencias de este elemento para las plantas. Por otra parte, al incrementarse la concentración de magnesio con respecto a la concentración de calcio, se reduce o limita la absorción de Ca (Gómez, 2011). El nitrógeno puede también inhibir o promover la acumulación de Mg en las plantas, dependiendo de la forma del nitrógeno. Con el amonio, la toma de magnesio es inhibida y con nitrato se incrementa. La competencia del amonio con el magnesio se presenta con mayor frecuencia en suelos de climas fríos (Merhaut, 2006). La absorción y acumulación de hierro puede ser afectada o inhibida por la aplicación de fertilizantes con magnesio, además, la deficiencia de hierro puede afectar la translocación de Mg de las raíces a los puntos de crecimiento. El manganeso y el zinc son cationes divalentes y pueden competir con el Mg por espacios de unión en las partículas del suelo, al igual que en las membranas dentro de la planta (Merhaut, 2006).

4.5.7. Azufre (S)

En los suelos, más del 90 % del S se encuentra asociado con la materia orgánica, la cual tiene una relación 10:1 N:S. En suelos orgánicos, el S es encontrado en proteínas, aminoácidos y puede estar asociado con óxidos de hierro y aluminio, minerales de arcilla o fracciones del humus. En suelos bien drenados el S inorgánico existe como sulfatos (SO_4^{-2}) DE CA, Mg, K, Na o NH_4. También puede encontrarse como sulfatos adsorbidos en

óxidos de hierro y aluminio a pH menores de 4 y sulfatos precipitados con carbonatos de calcio a pH mayores de 7 (Haneklaus*et al.,* 2006).

El S del suelo disponible para la planta proviene de la utilización de combustibles fósiles y la erupción de volcanes que liberan S al aire, el cual es depositado al suelo por la lluvia, aplicación de fertilizantes y actividad microbiana. Los microorganismos del suelo en condiciones aeróbicas pueden mineralizar el S de algunos aminoácidos como cisteína y convertirlo en sulfatos con una tasa de retorno anual de 4 a 13 kg/ha. Por otra parte, en condiciones anaeróbicas, el proceso de mineralización es llevado a cabo por la bacteria *Desulfovitorio* la cual pue de producir sulfuro de hidrógeno (H_2S) que retorna fácilmente a la atmosfera (Haneklaus*et al.,* 2006).

Los sulfatos son removidos del suelo por lavado, por los cultivos o se pierden en la atmosfera como gases. Los sulfatos adsorben a los óxidos de Al y Fe, pueden ser desplazados por efectos electrostáticos de exceso de cationes o por los fosfatos, los cuales son más fuertemente adsorbidos por los óxidos de Al y Fe (Haneklaus *et al.,* 2006).

El sulfato se mueve a la raíz principalmente por fluido de masas, por lo cual su disponibilidad depende mucho de la humedad del suelo, también puede ser absorbido en forma de dióxido de azufre (SO_2) por los estomas. Los rangos de absorción de S pueden estar entre 10kg/ha para cereales y pastos y 45 kg/ha para crucíferas (Haneklaus *et al.,* 2006).

Función dentro de la planta

Varias funciones esenciales se atribuyen al S, grupos de cisteína y metionina forma enlaces de disulfuro. Estos enlaces están involucrados en la estructura terciaria de las proteínas, está relacionado con la conformación y activación de muchas enzimas, también es fundamental para la formación de glucósidos, aceites y compuestos volátiles de plantas aromáticas, promueve la nodulación en las leguminosas, formación, estimulación y producción de semillas, también les genera resistencia a las plantas a condiciones de bajas temperaturas (Mills y Benton, 1996).

Una de las proteínas más importantes que contiene S es la ferredoxina, la cual está involucrada en la asimilación de dióxido de carbono, síntesis de glucosa, síntesis de glutamato, fijación de N_2 y reducción de nitrato. También es un componente de la Coenzima A (CoA) y de las vitaminas (Biotina y tiamina). El CoA es una sustancia de unión en el ciclo de Kreps y juega un papel muy importante en el metabolismo de lípidos y ácidos grasos (Mills y Benton, 1996).

4.5.8. Hierro (Fe)

El hierro está presente en el suelo en grandes cantidades en minerales primarios, como olivinos, augita, biotita y óxidos como hematita y magnetita. Sin embargo, existe una muy baja correlación entre el hierro total del suelo y el disponible.

Cuando la meteorización de los minerales primarios ocurre, el hierro aparece en los minerales de arcilla y puede acumularse como óxidos. La química del Fe en el suelo es compleja y depende del pH y del potencial redox. Formas solubles inorgánicas incluyen Fe^{3+}, $Fe(OH)^{2+}$ y Fe^{2+}. Este último es estable a pH bajos y en condiciones de no oxidación. No obstante, en la solución del suelo en condiciones de buena aireación, la forma dominante es Fe^{3+}.

Se han identificado dos mecanismos de toma de hierro en los pelos radicales. La primera estrategia se presenta en el plasmalema de las células de la raíz cerca de la superficie radical, el Fe^{3+} es reducido a Fe^{2+} por la liberación de electrones y protones. Esa liberación incrementa la actividad de la enzima Fe^{3+} reductasa. En la segunda estrategia el Fe^{3+} es tomado después de la quelatación con fitosideróforos. El hierro puede ser oxidado en la raíz o translocado como Fe^{3+} asociado con citrato. El hierro es transportado en el xilema principalmente a los cloroplastos donde los niveles son controlados por enlaces reversibles con ferric- fosfoproteína y fotoferritín (Mills y Benton, 1996).

Función en la planta

Catalizador indispensable para la síntesis de clorofila. Está involucrado en la respiración, debido a que hace parte de los pigmentos distinguidos como citocromos (porfirinas). Concentraciones altas de Cu, Mn, Zn o Ni pueden inducir deficiencia de este elemento. El hierro también forma parte de la proteína ferredoxina, la cual es requerida en la reducción del nitrato, reducción del sulfato, asimilación de N_2 y producción de energía (NADP).

4.5.9. Boro

El contenido total de boro en los suelos se presenta en un rango entre 20 y 200 $mg*kg^{-1}$ (ppm), pero el rango de B disponible está de 0,4 a 5 ppm, el boro se encuentra en minerales primarios tales como bórax ($Na_2B_4O_7$* $10H_2O$), kermita ($Na_2B_4O_7$* $4H_2O$), colemanita ($Ca_2B_6O_{11}$* $5H_2O$), ulexita ($NaCaB_5O_9$* $8H_2O$) y cotonita [$Mg_3(BO_3)_2$] (Fassbender y Bornemisza, 1987).El boro puede también unirse con la materia orgánica o con los carbohidratos liberados durante el proceso de humificación. En la mayoría de suelos agrícolas el B está asociado con los coloides húmicos, el cual es la principal fuente de B para el crecimiento de las plantas. El B contenido de las rocas meteorizadas es liberado a la solución del suelo en forma ácido bórico no ionizado (H_3BO_3). En esta forma, el B es fácilmente lixiviado del suelo (Umesh, 2006).

El B entra a la planta de forma pasiva con la corriente transpiratoria como ácido bórico no disociado, sin embargo, pequeñas cantidades de boro son tomadas de forma activa. Factores que reducen la transpiración como alta humedad relativa o sequía reduce la toma y translocación. El B puede asociarse con polisacáridos, permanecer como B libre o vincularse a las paredes celulares. El boro se mueve principalmente por el xilema como un complejo azúcar-borato, su movimiento en el floema es limitado, es relativamente inmóvil dentro de la planta (Umesh, 2006).

Función dentro de la planta

Está relacionada con el crecimiento meristemático y está directamente involucrado en la diferenciación celular, maduración, división y elongación. Es necesario para la síntesis de uracilo componente del RNA y es precursor del uridin fosfato glucosa. Además, el B afecta

el crecimiento del tubo del polen posiblemente por el incremento en la absorción y metabolismo de azúcares, también está relacionado con el control de la germinación. El boro forma complejos con sustratos polihidróxidos, enzimas y coenzimas para estimular o inhibir vías metabólicas. El boro está involucrado en la síntesis de lignina y diferenciación del xilema (Umesh, 2006).

4.5.10. Cobre (Cu)

La mayoría del Cu en el suelo es insoluble e inmóvil debido a las fuerzas de sus enlaces. El cobre disponible en el suelo se presenta como Cu^{2+}, el cual puede unirse directamente a grupos carbonilo o fenólicos de la materia orgánica. El encalado e incrementos en el pH, generalmente, reducen su disponibilidad (Kopsell, 2006).

La absorción de este nutriente es de forma activa y metabólicamente controlada, el Cu se mueve en el xilema formando complejos con compuestos nitrogenados como aminoácidos. El cobre no es móvil en la planta y aproximadamente la mitad de este elemento activo en la planta es encontrado en los cloroplastos.

Función en las plantas

El cobre es componente de varios complejos de enzimas que están involucrados en el metabolismo del nitrógeno y carbohidratos en las plantas. Adicionalmente, forma parte de enzimas como la plastocianina que participa en la cadena del transporte de electrones en el fotosistema I. El cobre hace parte del citocromo oxidasa en la mitocondria que está involucrada en la respiración celular. Adicionalmente, es componente de enzimas que protegen a las células del daño del superóxido (Kopsell, 2006).

4.5.11. Manganeso (Mn)

La meteorización de minerales primarios que contienen Mn forma minerales secundarios como pirolusita (MnO_2) y manganita [MnO(OH)]. El Mn también es encontrado en el suelo

como óxido de Mn y Fe, en parte adsorbido en la superficie de los minerales de arcilla. La falta de oxígeno y poca aireación puede generar el incremento de Mn en la solución de suelo a pH ácidos. La forma predominante de este elemento es Mn^{3+}, mientras que, en suelos con pH por encima de 8, la forma predominante es Mn^{4+}. La disponibilidad el manganeso depende también del contenido de materia orgánica y la actividad microbiana, así como también de la temperatura del suelo y la forma y método de fertilización. El Mn dentro de la planta es poco móvil, es translocado principalmente por el xilema como Mn^{2+}o combinado con ácidos orgánicos preferiblemente llevado a los tejidos meristemáticos (Humphries*et al.,* 2006).

Función en la planta

Los cambios entre Mn^{2+} y Mn^{3+} permite que este nutriente participe en procesos de óxido reducción y sirva como cofactor para la enzima nitrato reductasa, hidroxilamina reductasa, indolacético axidasa, RNA polimerasa, fosofoquinsa y fosfato transferasa. El Mn también es un elemento de la enzima peróxido dismutasa, la cual neutraliza los radicales libres formadas por la división del agua durante la reacción de Hill en la fotosíntesis (Humphries *et al.,* 2006).

4.5.12. Zinc (Zn)

El principal mineral que contiene zinc es la esfalerita. En algunos minerales el Zn sustituye al Fe^{2+} y al Mg^{2+}, de manera que también está presente en minerales como biotita y augita. El Zn queda adsorbido en la superficie de las arcillas y se une a la materia orgánica para formar complejos de hidróxidos o permanece en la solución del suelo. El 95 % del zinc se mueve por difusión, las deficiencias de este elemento frecuentemente ocurren en suelos compactados o donde el crecimiento de las raíces es restringido. El zinc es tomado principalmente como Zn^{2+}. Aunque $(ZnCl)^{+}$ y quelatos de zinc también pueden ser absorbidos, es transportado radialmente y puede estar presente en la sabia del xilema como un ion que no forma complejos.

5. Requerimientos nutricionales de las praderas de clima frío

Una herramienta usada para estimar los requerimientos nutricionales de las plantas es la absorción de nutrientes que representa el consumo de minerales y nutrientes que las plantas pueden extraer en su ciclo de vida. Estos estudios de absorción y exportación sirven para afinar los programas de fertilización (Bertsch, 2005).

Las diferentes especies forrajeras varían en su demanda nutricional y dependen del requerimiento interno de la planta, su capacidad para extraer nutrientes del suelo y el potencial de producción de la especie. Las leguminosas son menos eficientes para extraer nutrientes del suelo que las gramíneas, estas últimas se pueden encontrar como coberturas naturales de suelos de baja fertilidad, mientras que las leguminosas requieren suelos más ricos en nutrientes.

Las especies forrajeras presentan diferentes requerimientos de nutrientes. Las tablas 7 y 8indican requerimientos promedio de los nutrientes esenciales para algunas especies forrajeras de acuerdo con lo reportado por Bernal y Espinosa (2003).

Tabla 7. Requerimientos de macronutrientes y nutrientes secundario para pastos seleccionados expresados en kg/ha año

Especie	Rendimiento forraje seco t/ha año	Extracción de nutrientes kg/ha^{-1}año				
		N	P_2O_5	K_2O	Mg	S
Kikuyo	14	389	83	415	36,8	40
Azul orchoro	7	224	61	201	22	28
Raygrass	16	432	110	480	57,6	40
Falsa poa	16	416	43	344	36,8	36,8
Tréboles	15	336	100	403	34	34

Fuente: Bernal y Espinosa (2003).

Tabla 8. Requerimientos de micronutrientes para trébol rojo y gramíneas expresados en g/ton materia seca

Especie	Zinc	Boro	Cobre	Manganeso	Hierro	Molibdeno

	g/t MS					
Trébol rojo		21-45	10-12			0.45
Gramíneas		10-50	5-12			0,2-0,7

Fuente: Gracia *et al*. (2000)

5.1.1. Efecto de la fertilización en la producción de forraje

Se presenta una muy buena respuesta a la fertilización por parte de las especies forrajeras, principalmente de las gramíneas al aporte de nitrógeno. Sin embargo, esta respuesta positiva a la aplicación de N conlleva a un incremento de la demanda de otros nutrientes como P, K, S, Mg y Ca. La deficiencia de estos elementos puede resultar en la pérdida de una buena parte del beneficio de la aplicación del N y, además, de reducir significativamente el valor nutricional del forraje.

5.1.2. Efecto de la fertilización en la calidad del forraje

Los resultados de investigación sobre fertilización en pasturas son muy variables. El elemento más estudiado es el N, sin embargo, existen muchas versiones contradictorias sobre el efecto que tiene este nutriente sobre la calidad de los forrajes. Según Castañeda *et al*. (2008), la respuesta de las pasturas a la aplicación de nitrógeno depende de la fertilidad del suelo, la concentración y balance de los otros nutrientes, de la especie forrajera y de las condiciones climáticas.

La producción de materia seca, en términos generales, aumenta con la aplicación de nitrógeno, el contenido de proteína por unidad de área y la producción de forraje verde en condiciones de humedad adecuada. Sin embargo, una alta producción de forraje verde puede disminuir la cantidad de carbohidratos de reserva (Silva *et al*., 2005).

La aplicación de altas dosis de N en pastos puede ocasionar que estos deban ser cosechados más frecuentemente, lo que podría resultar en contenidos más bajos de carbohidratos estructurales, pectina, celulosa y hemicelulosa en estos forrajes (Espinosa, 2003). En una investigación conducida en la sabana de Bogotá, encontraron un aumento significativo de proteína para pasto raigrás debido a la aplicación de N. Se reportaron valores iniciales de 12 %que aumentaron hasta25 % con la aplicación de N cuando se

cortó cada 25 días, y de 11 % de proteína inicial que incrementó hasta18 % cuando se cosechó cada 35 días. Cuando se cosechó cada 45 días, el incremento fue mucho menor (9 a 12 %). Se concluyó que, en estas condiciones de clima, el corte o pastoreo cada 25-35 días permite obtener mayor cantidad de forraje de mejor calidad que la cosecha cada 45 días (Bernal, 1998).

La fertilización nitrogenada también afecta la digestibilidad y el consumo de forraje por los animales. En una investigación conducida con kikuyo en el departamento de Nariño, se encontró que al aplicar dosis de 50 a 100 kg/N/ha/corte se aumentó la proporción de pasto digerido. Adicionalmente, reportó que, para el kikuyo, la digestibilidad promedio es mayor cuando el rebrote alcanza el estado de pastoreo en el período de 39 a 50 días (Guerrero, 1993).

Por otra parte, elementos como el calcio también afectan el desarrollo de las pasturas, el encalado incrementa los contenidos de Ca y P del forraje, pero la aplicación en exceso puede afectar negativamente la concentración de Mg en el forraje, principalmente en Ryegrass, el sobre encalado también reduce las concentraciones de micronutrientes como Mn, Zn, Co, Cu y B disponibles para la planta (Espinosa, 2003).

La concentración de P en el tejido foliar de los forrajes está muy relacionada con la concentración de Ca. Estudios realizados en diferentes países han encontrado un aumento significativo en el contenido de P de los forrajes, especialmente de las leguminosas después de la aplicación de cal. También se ha encontrado que la fertilización con P aumenta los contenidos de proteína y Ca de los forrajes (Espinosa, 2003).

El P tiene un efecto sobre la absorción de N que depende de la disponibilidad de este último, pero ambos nutrientes están estrechamente relacionados. Las aplicaciones de K son importantes desde el punto de vista nutricional porque se ha demostrado que, para algunas leguminosas como la alfalfa, la digestibilidad se puede mejorar con aplicaciones de K. Sin embargo, cuando existe una muy alta disponibilidad de K en el suelo, pueden llegar a presentarse problemas de desbalance interno de nutrientes (Guerrero, 1993).

Existe un antagonismo entre el K y otros elementos como Ca, Mg, y Na, por lo que la aplicación de altas dosis de potasio reduce la concentración de dichos elementos (Losinno y Conti,2005).

El S está muy relacionado con el metabolismo del N, tanto en la planta como en el animal. El S ayuda a aprevenir intoxicaciones con nitratos y nitritos, mejora la digestibilidad de los forrajes y aumenta en el contenido de proteína de los forrajes. Esto se debe fundamentalmente a un mejor funcionamiento de las bacterias del rumen. Se han realizado diversos estudios combinando fertilización con NPK o NPK + Mg y con la incorporación de mezclas de microelementos (Zn, B, Cu, Mn, Mo). Se ha encontrado que cuando se incluyen micronutrientes se aumenta el contenido de estos en el forraje, se mejora la digestibilidad de la materia seca y se aumenta la producción (Espinosa, 2003).

5.1.3. Métodos y épocas de aplicación de los fertilizantes

En praderas, el sistema de aplicación de fertilizantes más común es al voleo, en forma manual o mecánica. En pastos sembrados en hileras, como los de corte, es aconsejable aplicar el fertilizante en una banda a un lado de la hilera o surco porque permite una mejor utilización del material (Espinosa, 2003).

Los forrajes, por ser plantas que están en constante crecimiento, necesitan un aporte frecuente de nutrientes, en la temporada lluviosa es donde ocurre el mayor crecimiento de las plantas. Por lo tanto, es importante que encuentre en el suelo buena disponibilidad de nutrientes que pueden ser asimilados. Por esta razón, es recomendable aplicar el fertilizante al inicio de las lluvias y hacer una aplicación aproximadamente un mes antes de que terminen las lluvias para lograr un buen crecimiento durante una parte de la época seca. De esta forma, se puede contar con abundante forraje en un período de normal escasez. En pastos, el fertilizante se puede aplicar en cualquier época del año siempre que las plantas se encuentren en crecimiento y el suelo tenga un contenido adecuado de humedad (Melgar y Díaz, 2008).

El fertilizante de mantenimiento se debe aplicar con mayor frecuencia, generalmente después de cada corte o pastoreo durante las épocas húmedas. Para que la aplicación de fertilizantes sea eficiente, también es necesario considerar el estado de desarrollo de la planta (Melgar y Díaz).

Las aplicaciones hechas después de que ha aparecido la hoja bandera, o cuando la planta se encuentra en plena floración, no son muy eficientes debido a que en esta época se

reduce la capacidad de la planta para absorber nutrientes del suelo. La planta absorbe nutrientes en forma dinámica cuando se encuentra en pleno desarrollo vegetativo (Bragachini y Méndez, 2005).

En áreas con riego, la fertilización se debe realizar justo después de corte o pastoreo. En suelos de baja fertilidad o de textura gruesa, es preferible la aplicación de fertilizantes de forma fraccionada, aplicando un tercio de este después del corte o pastoreo y el resto durante la época de crecimiento activo, que generalmente ocurre 15 a 30 días después de la primera aplicación. Con este sistema, es más eficiente en el uso del fertilizante, no obstante, en algunas zonas es más económico aplicar dosis altas cada dos o tres pastoreos debido al alto costo de la mano de obra(Bragachini y Méndez, 2005).Aunque la cantidad de total de forraje obtenida con ambos sistema de fertilización, la distribución de la producción no es uniforme porque es mayor en el pastoreo posterior a la aplicación y menor en los siguientes (Bragachini y Méndez, 2005).En todos los casos, la fertilización debe ser balanceada, teniendo en cuenta los requerimientos nutricionales del forraje y los requerimientos nutricionales del animal, el tipo de suelo y la disponibilidad de humedad. Cuando se hace una fertilización balanceada no se presentan problemas de consumo de pasto, problemas metabólicos o problemas de producción en los animales (Espinosa, 2003).

Las leguminosas requieren un pH más alto que las gramíneas y mayores concentraciones de P, K, Ca, Mg y algunos elementos menores. Es recomendable aplicar dosis bajas de N en su establecimiento para estimular al crecimiento inicial y una nodulación efectiva. En mezclas establecidas se deben hacer aplicaciones relativamente altas de fertilizantes completos, una o dos veces al año, incluyendo micronutrientes cuando es necesario. Sin embargo, no se debe aplicar N a poblaciones puras de leguminosas o cuando la leguminosa representa más del 30 % de la mezcla, principalmente en especies de altura (Darwich, 1994).

Las leguminosas tropicales bien noduladas pueden ser casi tan eficientes como las de zona templada para fijar N de la atmósfera. Si la nodulación no es buena, se puede aplicar N en dosis bajas y, si no se presenta nodulación, las dosis deben ser las mismas que aquellas utilizadas para praderas de gramíneas puras. En lotes puros de leguminosas o en las mezclas es importante revisar periódicamente la nodulación de las leguminosas. En

general, los nódulos de color rosado o amarillo claro, de aspecto jugoso y saludable, son normales y eficientes en la fijación de N. Si se encuentra una buena nodulación, la fertilización nitrogenada debe disminuirse o suprimirse, pues si se aplica N en forma de fertilizante, las bacterias de los nódulos dejan de fijar N atmosférico y tienden a utilizar el proveniente del fertilizante (Gonçalves *et al.,* 1997).

Cuando el porcentaje de leguminosas en las mezclas ha aumentado mucho, se lo puede reducir haciendo aplicaciones altas de N, que tienden a favorecer un desarrollo rápido de la gramínea y una disminución proporcional de la leguminosa. Igualmente, cuando se quiere aumentar la proporción de leguminosas, se aumenta la fertilización con P, K, Ca, Mg y elementos menores (menos Mn y Fe) y se suprime la fertilización nitrogenada. En muchos casos es más importante el suministro de una fertilización de buen balance, de acuerdo con la fertilidad natural del suelo, que la aplicación de dosis muy altas de nutrientes. Generalmente, el mantenimiento de las mezclas de gramíneas y leguminosas se dificulta por aspectos como incompatibilidad entre las especies, diferentes velocidades de crecimiento, altura e intensidad del pastoreo, invasión de malezas (especialmente de hoja ancha), presencia de plagas y enfermedades, y competencia por luz y humedad, y en menor medida por aspectos nutricionales, aunque estos pueden ser importantes en muchos suelos del trópico (Gonçalves *et al.,* 1997).

5.1.4. Fuentes y costos de fertilizantes

En la siguiente tabla se presentan las diferentes fuentes de fertilizantes con su composición, utilizadas en la fertilización de praderas.

Tabla 9. Composición y precio de fertilizantes utilizado en nutrición de praderas en Colombia

Fertilizantes	Fórmula	Composición	Unidad	Costo* (COP)
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	(32-33,5 % de N)	50 kg	67 000
Urea	$CO(NH_2)_2$	46 % N	50 kg	60 000

Fosfato diamónico DAP	$[(NH_4)_2HPO_4]$	18 % N - 46 % P_2O_5	50 kg	87 000
Fosfato monoamónico MAP	$NH_4H_2PO_4$	11 % N - 53 % P_2O_5	25 kg	85 000
Sulfato de amonio	$(NH_4)_2SO_4$	21 %N - 24 %S	50 kg	53 000
Nitrato de potasio	KNO_3	13 %N - 44 % K_2O	50 kg	120 000
Nitrato de calcio	$[Ca(NO_3)_2]$	15 % N - 19 % Ca	25 kg	51 000
Calfos		8-18 % P_2O_5 – 29 % Ca	50 kg	25 000
Roca fosfórica		25-33 % P_2O_5- 33-38 % Ca	50 kg	15 000
Cloruro de potasio	KCl	60 % K_2O y 47 % Cl	50 kg	60 000
Sulfato de potasio	K_2SO_4	48 - 52 % K_2O - 18 %S	50 kg	60 000
Sulpomag	$K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$	22 % K_2O - 22 % S - 18 %Mg	50 kg	64 300
Sulfato de magnesio	$MgSO_4$	22 % S – 17 %MgO	25 kg	37 000
Sulfato de hierro	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	19- 23 % Fe	-	-
Quelato de hierro		5-14 % Fe	-	-
Sulfato de manganeso	$MnSO_4$	26-28 %Mn	1 kg	3200
Quelato de manganeso		12 %Mn	1 kg	24 000
Sulfato de zinc	$ZnSO_4$	28 % Zn	1 kg	4200
Quelato de zinc		14 % Zn		25 000
Sulfato de cobre	$CuSO_4$	22,5 %Cu	1 kg	7800

Quelato de cobre		12 % Cu		25 000
Borax	($Na_4B_4O_7 \cdot 10H_2O$)	11,3 % B	1 kg	3200
Ácido bórico	H_3BO_3	17 % B	1 kg	6700
Molibdenato de amonio	[$(NH_4)_2MoO_4$]	49 % Mo	100 g	40 000

*Precios en pesos colombianos, cotizado entre junio y octubre de 2017.

5.1.5. Encalado

El encalado consiste en la aplicación al suelo de sales básicas que neutralizan la acidez. Los materiales que se utilizan como alcalinizantes o correctivos de acidez son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio (Ca) y/o magnesio (Mg). Debido a su diferente naturaleza química, estos materiales presentan una variable capacidad de neutralización. Los mecanismos de reacción de los materiales de encalado permiten la neutralización de los iones H+ en la solución del suelo por medio de los iones OH- producidos al entrar la cal en contacto con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva solamente cuando existe humedad en el suelo. Los óxidos reaccionan inmediatamente con el agua del suelo, se transforma en hidróxidos y neutralizan la acidez a través de su OH-, que es una base fuerte, por lo que son más efectivos a corto plazo. Los materiales a base de carbonatos y silicatos neutralizan la acidez a través de la hidrólisis (reacción con el agua) de los iones CO_3^{-2}y SiO_3^{-2}, que son bases débiles.

Existen varios procesos en el suelo que promueven la reducción del pH. Todos estos procesos ocurren naturalmente dependiendo del tipo de suelo, del tipo de cultivo y de las condiciones de manejo. Un conocimiento adecuado de estos procesos en el suelo permite un mejor control de las condiciones que conducen a situaciones ácidas (Fassbender, 1987). A continuación, se presentan algunos de estos procesos:

Naturaleza de la acidez: existen varios procesos en el suelo que promueven la reducción del pH. Todos estos procesos ocurren naturalmente dependiendo del tipo de suelo, del tipo

de cultivo y de las condiciones de manejo. Un conocimiento adecuado de estos procesos en el suelo permite un mejor control de las condiciones que conducen a situaciones ácidas (Espinosa y Molina, 1999).

Remoción de cationes básicos: un suelo con pH neutro tiene saturada la fase de intercambio con cationes básicos (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+). Estos cationes satisfacen la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. La acidificación se inicia con la pérdida de estos cationes debido en parte a la acción de las raíces. La planta, al absorber cationes, libera H+ para mantener el equilibrio en su interior, lo que contribuye a la reducción del pH del suelo. Por otro lado, el movimiento de cationes a capas inferiores (lixiviación) contribuye también a la acidificación del suelo. Este movimiento de cationes se debe a la presencia de aniones que,al formar pares iónicos, se encargan de arrastrar los cationes del perfil del suelo con el movimiento del agua (Castro y Gómez, 2008).

Contenido de materia orgánica: la materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos, lo cual produce un constante suplemento de CO_2 que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO_3^-). Esta reacción aporta H^+, que reduce el pH, y bicarbonato (HCO_3^-) que se combina fácilmente con los cationes básicos lavándolos del perfil. De esta formase dan las condiciones favorables para la acidez. La materia orgánica del suelo contiene también grupos carboxílicos y fenólicos activos que se disocian, liberando iones H^+ a la solución del suelo (Castro y Gómez, 2008).

Utilización de fertilizantes nitrogenados: el uso de fertilizantes amoniacales genera acidez en el suelo a través de oxidación biológica. El proceso que hace posible esta transformación se denomina *nitrificación*. Este proceso produce un exceso de H+ que acidifica el suelo. Este es un proceso natural necesario para transformar el NH4 + en NO_3, debido a que las plantas utilizan principalmente NO_{3-} en su nutrición (Scheneiter y Bertín, 1989).

Aluminio intercambiable: es reconocido ampliamente que uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo es la presencia de aluminio (Al^{3+}) en la solución del suelo. Los iones Al^{3+} desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos. Las reacciones de hidrólisis del Al3+ son similares a la

reacción de un ácido fuerte, como el ácido acético que libera iones H^+ (Espinosa y molina, 1999).

Igualmente, existen varios materiales que son capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los más comunes se pueden citar los siguientes:

Tabla 10. Composición y precio de materiales encalantes utilizados en la corrección de acidez

Material	Fórmula	Contenido de Ca	Contenido de Mg	Precio COP/t
Carbonato de calcio	$CaCO_3$	40		200 000
Dolomita	$CaCO_3$*$MgCO_3$	21,6	13,1	150 000
Óxido de calcio	CaO	71		260 000
Hidróxido de calcio	$Ca(OH)_2$	54		
Silicato de calcio	$CaSiO_3$	34,4		300 000
Yeso	$CaSO_4$	24		400 000
Hidróxido de magnesio	$Mg(OH)_2$		41	
Carbonato de magnesio	$MgCO_3$		28,5	
Óxido de magnesio	MgO		84	1 000 000
Silicato de magnesio	$MgSiO_3$		24	

*Precios en pesos colombianos cotizado entre junio y octubre de 2017.

6. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Guatavita Cundinamarca, vereda Potrero Largo (Figura 2). Participaron cuatro productores de la Cooperativa de Productores de Leche de la Cooperativa Potrero Largo (Cooprolag). La zona de estudio se ubica en las coordenadas geográficas: N 4°55´ 52.54”, O 73°46´ 56.26”, Altitud: 2752 msnm.

Para este municipio se reporta una temperatura media de 13 °C, con valores mínimos medios de 6,1 °C y extremos mínimos que están entre –1 y–6 °C grados, ocurridos en los primeros tres meses del año. De acuerdo con los datos de la estación meteorológica ubicada en la vereda Potrero Largo de este municipio, las temperaturas medias más altas se presentan en el primer semestre, entre marzo y abril, y durante el segundo semestre entre octubre y noviembre. En este tiempo la zona de confluencia intertropical (ZCIT) está sobre el centro del país, lo cual causa un incremento en la nubosidad y una disminución de la velocidad del viento. Estas condiciones permiten a la atmósfera superficial conservar la energía. La temperatura media más baja se registra entre junio y julio por la incursión de las frías corrientes de los alisios procedentes de latitudes medias (Boada, 2011).

La precipitación es de tipo unimodal bimodal, con un periodo de lluvia fuerte entre los meses de marzo y agosto. La época seca va de diciembre a febrero y, en promedio, la precipitación media anual es de 2000 mm (CAR, 2003). Su condición hidrológica hace parte de la zona de recarga hídrica de la microcuenca del río Lagunero, la cual hace parte de la gran cuenca del río Orinoco (Avella *et al.,* 2014).

Se seleccionaron cuatro predios de productores vinculados a la cooperativa Cooprolag. Para la elección de estas unidades productivas se tuvo en cuenta la topografía de los predios, el número de animales por unidad de área, raza de los animales, riqueza de especies y diversidad de pastos, el cual se determinó mediante el índice de Shannon (H’)=–∑pi Ln pi), donde pi es la cobertura relativa de las especies. Adicionalmente, se calculó el índice de Simpson para densidad y dominancia (tabla 13).Se calculó también el índice de

Jaccard para determinar la similitud de especies entre las unidades productivas: J= C/(A+B–C), en donde *C* es el número de especies presentes en ambas unidades productivas, *A* es el número de especies presentes en la primera unidad productiva y *B* es la cantidad de especies presentes en la segunda unidad productiva (tabla 14).

6.1. Características de las unidades productivas evaluadas

Las unidades productivas escogidas pertenecen a pequeños productores asociados a la cooperativa Cooprolag. Como se puede observar en la tabla 11, las fincas presentan una topografía y área similar.

Tabla 11. Área de las unidades productivas evaluadas

Finca	Área para pastoreo ($m^{2)}$	Área total ($m^{2)}$	Pendiente (%)
Finca La Vid	13 511	14 076	20,2
Finca San Luis	9476	11 888	17,5
Finca La Poceta	15 234	23 675	16,6
Finca Miraflores	11 658	17 917	19,9

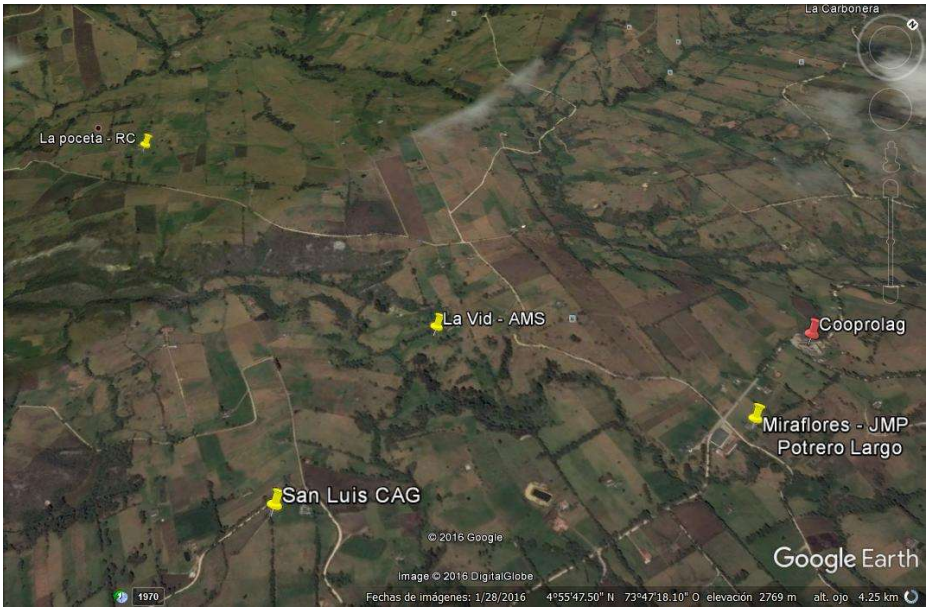


Figura 2. Ubicación parcelas de investigación Guatavita Cundinamarca. Mapa de Google Earth, Europa technologies, 2017. Derechos de autor (2016) de Google

6.2. Características de los suelos

Con el objetivo de identificar las características fisicoquímicas de los suelos de cada una de las unidades productivas evaluadas, se realizó un análisis fisicoquímico de suelos, llevado a cabo por el laboratorio Agrilab. En donde se terminó pH en agua (1:1), Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) con la metodología de acetato de amonio 1 N, elementos menores (Fe, Mn, Cu, Zn) con la metodología de EDTA, el Boro y la conductividad eléctrica en el extracto de saturación, fósforo metodología Bay II, azufre por metodología de colorimetría, aluminio intercambiable por turbimetría y el carbono orgánico por método Black and Walkley.

De acuerdo con los mapas de uso y capacidad de uso del suelo consultado en el Geoportal del IGAC, para las coordenadas de las unidades productivas evaluadas y sus alrededores, las tierras se clasifican en Vlp1, cuyas características son suelos superficiales a moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias a gruesas, fuertemente ácidos, con baja saturación de bases y fertilidad baja a moderada (IGAC, 2000).

En la actualidad, estos suelos se encuentran dedicados a la ganadería extensiva con pastos naturales y en bosques naturales protectores-productores muy intervenidos. Estos suelos tienen capacidad para utilizarse en ganadería extensiva con pastos naturales, asociada con actividades de agroforestería, para bosques protectores-productores con labores de entresaca controladas o para regeneración espontánea de la vegetación (IGAC, 2000).

6.3. Diseño experimental

Se utilizó un modelo bloques completos al azar con 4 tratamientos y 4 repeticiones. En cada unidad productiva (UP) se establecieron parcelas experimentales de 500 metros cuadrados (50 m X10 m) para cada uno de los tratamientos. Los tratamientos fueron los siguientes:

- T0 = 0 % Fertilización (Control)
- T1= 50 % fertilización química, –50 % fertilización orgánica
- T2= 75 % fertilización química, –25 % fertilización orgánica
- T3= 100 % fertilización química
-

Todos los tratamientos se establecieron basados en el estudio de suelos realizado previamente a cada unidad experimental para medir la producción de forraje y la composición forrajera de las praderas. La fertilización aplicada en cada tratamiento se basó en el resultado de los análisis fisicoquímicos de suelos y se tuvo en cuenta la extracción de las praderas utilizando el método de balance suelo-planta de Gómez (2004), que tiene en cuenta la extracción de la especie, el contenido disponible del suelo y la eficiencia de la fertilización. De acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NF = \frac{Rpp - S}{E} * 100$$

NF = necesidad de fertilización para un nutriente determinado

Rpp= Requerimiento nutricional para un potencial de producción

S= Disponibilidad de nutrientes en el suelo

E= Eficiencias de fertilización de acuerdo con factores de disponibilidad de nutrientes

Los cálculos se realizaron para suplir las necesidades de la pradera durante un año y la dosis a aplicar en cada pastoreo se dividió en 5 pastoreos que se realizan al año en la zona. La fertilización aplicada se presenta en la tabla 17.

Tabla 12. Fertilización aplicada en cada unidad productiva para un pastoreo, dependiendo de los tratamientos y de los análisis fisicoquímicos de suelos kg/ha

Fertilizante	Finca La Poceta RC			Finca San Luis CA			Finca la Vid AM			Finca Miraflores JM		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Urea (46)	68	93	180	76	102	180	77	97	180	71	96	180
Fosfato diamónico DAP (18-46-0)	12	41	140	2	30	123	19	46	140	12	41	136
Sulfato de potasio (0-0-50-18)	101	125	205	91	115	188	91	112	188	91	115	192
Fertilizante orgánico	1500	1150	0	1400	1050	0	1400	1100	0	1450	1100	0

La anterior fertilización aporta los nutrientes reportados en la tabla 18.

Tabla 13. aporte de nutrientes de la fertilización aportada en cada tratamiento y en cada una de las unidades productivas

Fertilizante	Finca La Poceta RC			Finca San Luis CA			Finca la Vid AM			Finca Miraflores JM		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Nitrógeno	108,4	107,6	108	105,3	104,8	104,9	108,3	107,9	108	107,3	106,5	107,3
Fósforo	65,5	64,8	64,4	56,9	55,8	56,6	64,6	65,2	64,4	63,5	62,9	62,6
Potasio	103	102,7	102,5	94,5	94,3	94	94,5	94,5	94	96,25	96	96

A cada finca se le realizó el cálculo de balance de nutrientes teniendo en cuenta lo reportado para cada elemento en el análisis de suelos y la extracción del pasto que en este caso se toma como referencia al pasto predominante (Kikuyo) para un ciclo de cultivo o una rotación. En términos generales las cantidades de cada elemento aplicados son muy similares en cada una de las unidades productivas.

El fertilizante orgánico utilizado tenía las características reportadas en la tabla 19.

Tabla 14. características del fertilizante orgánico utilizado en los tratamientos

Composición	
Nitrógeno total (N)	5.0 %
Nitrógeno Amoniacal	1.0 %
Nitrógeno orgánico (N)	0.5 %
Nitrógeno Uréico (N)	3.5 %
Fósforo asimilable (P2O5)	4.0 %
Potasio soluble en agua (K2O)	3.5 %
Materia orgánica total	53.0 %
Carbono orgánico	29.0 %
Extracto humito Total	51.0 %
Ácidos Húmicos	44.0 %
Ácidos Fúlvicos	7.0 %
Cenizas	27.0 %
Relación Carbono/Nitrógeno	5.8 %
Humedad Máxima	20.0 %
Capacidad de Intercambio Cationico (meq/100g)	120

Para realizar los muestreos, se utilizó un marco cuadrado de 1 x 1 m, subdividido en marcos de 0,25 m^2. El marco fue lanzado aleatoriamente 3 veces en cada tratamiento. Para la composición forrajera, en este mismo marco se estableció el porcentaje de cobertura de las especies encontradas para cada submuestra y posteriormente se calculó un promedio aritmético por especie (CIAT, 1983). En cada cuadro, el forraje fue cortado a una altura aproximada de 5-8 cm del suelo, simulando el pastoreo normal de un animal. Se pesó y se tomaron las respectivas muestras para determinar el peso seco en una estufa a 70 °C durante 48 horas.

6.3.1. Microorganismos del suelo

Se realizó una comparación entre el contenido inicial de microorganismos en el suelo, sin la aplicación de ningún tratamiento, y se tomaron muestras de suelo al final del ensayo, a los 60 días después del pastoreo, para verificar si existió alguna relación entre el contenido de estos microorganismos y la aplicación de materia orgánica al suelo.

La toma de muestras del suelo para el análisis microbiológico se realizó de acuerdo con la guía para la toma de muestras microbiológicas de suelos del Instituto Nacional de Desarrollo y Transferencia en Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (INTA, 2015).

Se realizo un recorrido por las parcelas en zing- zag, se retiró la capa vegetal y se tomo la muestra a una profundidad máxima de 20 cm, se realizaron 8 sub muestreos en cada parcela, posteriormente se tomaron 500 gramos de suelo de esa muestra compuesta y se deposito en un bolsa plástica y fueron llevadas las muestras al laboratorio el mismo día del muestreo.

Se evaluaron aerobios totales, hongos, actino bacterias, bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadores de fósforo. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de microbiología de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

El recuento de los microorganismos se realizado mediante la metodología de recuento de placas de acuerdo con la NTC 4092.

6.3.2. Rendimiento en materia seca

El método más utilizado para la determinación de la materia seca es el de eliminar el agua libre en el tejido por medio del calor, seguida por la medición del peso del residuo, siendo necesario someter las muestras a temperaturas idóneas que garanticen un secado rápido y así evitar las perdidas por acción enzimática y respiración celular (Batteman, 1970). Para la medición de esta variable, se realizaron cortes semanales durante 60 días con tijeras metálicas a una altura entre 5 y 8 cm. El pasto verde de cada parcela fue pesado para determinar el rendimiento de materia verde (RMV) para cada tratamiento, mediante la siguiente fórmula:

$$RMV = \frac{MCV * 10.000\ m^2}{AC}$$

Donde MCV es materia verde cosechada y AC es área cosecha en m^2.

Una porción de 200 gramos de la materia verde cosechada se tomó para ser secada en una estufa a 70 °C por 48 horas para la determinación de materia seca de acuerdo con la metodología de Van Soest (1994). Una vez calculado el porcentaje de materia seca (PMS), se procede a determinar el rendimiento de materia seca (RMS) mediante la siguiente fórmula:

$$RMS = \frac{RMV * PMS}{100}$$

6.3.3. Composición forrajera

Para determinar la disponibilidad y composición botánica, se utiliza el método de disponibilidad por frecuencia (MDF), según lo indicado por Hoyos *et al,* (1995). Se realiza un recorrido de reconocimiento a las parcelas, se asigna en una escala del 1 al 3 los sitios de mayor y menor producción y se observan las principales especies forrajeras presentes en el área evaluada. Posteriormente, se lanza 5 veces un marco de 1 m X 1m, el cual está subdividido en 8 porciones de 25cm. De cada submarco se asigna un porcentaje de cobertura a cada especie. Se corta y se pesa el pasto de cada marco y se registra en el formato de clasificación visual de disponibilidad y composición botánica.

Adicionalmente se calcularon los indicies de Shannon, Simpson para diversidad y dominancia de especies y el índice de similitud de Jacaad.

6.3.4. Eficiencia en el uso de nutrientes

La eficiencia en la utilización del nitrógeno, fósforo y potasio se expresó como kg de MS producida por kg de nutriente aplicado para cada tratamiento.

$$EUN = \frac{RMS}{Kg\ nutriente\ aplicado}$$

6.3.5. Eficiencia agronómica

La eficiencia agronómica se determina mediante la siguiente ecuación:

$$EA = \frac{R - R_0}{D}$$

Donde:

R= Rendimiento del cultivo con la aplicación del nutriente

Ro= Rendimiento del cultivo sin la aplicación del nutriente

D = Cantidad de nitrógeno aplicado.

6.3.6. Balance parcial de nutrientes (BPN)

El balance parcial es la relación entre el contenido de un elemento en la porción cosechada del cultivo y la cantidad del nutriente aplicado. Este mide la relación entre la remoción y el uso de nutrientes.

$$BPN = \frac{Kg\ de\ nutriente\ removido\ por\ la\ planta}{kg\ de\ Nutriente\ aplicado}$$

6.3.7. Punto adecuado de pastoreo

Para determinar el punto adecuado de pastoreo en donde el forraje expresa la mejor calidad nutricional, se tomaron muestras para análisis de calidad composicional de los forrajes a los 40, 45, 50 y 60 días después de aplicados los tratamientos. Las variables para determinar fueron los contenidos de fibra en detergente acido (FDA), fibra en detergente neutro (FDN), materia seca (MS), proteína y digestibilidad aparente de la materia seca (DA).

Para el cálculo de la digestibilidad aparente de los forrajes producidos en las unidades experimentales, se tomaron los valores obtenidos de fibra en detergente acida (FDA), de acuerdo con la siguiente formula: $88{,}9 - (0{,}779 \times \ \%\ FDA)$(Ustarroz *et al,* 1997), la cual fue utilizada en estudios en pastos tropicales realizados por (González *et al,* 2008).

6.4. Análisis estadístico utilizado

El diseño experimental utilizado para evaluar el efecto de los tratamientos de fertilización sobre la producción y calidad de forrajes fue en bloques completos al azar, en donde se utilizaron 4 bloques correspondientes a las 4 parcelas y 4 tratamientos (500 m^2 cada parcela) en cada bloque, distribuidos aleatoriamente. Se midieron variables como

producción de materia seca, cobertura de las praderas, FDA, FDN, proteína, digestibilidad de la materia seca, contenido de N, P, K, Ca y Mg de los pastos.

Se realizó un análisis de varianza mediante el programa SAS, que fue complementado con la prueba de Tukey y prueba de rango múltiple de Duncan.

7. Resultados

7.1. Características fisicoquímicas de los suelos

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de suelos de las diferentes unidades productivas evaluadas, en donde se puede observar que, en general, los suelos de la zona son muy similares en parámetros como pH, carbono orgánico, saturación de aluminio, contenido de elementos mayores, menores y textura (tabla 15).

Tabla 15. Resultados de análisis fisicoquímico de suelos

Parámetro	La vid	San Luis	La Poceta	Miraflores	Metodología
pH	5,2	5,27	5,23	5,24	Pasta saturada
CE (dS/m)	0,16	0,11	0,21	0,09	Extracto de saturación
Ca (meq/100g)	3,1	2,2	3,15	3,25	Ext acetato de amonio Absroción atómica
Mg (meq/100g)	1,02	0,52	1,03	0,82	
K (meq/100g)	0,26	0,31	0,34	0,25	
P (ppm)	16	88	24	30	Bray II
Al^{+3} (meq/100g)	1,26	2,1	1,01	2,4	Ext Cloruro de K
Sat Al (%)	22	38,9	15,6	35,2	Cálculo
CO (%)	3,6	4,8	3,3	4,3	Walkley Black
MO (%)	6,21	8,28	5,7	7,4	Cálculo
Nitrógeno total (ppm)	46,5	62,1	42,6	55,6	Cálculo a partir del Carbono orgánico
Hierro (ppm)	1026	540	1500	1300	Método Melich I
Manganeso (ppm)	28	9	50	0,82	
Cobre (ppm)	3,3	2,2	3,3	9,3	
Zinc(ppm)	4,1	1,8	2,8	4,9	
Boro (ppm)	0,05	0,07	0,05	0,05	Ext fosfato monocálcico

Textura	FAr	F	FAr	FAr	Bouyoucus
Densidad real	2,1	2,22	2,3	2,14	
Densidad aparente	1,1	1,05	1,2	1,12	
Porosidad total	52 %	47,9 %	56 %	52 %	Calculo a partir de la densidad
Relación Ca/Mg	3,0	4,2	3,1	4,0	Cálculo
Relación Ca/K	11,9	7,1	9,3	13,0	Cálculo matematico
Relación Mg/K	3,9	1,7	3,0	3,3	Cálcuo matematico
Realación (Ca+Mg)/K	15,8	8,8	12,3	16,3	Cálculo matematico

El pH de todos los suelos evaluados se clasifica como fuertemente ácido, de acuerdo con la clasificación de Castro y Gómez (2008). El pH del suelo ejerce un efecto indirecto sobre las plantas, ya que a una determinada acidez o alcalinidad los elementos nutritivos son más o menos asimilables y está determinado por el grado de evolución del suelo, el contenido de aluminio, azufre y materia orgánica. Para este caso, elementos como cobre, hierro, manganeso y zinc se encuentran más disponibles debido a que los metales generalmente están muy fuertemente unidos a las partículas del suelo. Sin embargo, la pradera los requiere en muy bajas concentraciones, por lo que su alta disponibilidad puede llegar a ser toxica o limitar el crecimiento de los pastos por antagonismos con elementos mayores (Gómez, 2011). Por el contrario, los cationes como el sodio, potasio, calcio y magnesio están débilmente unidos a las partículas del suelo, de manera que pueden ser lavados fácilmente por las lluvias o el riego. Por lo tanto, estos son menos disponibles para las praderas con pH bajos. Este es el caso de los suelos evaluados, ya que se presenta una baja saturación de bases derivada de bajas concentraciones de Ca, Mg, K y Na.

Por otra parte, aunque la saturación de aluminio no es extremadamente alta para estos suelos, combinada con la baja saturación de bases, es una fuerte limitante para el adecuado desarrollo de las praderas de la zona, por lo que se debe realizar una enmienda básica con el objetivo de neutralizar el aluminio presente, el cual oscila entre 22-38,9 %y de esta manera aumentar el pH y la saturación de calcio, con el fin de mejorar la disponibilidad de los demás nutrientes del suelo.

El contenido de materia orgánica de un suelo determina en gran medida su calidad y fertilidad física y química (Canet, 2007). Por lo tanto, los suelos con bajo contenido de materia orgánica presentan dificultad para retener humedad y nutrientes, baja formación de agregados del suelo, presentan baja capacidad de intercambio catiónico, baja actividad microbiológica que dificulta el ciclo de nutrientes, baja disponibilidad de nitrógeno, entre otras (Gómez, 2011).Para los suelos de la zona, el contenido de carbono orgánico se presenta en rango entre 3,6 - 4,8. De acuerdo con la clasificación de Gómez (2011), es un nivel medio para suelos de clima frío.

7.2. Rendimiento de materia seca

Se realiza un aforo inicial para determinar la producción de materia seca en cada una de las unidades productivas evaluadas en la tabla 16.

Tabla 16. Producción inicial de materia seca en las parcelas de las fincas evaluadas

Finca	Producción de MS kg/ha
La Vid	987,3
San Luis	1129
La Poceta	957,6
Miraflores	1034

De acuerdo con Pérez (2014), una pradera no degradada debe producir más de 1300 kg de materia seca por hectárea. Adicionalmente, los altos contenidos de hierro disponible presentes en el suelo se pueden reducir al renovar la pradera. Por otra parte, los resultados de densidad y porosidad del suelo son un indicador de procesos de compactación y, de acuerdo con la clasificación de la porosidad de Kaurichev (1984), los suelos de las fincas estudiadas tienen una porosidad baja, lo que indica también un grado de compactación del suelo.

En la figura 3 se puede observar el rendimiento de materia seca RMS durante el tiempo de evaluación. De acuerdo con el análisis estadístico para esta variable, todos los

tratamientos presentan diferencias significativas con respecto al control (p<0,05), sin embargo, el tratamiento 2 y 3 no presentaron diferencias en los 3 últimos muestreos realizados.

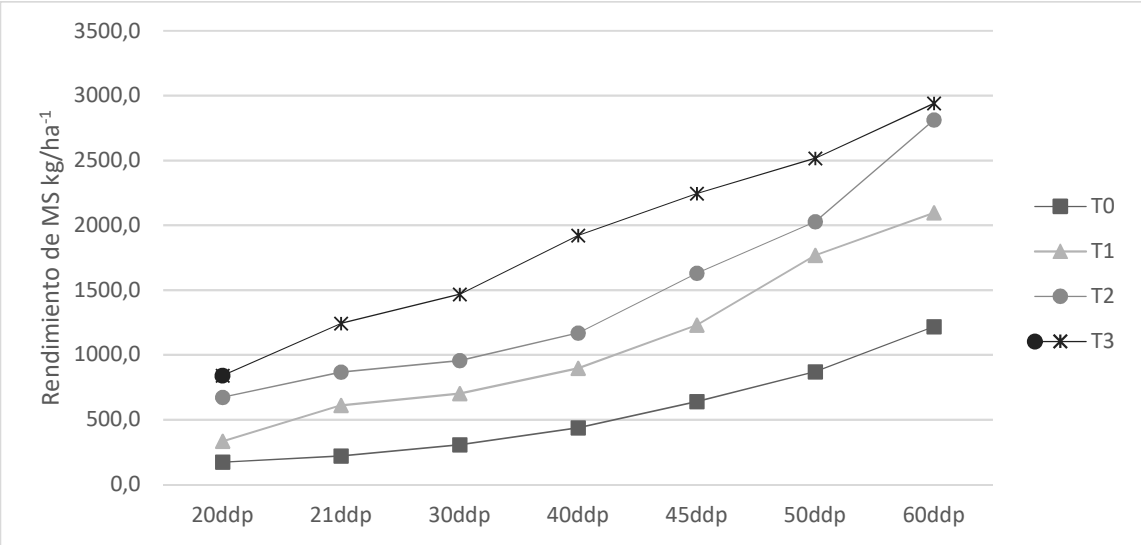


Figura 3. Rendimiento de la materia seca (RMS) kg/ha para un ciclo de 60 días de época lluviosa.

Tabla 17. Análisis estadístico para la variable materia seca en forraje.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Días después del pastoreo	24,1017	3,0000	8,0339	2,5975	0,0631	2,7981
Tratamientos	58,5117	3,0000	19,5039	6,3059	0,0011	2,7981
Interacción	10,0502	9,0000	1,1167	0,3610	0,9479	2,0817

El tratamiento que mayor RMS presentó fue el tratamiento 3, porque alcanzó en promedio a los 60 ddp un valor de 2940 kg de materia seca por hectárea. El tratamiento control presentó en promedio un RMS de 1218 kg/ha. Las diferencias entre los tratamientos pueden estar relacionadas con la tasa de liberación del nitrógeno en los fertilizantes orgánicos, lo cual depende de la mineralización que a su vez está condicionada por la presencia de microorganismos que desdobla los compuestos orgánicos del nitrógeno produciendo amonio, todo este proceso es dependiente de condiciones externas como, humedad, temperatura, pH entre otros (Magdoff, 1991).Los abonos orgánicos favorecen la

fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas (Eghball *et al*., 2004); sin embargo, su capacidad como fuente de nutrimentos es baja, respecto a los fertilizantes químicos ya que el contenido de N de los fertilizantes orgánicos es 1-3 % y la tasa de mineralización del nitrógeno es cercana al 10 % (Sikora y Enkiri, 2001), por lo cual sólo una fracción del N y otros nutrimentos está disponible el primer año después de su aplicación, es posible que por estas razones aunque en todos los tratamiento se aplicó una dosis similar de nutrientes, los tratamientos con fertilización orgánica tengan un menor rendimiento. Esto podría explicar por qué al final del ciclo de evaluación los tratamientos 2 y 3 no sean estadísticamente diferentes, ya que ha transcurrido un poco más de tiempo en donde posiblemente algunos de los nutrientes contenidos en la materia orgánica han sido liberados para la pastura. Esto contradice lo descrito por Echeverri *et al.* (2010), quienes determinaron que la combinación de fertilización química con fertilización orgánica no presenta ningún efecto sobre las características agronómicas de calidad de pasto kikuyo bajo condiciones de campo. Por otra parte, Gandarillas *et al.* (2012) indican que con la aplicación de bioabonos se puede alcanzar altos niveles de rendimiento de pastos, pero que la mejor respuesta se obtiene con una combinación de fertilización química y orgánica, lo que coincide con los resultados de este estudio. Quiroga y Barreto (2002), en estudios realizados en la Sabana de Bogotá, observaron que *P. clandestinum,* sometidos a distintos tratamientos de fertilización química y compostaje, obtuvieron rendimientos a 1887 y 2023 kg MS/ha en época de lluvia al rebrote de 45 días. Estos valores son similares a lo obtenido en este estudio para 45 días después del rebrote.

7.3. Microorganismos del suelo

Se puede observar en la figura 4 el contenido de los diferentes grupos de microorganismo indicadores de calidad microbiológica del suelo: aerobios comunes, hongos, actinobacterias, bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadores de P. El tratamiento 3 no presentó diferencias significativas con respecto al control, lo que indicaría que la fertilización química no ejerció ningún efecto sobre la población microbiana del suelo. Esto concuerda con lo descrito por Adeboye *et al*. (2006), quienes demostraron que la fertilización química no presenta un efecto significativo sobre la biomasa microbiana del suelo, también demostraron que el flujo de la biomasa microbiana del suelo está

determinado por el pH y el carbono orgánico presente en el mismo. Este estudio contradice lo descrito por Suzuki *et al*. (2005), quienes señalan que la fertilización orgánica tiene poco impacto en las comunidades microbianas, mientras que la inorgánica con amonio ejerce un fuerte efecto sobre la abundancia relativa de los diferentes grupos microbianos.

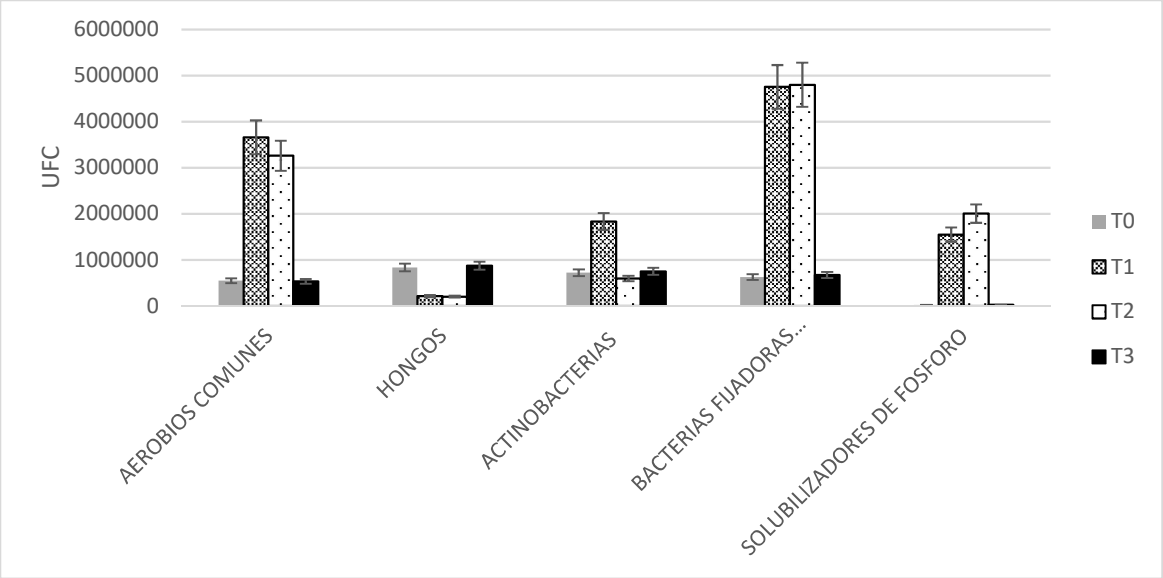


Figura 4. Grupos de microorganismos presentes en el suelo para los cuatro tratamientos de fertilización implementados.

Se puede observar en la figura 4 el contenido de los diferentes grupos de microorganismo indicadores de calidad microbiológica del suelo: aerobios comunes, hongos, actinobacterias, bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadores de P.

Por otra parte, los tratamientos 1 y 2 presentan diferencias significativas ($P<0,05$), con respecto a los demás tratamientos, esto puede deberse a que en estos dos últimos tratamientos se le incorporó al suelo un porcentaje de fertilización orgánica con ácidos húmicos y fúlvicos, lo que pudo favorecer el incremento de estos microorganismos benéficos en el suelo, diferentes investigaciones han demostrado que el aporte de materia orgánica afecta positivamente la biomasa del suelo ya que provee una mayor cantidad de sustrato que sirve como sustento al crecimiento microbiano. (Buchanarn, 1990), indica que cualquier práctica de manejo que incremente la acumulación de materia orgánica aumenta también el tamaño y la actividad microbiana en el suelo.

7.4. Composición forrajera

Para las parcelas evaluadas, la base forrajera fue kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), el cual representó en promedio el 60.4 % de la cobertura del suelo. Además, se encontraron especies como Rye grass (*Lolium sp*), el cual representó en promedio un 18.4 %, y otras especies como falsa poa (*Holcus lanatus)* con un 12.6 %. Adicionalmente, algunas especies, como diente de león, lengua de vaca y leguminosas como trébol blanco (*Trifolium repens*), trébol rojo (*Trifolium pratense*) y lotus (*Lotus uliginosus*) representaron el 5% restante. Después de la implementación de los tratamientos de fertilización se evidenció un aumento, con respecto del tratamiento control, en el porcentaje de especies leguminosas como trébol blanco (*Trifolium repens*), trébol rojo (*Trifolium pratense*) y en las diferentes unidades productivas.

En la tabla 18 se presentan los porcentajes de cobertura promedio de cada especie de pastos en cada una de las fincas evaluadas al inicio del ensayo.

Tabla 18. Porcentaje de composición de especies presentes en las parcelas estudiadas dentro de las cuatro unidades productivas seleccionadas

	La Vid (%)	**San Luis**	**La Poceta**	**Miraflores**
Kikuyo	63,2	60,2	64,8	55,1
Ryegrass	5,39	9,5	11,8	14,3
Falsa poa	8,4	5,6	4,37	10,2
Trébol rojo	2,4	8,6	3,2	3,3
Lotus	2.4	16,1	15,36	17,2
Otros	-	-	0,58	-

Teniendo en cuenta el porcentaje promedio de cobertura de las especies de pastos presentes en cada una de las fincas, se calculó el índice de diversidad y la dominancia de Shannon y Simpson (tabla 19).

Tabla 19. Cálculo de índice de Shannon y Simpson de diversidad y dominancia

	Índice de Shannon	**Índice de Simpson**	
	Diversidad	Diversidad	Dominancia
La Vid	1,07	0,54	0,45
San Luis	1,26	0,59	0,40
La Poceta	1,58	0,54	0,46
Miraflores	1,81	0,62	0,36

El valor del índice de Shannon varía entre 0 y 5. Se considera *alto* por encima de 3 y *bajo* el valor inferir a 2. De acuerdo con los datos arrojados por el índice de Shannon, las cuatro fincas evaluadas presentan una baja diversidad y sus valores calculados son similares.

Por otra parte, el índice de Simpson varía entre 0 y 1 tanto para diversidad como para dominancia: 0 es nula diversidad y dominancia, y 1 es máxima diversidad y dominancia. El cálculo para este índice arrojó que existe una diversidad cerca al 0,6. Por tanto, se considera *media*. Una dominancia promedio de 0,42 podría considerarse *baja*.

El índice de similitud de Jaccard entre unidades productivas varía entre 0 y 1, de manera que 0 es la similitud nula y 1 es completamente similares. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede observar en la tabla 20 que las unidades productivas presentan el máximo índice de similitud.

Tabla 20. Índice de similitud de Jaccad

	La Vid	**San Luis**	**La Poceta**	**Miraflores**
La Vid	-	-	-	-
San Luis	1	-	-	-
La Poceta	0,8	0,83	-	-
Miraflores	1	1	0,83	-

En la finca La Vid se observó que en la muestra control, durante todo el periodo de evaluación, el porcentaje de cobertura de las especies de leguminosas anteriormente mencionadas no superó el 3,7 %. Sin embargo, para los tratamientos 1 y 2 se observó la presencia de las especies leguminosas iniciando con un porcentaje de cobertura de 3.2% y 2.8% en el día cero y alcanzando un porcentaje de cobertura de 7.3 y 7.9% en el día 60. Para el caso del tratamiento 3, el porcentaje de cobertura de estas especies inició con un porcentaje de cobertura 3.1%y alcanzó una cobertura de 4.3% en el día 60.

Para el caso de la finca San Luis en el día cero se observó un mayor porcentaje de cobertura de las especies leguminosas que, en promedio para el tratamiento control, fue de 5.1 % aproximadamente entre trébol rojo (*Trifolium pratense*) y lotus (*Lotus uliginosus*)y para el final del tratamiento en el día 60 el porcentaje de cobertura de estas leguminosas fue de 6.1% en promedio. Para el tratamiento 1 se encontró que el porcentaje de cobertura en el día cero fue de 5.8% de estas especies y en el día 60 fue cercano al 11,5 %, mientras para el tratamiento 2 inicio con un porcentaje de cobertura de 6.5 y alcanzo en el día 60 un promedio de 13,7 %. Por último, para el tratamiento 3 inicio con un porcentaje de cobertura de 6.2 y se llegó a un porcentaje de cobertura promedio del 9,7 %.

En la finca La Poceta se observó en el tratamiento control un porcentaje de cobertura de especies leguminosas como trébol blanco (*Trifolium repens*), trébol rojo (*Trifolium pratense*) y lotus (*Lotus uliginosus*) en el día cero fue de aproximadamente 9% y en el día 60 al final del ensayo fue superior al 15 %. En el tratamiento 1 para el día cero se encontró una cobertura del 9.2% y al final de ciclo a los 60 días la cobertura promedio fue de 18 %, el tratamiento 2 fue de al final del ensayo a los 60 días 21,4 % y en el tratamiento 3 se presentó una cobertura de leguminosas de más del 16,8 % al final del ensayo.

En la finca Miraflores se encontró, para el tratamiento control, un promedio de cobertura de un 3,6 % de leguminosas. En el tratamiento 1 se encontró hasta un 11,1 % de cobertura de leguminosas y en los tratamientos 2 y 3 hasta un 4,5 y 5,4 % respectivamente al final del ensayo a los 60 días

Tabla 21. Porcentaje promedio de cobertura de leguminosas al final del ensayo para cada tratamiento

	La Vid	San Luis	La Poceta	Miraflores
Control	3,7	6,06	15,03	3,6
Tratamiento 1	7,9	11,5	18,1	11,1
Tratamiento 2	7,3	13,7	21,4	4,5
Tratamiento 3	4,3	9,7	16,8	5,4

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar un incremento de la cobertura de especies leguminosas con la aplicación de fertilización combinada química y orgánica durante el transcurso de un ciclo de rotación de 60 días. Esto podría explicarse principalmente por la aplicación de nutrientes que incrementan la nodulación y fijación de nitrógeno, así como el incremento de microorganismos fijadores de nitrógeno en el suelo lo cual se puedo evidenciar en la figura 4. De acuerdo con estudios realizados por Udarraga (2000), la disponibilidad de fósforo está directamente relacionada con la presencia de leguminosas en las praderas, esto podría explicar el mayor porcentaje de cobertura en el tratamiento control para la unidad productiva 2, ya que el suelo de este predio presentó mayor contenido de fósforo disponible en el análisis de suelo. Esto también coincide con Benavidez *et al*. (2000), quienes indican que, cuando los suelos presentan una concentración de P por debajo de los 20 ppm (Bray II), es muy probable obtener mayores respuestas a la fertilización con este elemento en leguminosas. También coincide con Boschetti *et al.* (2000), quienes encontraron que la adición de P y el encalado en pasturas de leguminosas han mostrado incrementos en la producción de forraje de hasta 8000 kg/ha/año. La eficiencia de utilización de P aplicado disminuye con el incremento de la dosis y el aumento de la disponibilidad de P en el suelo. (Goncaleves *et al.,* 1997) concluye que la respuesta de las leguminosas a la adición de P es de mayor magnitud a la observada en otras familias botánicas debido posiblemente al efecto que tiene el fósforo sobre la nodulación y la fijación de N, lo que repercute en una mayor calidad del forraje producido.

Para el establecimiento de una asociación gramínea-leguminosa, es importante tener en cuenta la proporción de cada una de las especies dentro del sistema de siembra, para evitar los efectos de competencia que provoquen el dominio o desplazamiento de alguna de las especies, lo que aseguraría mantenerlos estables en el tiempo y en el espacio en la pradera. La proporción de la leguminosa en la pradera, para obtener el máximo beneficio de las asociaciones, debe ser una disponibilidad entre 30 a 40 % de dicha especie(Pérez, 2014).Las pasturas de gramíneas y leguminosas son capaces de producir la misma cantidad de forraje por año que produciría una pastura constituida solamente por gramíneas, sin embargo, la combinación con leguminosas puede aportar al suelo una dosis de fertilizante equivalente a 200 kg/ha de nitrógeno por año, lo que reduciría la necesidad de fertilización nitrogenada (Cuadrado *et al*, 2003).

7.5. Proteína

Los análisis de proteína fueron llevados a cabo por el laboratorio de nutrición vegetal de la Universidad Nacional de Colombia.

En la figura 5 se presenta el comportamiento de la proteína en el forraje para los tratamientos evaluados. Allí podemos ver que el lapso en donde se presenta mayores niveles de proteína es entre los 45 a 50 días de rebrote para todos los tratamientos. A partir del día 50 se empieza a disminuir el contenido proteína en los forrajes. Al día 60 es donde se presentan los niveles más bajos de proteína. Sin embargo, el análisis de varianza determinó que no existen diferencias significativas a través del tiempo.

El tratamiento control presentó una media inferior a la media de los demás tratamientos, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos 1, 2 y 3. No obstante, entre estos y el tratamiento control para todos los tiempos evaluados hubo diferencias estadísticamente diferentes.

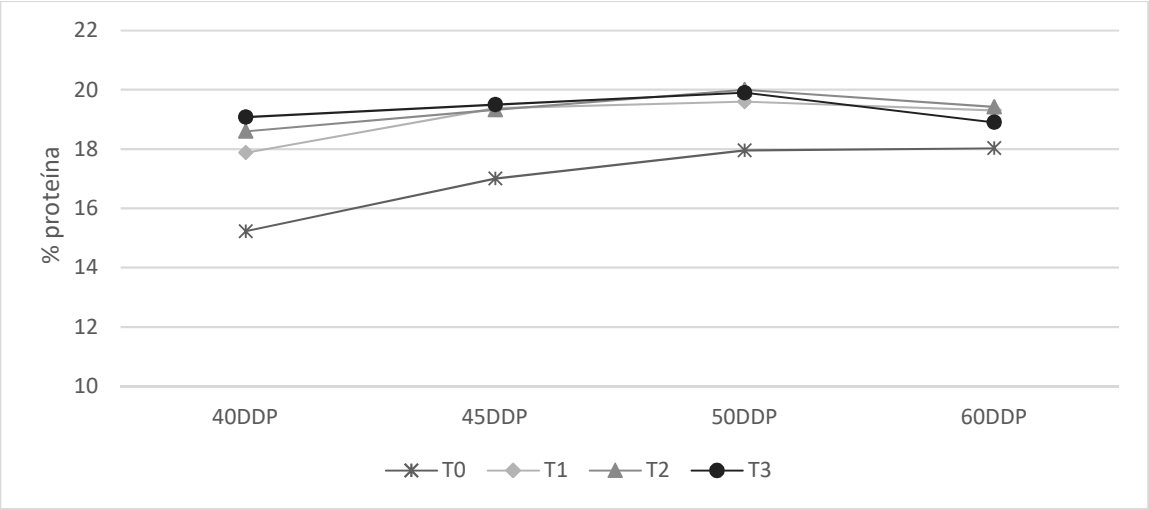


Figura 5. Comportamiento de la proteína del forraje para los tratamientos evaluados.

Según Soto *et al*. (2005), la edad de corte puede modificar la composición química del pasto kikuyo. En dicho trabajo la edad de corte afectó ligeramente la composición química del pasto. El autor sustenta que este fenómeno puede ocurrir debido al hábito de crecimiento del kikuyo, el cual favorece la relación hoja-tallo, ya que la hoja no se modifica substancialmente con la edad, lo que impide que la composición química del pasto cambie tan marcadamente como sucede con otras gramíneas forrajeras. En el mismo sentido, Espinosa y Usuga (2008) indican que la proteína cruda presenta una disminución con relación a la edad de rebrote, lo cual tiene un comportamiento indirectamente proporcional. Es decir, la proteína cruda disminuye al aumentar el tiempo de desarrollo del pasto. Aunque en la figura 3 se presenta una ligera disminución de la proteína en el pasto, esta no es estadísticamente diferente a través del tiempo.

7.6. Digestibilidad

En la figura 6 se presenta el comportamento de la digestibilidad en cada uno de los tratamientos evaluados. Estadísticamente no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ni en los estadios de corte evaluados (prueba del rango múltiple de Duncan ($p \leq 0,05$)).

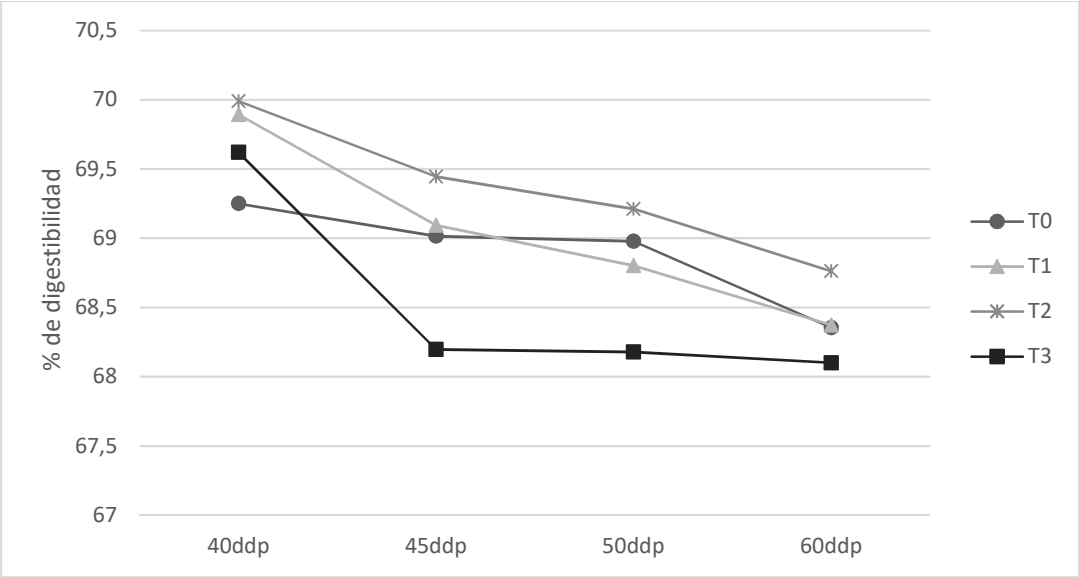


Figura 6. Comportamiento de la digestibilidad del forraje con los diferentes tratamientos de fertilización en diferentes estadios de corte.

En la figura 6 se observa cómo a través del tiempo la digestibilidad disminuye. Todos los tratamientos coinciden en que la digestibilidad más baja se presentó en el día 60 de corte. Estos resultados corroboran los encontrados en el estudio de Soto, *et al*. (2005), quienes no encontraron diferencias significativas en la digestibilidad del forraje, en relación con las diferentes edades de corte ni entre tratamientos con diferentes concentraciones de nitrógeno como consecuencia de la fertilización.

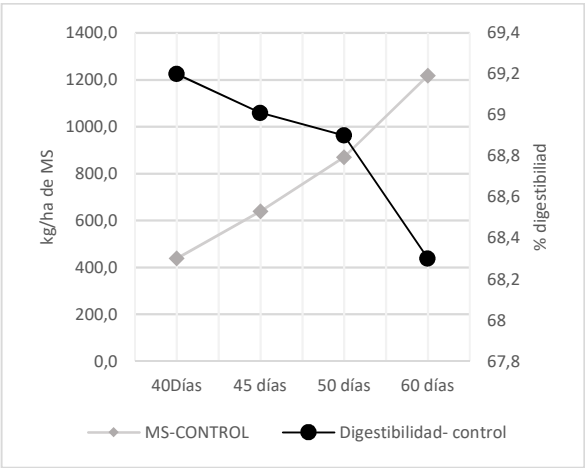
A pesar de que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, se aprecia una disminución del porcentaje de digestibilidad a medida que transcurre el tiempo, en especial a los 60 días de descanso. Esto concuerda con el trabajo de Naranjo (2002), quien encontró una disminución en los niveles digestibilidad del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum)* a medida que la edad incrementa. Sustenta que esto se debe al aumento en los niveles de lignina. Dicho autor reporta niveles máximos de digestibilidad de 72,72 % a los 28 días de descanso. En este estudio, el nivel máximo encontrado fue de 69,9 % al día 40.

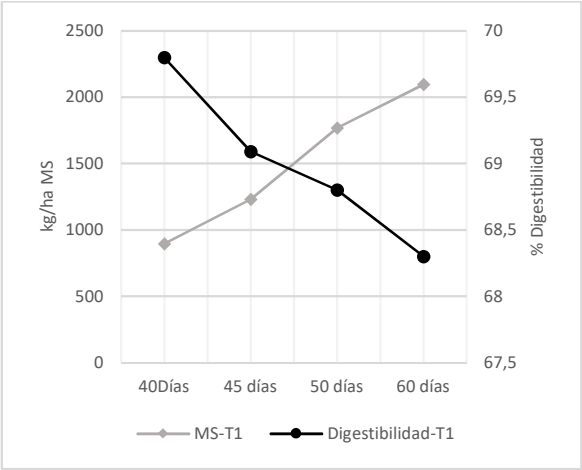
El nivel de fertilización de las praderas no tuvo un efecto significativo (prueba del rango múltiple de Duncan ($p \leq 0,05$)) sobre la digestibilidad, es decir que no hay una diferencia

entre el tratamiento control (sin fertilizante) y los demás tratamientos que se evaluaron (todos con fertilizante). A pesar de que en este estudio no se presentó diferencias significativas, Castañeda, *et al*. (2008), quien evaluó el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la digestibilidad del pasto kikuyo, encontró que la digestibilidad se afecta por el nivel de fertilización (P<0,05); ya que cuando se fertilizaron las pasturas de pasto kikuyo, la digestibilidad aumento.

7.6.1. Momento adecuado de pastoreo

Para calcular el momento adecuado de pastoreo se realizó una relación entre la producción de materia seca y la digestibilidad con el fin de determinar el momento exacto en que el pasto está en óptimas condiciones para ser pastoreado teniendo en cuenta una variable de producción Materia seca (kg de MS por hectárea) y una variable de calidad digestibilidad (%).





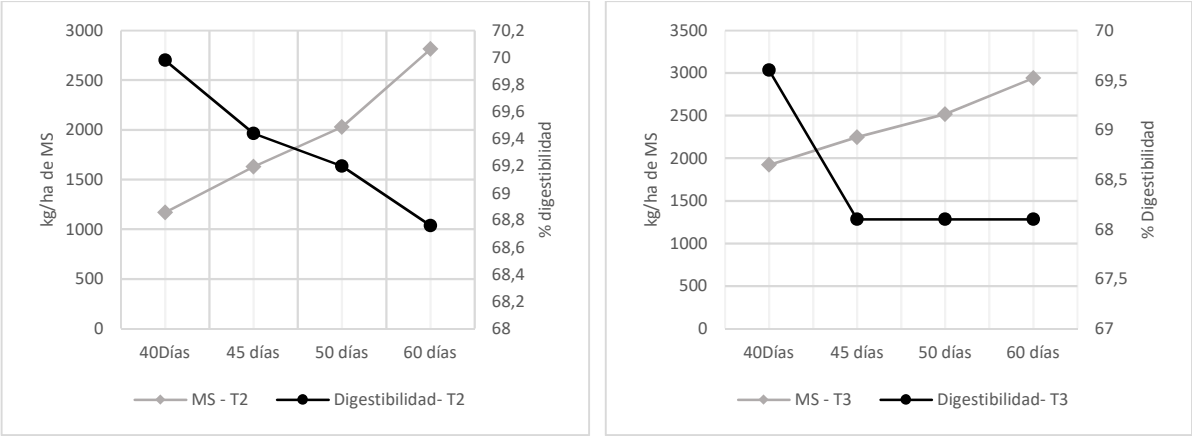


Figura 7. Momento óptimo de cosecha utilizando la relación entre digestibilidad del forraje y producción de materia seca.

En la gráfica 7 se puede observar el momento adecuado de cosecha para cada uno de los tratamientos, se encontró que para el tratamiento control el momento adecuado es después de los 51 días ya que en este punto la digestibilidad empieza a disminuir, para el tratamiento 1 el momento óptimo de pastoreo se presentó a los 49 días, para el tratamiento 2 fue para el día 45 y para el tratamiento 3 se presentó el menor tiempo hacia el día 43.

7.7. Fibras FDN y FDA

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ni entre las unidades productivas donde se estableció el área experimental para ninguna de las dos fibras (FDA y FDN) (prueba del rango múltiple de Duncan ($p \leq 0,05$)).

En las figuras 8 y 9 se muestra una tendencia en la FDN a aumentar a medida que se va aumentando el tiempo de recuperación de la pradera. Resultados similares son presentados por Villalobos y Sánchez (2010), quienes encontraron que, a menor tiempo de recuperación de las praderas, se presentaron menores contenidos de FDA. Este fenómeno indica que el forraje es más aprovechable por el animal a los 40 a 50 días y que le brinda mayor energía para sus requerimientos nutricionales cuando se usa en edades tempanas de desarrollo (40 a 50 días de rebrote) y en condiciones agroclimáticas similares a la micro región de Guatavita.

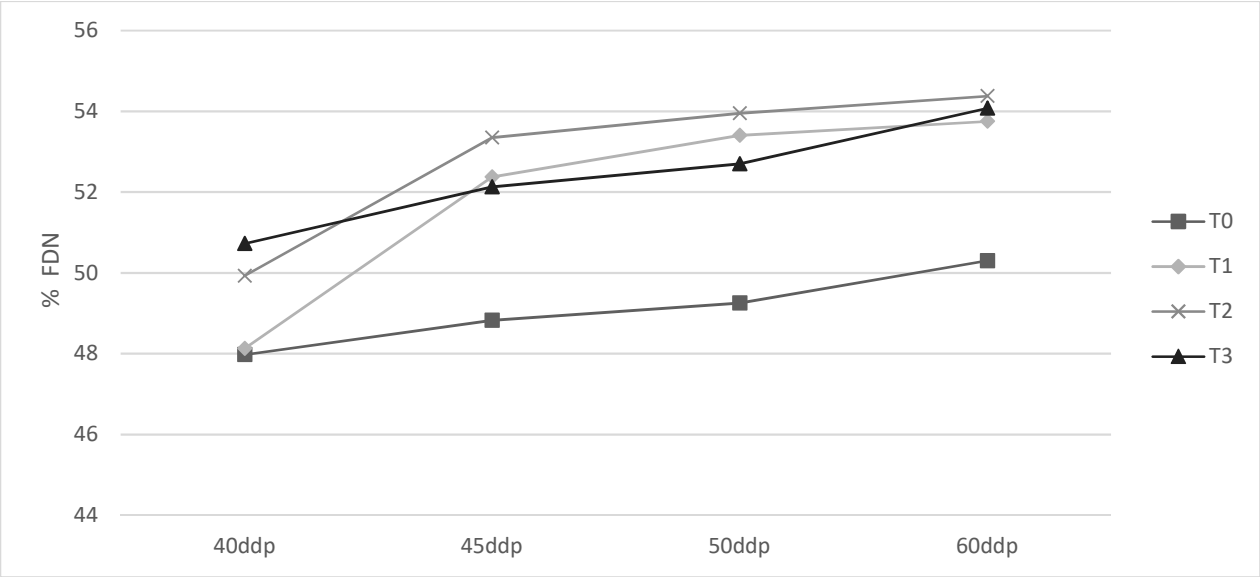


Figura 8. Comportamiento de la digestibilidad del forraje con los diferentes tratamientos de fertilización en diferentes estadios de corte.

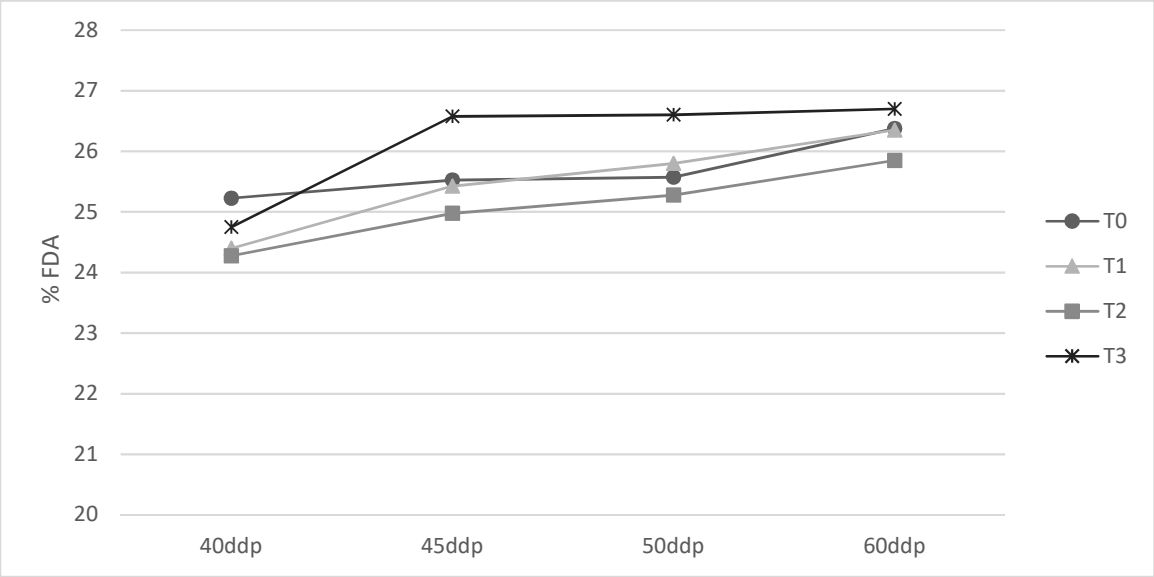


Figura 9. Comportamiento de la FDA del forraje con los diferentes tratamientos de fertilización en diferentes estadios de corte.

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ni entre las unidades productivas donde se estableció el área experimental para ninguna de las dos fibras (FDA y FDN) (prueba del rango múltiple de Duncan ($p \leq 0,05$)).

Se muestra una tendencia en la FDN a aumentar a medida que se va aumentando el tiempo de recuperación de la pradera. Resultados similares son presentados por Villalobos y Sánchez (2010), quienes encontraron que, a menor tiempo de recuperación de las praderas, se presentaron menores contenidos de FDA. Este fenómeno indica que el forraje es más aprovechable por el animal a los 40 a 50 días y que le brinda mayor energía para sus requerimientos nutricionales cuando se usa en edades tempanas de desarrollo (40 a 50 días de rebrote) y en condiciones agroclimáticas similares a la micro región de Guatavita.

No se encontró una diferencia significativa entre los tratamientos de fertilizantes evaluados para ambas fibras (FDA y FDN). Sin embargo, Mejía y Ochoa (2014) observaron una tendencia de disminución de la FDN a medida que aumentaron las dosis de fertilizante.

Finalmente, se evidencia en las gráficas que el tiempo de descanso de las praderas donde se presentaron los valores más bajos tanto de FDN y FDA fue el estadio de 45 días, aunque no se encontró una diferencia significativa.

7.8. Eficiencia en el uso de nutrientes

De acuerdo con la información de la tabla 22, se calcula la eficiencia en el uso del nitrógeno y se determina que en el tratamiento 2 y 3 la producción de materia seca de forraje fue de 26.3 y 27.4 kg por cada kilogramo de nitrógeno aplicado, mientras que, para el tratamiento 1, la producción fue de 19.5 kg de materia seca por kilogramo de nitrógeno aplicado.

Tabla 22. Cantidad de materia seca producida kg/ha con la aplicación de en kg/ha de NPK para cada tratamiento

Tratamientos	Kg/ha MS	Kg N aplicado	Kg P aplicado	Kg K aplicado
Control	1218,04	0	0	0
Tratamiento 1	2095,94	107.3	62.6	97.1
Tratamiento 2	2813,23	106.7	62.2	96.9
Tratamiento 3	2940,83	107.1	62.0	96.6

Eficiencia agronómica (EA)

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 22, el cálculo de la eficiencia agronómica para los tratamientos evaluados arrojó como resultado que los tratamientos 2 y 3 producen 15 y 16.1 unidades de materia seca por cada kilogramo de nitrógeno aplicado y el tratamiento 1 produce 8.2 unidades de MS por cada kilogramo de nitrógeno aplicado. Esto indica el incremento en rendimiento logrado con la aplicación de los tratamientos evaluado para el caso del nitrógeno. Lo anterior se acerca a lo reportado por Hernández (1991), quien encontró que al aportar entre 30 y 80 kg/ha de nitrógeno se obtienen rendimientos de materia seca de entre 20 y 40 kg por cada kg de N aplicado. De acuerdo con Sánchez 2004, la fertilización nitrogenada reduce entre 10 y 15% la producción de materia seca en el primer pastoreo posterior a la fertilización adicionalmente afirma que para que la actividad sea económicamente rentable se debe obtener una respuesta a la fertilización superior a los 10 kg de MS por cada kg de N aplicado. Paladines e Izquierdo (2003), reportan a la aplicación de nitrógeno en pasto kikuyo varía de 15 a 25 kg de materia seca de pasto por cada kg de N aplicado.

Balance parcial de nutrientes (BPN)

El balance parcial es la relación entre el contenido de un elemento en la porción cosechada del cultivo y la cantidad del nutriente aplicado. Este mide la relación entre la remoción y el uso de nutrientes**.**

Tabla 23. Balance parcial de nitrógeno para cada tratamiento evaluado a los 60 días

Tratamientos	Kg/ha MS	Contenido foliar N %	Contenido de N/ha	BPN
Control	1218,04	2,86	34,86	-
Tratamiento 1	2095,94	3,01	63,08	0.59
Tratamiento 2	2813,23	3,03	85,2	0.80
Tratamiento 3	2940,83	3,04	89,4	0.83

De acuerdo con la información de la tabla 23, los tratamientos 2 y 3 presentan un balance parcial de nitrógeno cercano a 1, lo que indica una sostenibilidad en el sistema. Por otra parte, el tratamiento 1 está muy por debajo del 1 lo que indica que existe un exceso en la aplicación de este elemento a la pradera, está generando perdidas de este elemento o las fuentes empleadas no están disponibles para la rápida asimilación de los pastos. Se debe monitorear este tipo de prácticas para evitar posibles deficiencias con el paso del tiempo. Un aspecto importante para considerar en la producción agrícola es el adecuado suministro de nutrientes para satisfacer los requerimientos de un cultivo. Los pastos de clima frio requieren entre 250 y 400 kg de nitrógeno al año para producir entre 7 y 16 toneladas de materia seca de acuerdo con Bernal y Espinosa (2003). El BPN es una herramienta que permite determinar si la dosis aplicada de un determinado nutriente es adecuada para un cultivo y si el manejo que se le está dando es sostenible o se deben tomar medidas correctivas. De acuerdo con Doberman (2005), los valores de BPN en los sistemas deben estar cercanos a 1 lo cual indica que existe un balance entre lo extraído por el cultivo y lo aplicado o suministrado al sistema. Esta es la condición ideal para mantener la fertilidad de suelo. Cuando el valor de BPN es inferior a 1 puede indicar que se está removiendo menos fertilizantes del que se está aplicando, lo que podría indicar pérdidas del nutriente o que la respuesta del cultivo al nutriente está siendo limitada por algún otro factor.

8. Conclusiones y recomendaciones

- El rendimiento de materia seca de los forrajes evaluados incrementó significativamente con la aplicación de los tratamientos de fertilización, respecto al tratamiento control, bajo las condiciones de la investigación. Se obtuvo los mejores resultados para este parámetro con los tratamientos 2 y 3.

- El índice de eficiencia agronómica indica que los tratamientos de fertilización aplicados incrementan entre 11,28 y 22,1 kg/ha de materia seca por kilogramo de nitrógeno aplicado.

- Algunos microorganismos benéficos, como aerobios comunes, bacterias fijadoras de nitrógeno y bacterias solubilizadoras de fósforo, incrementaron significativamente sus poblaciones en el suelo, para los tratamientos que incluían la aplicación de materia orgánica.

- Después de la implementación de los tratamientos de fertilización se evidenció un aumento, con respecto al tratamiento control, en el porcentaje de especies leguminosas como trébol blanco (*Trifolium repens*), trébol rojo (*Trifolium pratense*) y lotus (*Lotus uliginosus*) en las diferentes unidades productivas evaluadas.

- La proteína del forraje incrementó significativamente con la aplicación de los tratamientos de fertilización con respecto al control, por lo que se concluye que la fertilización tiene un efecto positivo sobre esta variable. Sin embargo, los tiempos de corte evaluados no presentaron ningún efecto sobre la proteína en los forrajes.

- Para los parámetros de FDA, FDN y digestibilidad, no se presentaron diferencias significativas para los tratamientos evaluados, por lo que se concluye que la fertilización para las condiciones de este estudio no afecta la composición de los pastos en cuanto a contenido de fibras ni digestibilidad.

- Los tiempos de pastoreo evaluados no influyeron en el contenido de fibras ni en la digestibilidad de los pastos.

- El balance parcial de nitrógeno determinado para los tratamientos arrojó un valor cercano a 1 para todos los tratamientos de fertilización evaluados, lo que indica una sostenibilidad en el sistema. Sin embargo, en el caso de utilizar como plan de fertilización el tratamiento 1, se deberá monitorear para evitar posibles deficiencias en el sistema ya que el BPN arrojó un valor inferior a 1.

- El balance parcial de nitrógeno del tratamiento 2 y 3 arrojó un valor superior a 1, lo que indica que pueden llegar a presentarse excesos de fertilización nitrogenada en estos dos planes de fertilización.

- Teniendo en cuenta las condiciones de este estudio, es muy importante en el manejo de fertilidad de las pasturas la evaluación y neutralización de la acidez intercambiable de los suelos, la cual es la primera limitante en la nutrición de las plantas. Este manejo se realiza por medio del encalado que debe estar basado en un análisis de suelos y que debe realizarse en caso de que la saturación de aluminio super el 20%.

Bibliografía

Abreu, A. y Petri, H. A. (1998). Uso del MUN (nitrógeno ureico en leche) para diagnosticar balance proteína-energía en la dieta de vacas lecheras Holstein en pastoreo en el altiplano cundiboyacense (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Adeboye, M. K., Iwuafor E. N. y Agbenin, J. O. (2006). The Effects of Crop Rotation and NitrogenFertilization on Soil Chemical and Microbial Properties in a Guinea Savanna Alfisol of Nigeria. *Plant Soil, 281*(1-2), 97-107.

Akin, D. E. Borneman, E. S. y Lyon, C. E. (1990). Degradation of leaf blades and steam by monocentric and polycentricisolatesof rumial fungi. *Animal Feed Science technology, 31,* 205- 221.

Allen, G. J., Chu, S. P., Harrington, C. L., Schumacher, K., Hoffman, T., Tang, Y., Grill, E. y Schroeder, J. I. (2001). A defined range of guard cell calcium oscillation parameters encodes stomatal movements. *Nature, 411*, 1053-1057.

Anthonisen, A. C., Loehr, R. C. PrakasamT. B. S. y Srinath, E. G. (1976). Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Water Pollution Control Federation*,*48*(5), 835-852.

Apráez, E. y Moncayo, O. A.(2000). Caracterización agronómica y bromatológica de una pradera de kikuyo (*Pennisetumclandestinum* Hoechst) sometida a rehabilitación mediante labranza y fertilización orgánica y/o mineral. *LEAD, 10*, 25-35

Arias, E., Sadeghian, S., Mejía, B. y Morales, C. S. (2009). Lixiviación del nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Cenicafé, 60*(3), 239-252.

AssociationofOfficialAgriculturalChemists(1984). *Agronómica, Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales.*Washington, D.C., EE. UU. d. Técnico:OfficialMethodsofAnalysis.

Avella, A. M., Torres, R. S., Gómez, W. A. y Pardo, M. P. (2014). Los páramos y bosques altoandinos del pantano de Monquentiva o pantano de Martos (Guatavita, Cundinamarca, Colombia): caracterización ecológica y estado de conservación. *Biota Colombiana 15*(1), 3-39.

Ayres J. F., Blumenthal, M. J.,Laney, L. A.y O'connor, J. W. (2006). Birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) and greater lotus (*Lotus uliginosus*) in perennial pastures in eastern Australia adaptation and applications of lotus-based pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture, 46*(4), 521-534.

BalocchI, O. y López, I. (1996). Especies pratenses nativas y naturalizadas del sur de Chile. EnL. Latrille. (Ed.),*Producción Animal* (pp. 65-81). Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Bauchart, D., Verité, R.yRémond, B. (1984). Long-chain fatty acid digestion in lactating cows fed fresh grass from spring to autumn.*Canadian Journalof Animal Science, 64*(5), 330-331.

Baumer, R. (1999). Fertilización profunda del girasol en labranza convencional y siembra directa. *FertiPASA, 13*, 5-7.

Belyea, R. L.,Steevens, B., Garner, G., Whittier, J.y Sewell, H.(1996)*Using NDF and ADF to Balance Diets*.Columbia, EE. UU.: Universityof Missouri Extension.

Benavidez, R. A., Boschetti, N. Q., Quintero, C. E., Barrera, R. yGonzález, A. (2000). Evaluación de la fertilización fosfatada de los suelos para los principales cultivos extensivos de Entre Ríos. *Ciencias docencia y tecnología, 21*, 221-266.

Benito, B., Roig, S. y San Miguel, A. (2000). *Especies de gramíneas y leguminosas de interés pastoral: morfología y características ecológicas y pascícolase.*Madrid, España: Fundación Conde del Valle de Salazar.

Bernal, E. J. (1998). Fertilización de pastos mejorados. En R. Guerrero. (Ed.). *Fertilización de cultivos en clima frío* (p. 309-359). Bogotá, Colombia: Monómeros ColomboVenezolanos.

Bernal. L. J. (2003) *Pastos y forrajes tropicales: producción y manejo*. Bogotá, Colombia:Ideagro.

Bertch, F. (2005). Estudio de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. *Informaciones agronómicas, 57*, 1-10.

Boada Cuevas, P. (2011). *Caracterización climatológica de la cuenca alta del río Bogotá* (tesis de pregrado). Universidad de La Salle, Bogotá.

Boschetti, N. G., Quintero, C. C., Lucca, C. yQuinodoz, E. (2000). Respuesta de una pastura de alfalfa al encalado y fertilización con fósforo y molibdeno. *Revista de laFacultad de Agronomía 20*(1), 105-110.

Braga, A. P., Ribeiro, H. U., Batista, P., Batista S, Lopes, S. H.y Alves, Z. C.(2001).Composição químico-bromatológica das silagens de capim-elefante cv. Cameron em cinco idades de corte. *Revista Caatinga, 14*(1-2), 17-23.

Bragachini, M. y Méndez. A. (2005). Alternativas de aplicación de fertilizantes. *Simposio de fertilidad 2005,Inpofos,* 71-76.

Brand, T. S.,Franck, F.y Coetzee, J.(1999).Kikuyu (*Pennisetumclandestinum*) pasture for sheep. 1. Pasture quality and nutrient intake of ewes.*New Zealand Journal of Agricultural Research, 42*(4), 459-465.

Brock, J. L. y Hay, R. J. M. (1993). An ecological approach to forage management. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association, 56*, 837-842.

Brock, J. L. y Kim, M. C. (1994). Influence of the stolon/soil surface interface and plant morphology on the survival of white clover during severe drought stress. *Proceedingsofthe New ZealandGrasslandAssociation, 56*, 87-191.

Buelvas, M. (2009). Evaluación de tres tipos de fertilizantes sobre la producción de biomasa y calidad nutricional del pasto maralfalfa (*Pennisetumsp*) cosechado a cuatro estadios de crecimiento diferentes (tesis de pregrado).Universidad de la Salle, Bogotá.

Canet R. (2007). *Aplicación agrícola de materia orgánica: Importancia y aspectos generales.* Valencia, España: Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA).

Cárdenas, E. A. (2003). *Evaluación de una alternativa para disminuir el impacto ambiental que causan los fertilizantes nitrogenados en las pasturas de clima frío en Colombia* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Cárdenas, E. A. (2005). *Alternativas forrajeras para clima frío en Colombia.* Recuperado de: https://es.scribd.com/doc/74111208/gramineas-climas-frios

Cardona, H. J. (2011). *Efecto del manejo del pastoreo y la suplementación alimenticia en vacas lactantes de sistemas especializados sobre su metabolismo energético y proteico y el contenido de proteína en la leche* (tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Caro, F. y Correa, H. J.(2006). Digestibilidad posruminal aparente de la materia seca, la proteína cruda y cuatro macrominerales en el pasto kikuyo (*Pennisetumclandestinum*) cosechado a dos edades de rebrote. *Livestock Research for Rural Development, 8*(10).Recuperado de http://www.lrrd.org/lrrd18/10/caro18143.htm

Carpenter, J. R.(1999). Effect of age (maturity) of kikuyu grass on digestibility. En *Memorias II. Seminario internacional sobre calidad de leche y prevención de la mastitis*(pp. 33-55). Medellín, Colombia.

Carulla, J. E. (1999). Efectos de la fertilización nitrogenada sobre la proteína del forraje. En *Simposio Internacional sobre la proteína en la leche*. Medellín, Colombia. Recuperado de http://biblioteca.colanta.com.co/pmb/opac_css/doc_num.php?explnum_id=679

Carulla, J., Cárdenas, E. A.,Sánchez, N. y Riveros, C. (2004). Valor nutricional de los forrajes más usados en los sistemas de producción lechera especializada en la zona andina colombiana. En *Seminario Nacional de Lechería Especializada: "Bases Nutricionales y su Impacto en la Productividad"*(p. 21-38). Medellín, Colombia.

Casler, M. D., Fales, S. L., McElroy, A. R., Hall, M. H., Hoffman, L. D. y Leath, K. T. (2000). Genetic progress from 40 years of orchardgrass breeding in NorthAmerica measured under hay management. *CropScience 40*(4), 1019-1025.

Casler, M. D. (2001). *Breeding forage crops for increased nutritional value; Advances in Agronomy, 71*, 51-107

Castañeda, M., Duque, M., Galvis, D. y Correa, H. (2008).Efecto de la fertilización nitrogenada y de la edad de corte sobre la digestibilidad intestinal in vitro de la proteína del pasto kikuyo (*Pennisetumclandestinumhochst*), *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 61*(2), 4646-4653.

Castro, R. E, Mojica, R. J. E, León J. M, Pabón M. L, Carulla F. J. E. y Cárdenas R. (2008). Productividad de pasturas y producción de leche bovina bajo pastoreo de gramínea y gramínea + *Lotus uliginosus* en Mosquera, Cundinamarca. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, *55*(1), 9-21,

Chamorro, D. y Rey, A. (2010). Los sistemas silvopastoriles como estrategia de ganadería ecológica y productiva[blog]. Recuperado de https://www.engormix.com/ganaderia-leche/articulos/los-sistemas-silvopastoriles-como-t28359.htm

Chiapusio, G., Pujol, S., Toussaint, M., Badot, P. y Binet, P. (2007). Phenanthrene toxicity and dissipation in rhizosphere of grassland plants (Loliumperenne L. and Trifoliumpratense L.) in three spiked soils. *Plant and Soil, 294*(1-2), 103-112.

Clapham, W. M., Foster, J. G., Neel, J. P.yFedders, J. M.(2005). Fatty acid composition of traditional and novel forages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53*(26), 10068- 10073

Consejo Regional de la Cadena Láctea de Antioquia (2001). *Acuerdo de competitividad de la cadena láctea de Antioquia*. Medellín, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Cooper, J. P. (1970). Potential production and energy conversion in temperate and tropical grasses. *HerbageAbstracts, 40*, 1-15.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2003). *Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del rio Bogotá. Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Correa, H. J., Cerón, J. M., Arroyave, H.y López, A. (2004). Pasto maralfalfa: mitos y realidades. En *Cooperativa Colanta*. IV seminario internacional Competitividad en carne y leche (pp. 231-274).

Correa, H.J.(2006). *Perfil de mercado de semillas forrajeras-Colombia. "Monitoreo nutricional y metabólico en hatos lecheros".* Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Correa, H., Carulla, J. y Pabón, M. (2008). *Valor nutricional del pasto kikuyo(Pennisetumclandestinum Hoechst Ex Chiov) para la producción de leche en Colombia (una revisión): I. Composición química y digestibilidad ruminal y posruminal*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Covington, M. F. y Harmer, S. L.(2007). The circadian clock regulates auxin signaling and responses in Arabidopsis. *PLoS Biol. 5*(8), 1773-1784

Czerkawski, J. W. (1967). Effect of storage on the fatty acids of dried ryegrass.*British Journal of Nutrition, 21*(3), 599-599

Dalias, P., Anderson, J. M., Bottner, P. yCoueaux, M. M.(2002). Temperature responses of net N mineralization and nitrification in conifer forest soils incubated under standard laboratory conditions. *SoilBiology and Biochemistry, 34*(5), 691-701.

Damodaran, S. (2000). Aminoácidos, péptidos y proteínas. EnO. R. Fennema. *Química de los alimentos* (pp. 502-503). Zaragoza, España: Acribia.

Darwich, N. (1998). *Nitrógno. Manual de fertilización de suelos y uso de fertilizantes*. Mar del Plata, Argentina: Taller de gráficas Armedenho.

Decruyenaere, V., Buldgen, A. yStilman, T.D. (2009). Factors affecting intake by grazing ruminants and related quantification methods: a review. Biotechnol. *Agron. Soc. Environ. 13*(4), 559-573.

Del Pozo, P.P. (2002). Bases ecofisiológicas para el manejo de los pastos tropicales. *Revista Pastos. Revisión Científica, 32*(2), 109-137.

Dennison, C. y Phillips A. M. (1983). Estimation of the duodenal amino acids supply in ruminants by amino acid analysis of the productos of digestion in vitro.*South AfricanJournalof Animal Science, 13*(2), 120-126.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2016). *Tercer Censo Nacional Agropecuario"Hay campo para todos".*Bogotá, Colombia: DANE.

Dewhurst, R. J., Scollan, N. D., Youell, S. J., Tweed, J. K. S.y Humphreys, M. O.(2001). Influence of species, cutting date and cutting interval on the fatty acid composition of grasses.*Grass and ForageScience, 56*(1), 68-74.

Di Marco, O. (2011). Estimación de la calidad de los forrajes. *Producir XXI, 20*(240), 24-30.

Díaz, A. (2001). *Producción de biomasa de (Eichhorniacrassipes) en aguas residuales porcinas.*(tesis de maestría). Universidad de Granma, Bayamo, Cuba.

Dobermann, A. (2007) Nutrient use efficiency. Measurement and management. En A. Kraus, K. Isherwood and P. Heffer. (Eds.), *Fertilizers Best Management Practices. Proceeding of International fertilizer Industry Association* (pp. 1-22). Bruselas, Bélgica.

Donaghy D. y Fulkerson, B. (2001). *Principles for developing an effective grazing management system for ray grass-based pastures*. Burnie, Tasmania: Tasmanian Institute of Agricultural Research,

Dugmore, T. J.(1998). Energy and mineral content of kikuyu. En P. E. Bartholomew. (Ed.) *Proceedings of a Kikuyu Technology Day, held at Cedara on 25 November.*Pietermaritzburg, Sudáfrica: KwaZulu-Natal Department of Agriculture.

Elgersma, A., Ellen, G., van der Horst, H., Muuse, B. G., Boer, H.yTamminga, S.(2003). Comparison of the fatty acid composition of fresh and ensiled perennial ryegrass (Loliumperenne L.), affected by cultivar and regrowth Interval.*Animal Feed Science and Technology, 108*(1-4), 191-205

Escobar, A. y Carulla, J. (2003). Efecto de la oferta de forraje sobre los parámetros productivos y composicionales de la leche en la sabana de Bogotá.*Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 16*(74).

Espinosa, J. (1998). Fertilizantes e impacto ambiental. *Suelos Ecuatoriales, 28*, 23-25

Espinosa, J. y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos.*Quito, Ecuador: International PlantNutritionInstitute.

Espinosa, J., Bernal, J. (2003). *Manual de nutrición y fertilización de pastos*. Quito, Ecuador: International PlantNutritionInstitute.

Espinosa, C. yUsuga, A. (2008).*Evaluación de modelos de crecimiento e implementación del sistema de fraccionamiento de proteínas y carbohidratos de Cornell en las pasturas del CIC Santa María para la optimización del sistema de alimentación del ganado de leche.*Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle.

Farnham, D. E. y George, R. (1994). Dinitrogen fixation and nitrogen transfer in birds foot trefoilor chard grass communities.*AgronomyJournal, 86,* 690-694.

Fassebender, H. W. y Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina.*San José, Costa Rica: Servicio editorial IICA.

Forbes, J. M. (1986). *The voluntary food intake of farm animals*. Londres, Inglaterra: Butterworths.

French, P., Stanton, C., Lawless, F., O'Riordan, E. G., Monahan, F. J., Caffrey, P. J. y Moloney, A. P. (2000). Fatty acid composition, including conjugated linoleic acid, of intramuscular fat from steers offered grazed grass, grass silage, or concentrate-based diets.*Journal of Animal Science, 78*(11), 2849-2855

Fukumoto, G. K. yLee, C. N. (2003). *Kikuyugrass for Forage.* College of Tropical Agriculture and Human Resources, Recuperado dewww.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/LM-5.pdf.

Fulkerson, W. J., Slack, K. y Havilah, E. (1999). The effect of defoliation interval and height on growth and herbage quality of kikuyu grass (*Pennisetumclandestinum*).*Tropical Grasslands, 33,* 138-145

Gandarillas, A., Oruño, N., Sivila, R., Albornoz, I., Oswald, A. yPerry, S. (2012). *Desarrollo de bioinsumos para la producción sostenible de hortalizas con pequeños agricultores para una soberanía alimentaria en los Andes.*

Gobernación de Cundinamarca (2014). Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013. Bogotá, Colombia: Gobernación de Cundinamarca.

Gómez, M. I. (2004). *Fertilización estratégica en el manejo eficiente de la variable nutricional de los cultivos. Seminario de Investigación. Curso Fertilidad de Suelo*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, M. I. (2011). *Criterios para el diagnóstico, interpretación y recomendación de nutrientes y fertilización de cultivos. Catedra Fertilizantes y Fertilización.*Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Gonçalves, C. A., Camarão, A. P.,Simão, M., y Dutra, S.(1997).Consorciação de gramíneas e leguminosas forrageirascom e semfertilização fosfatada no nordeste paraense, Pará.*Reunião da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 34*, 42-44.

Gonzales, L., Rossi, C., Pereyra. A., De Magistris, A., Lacarra, H., Varela, E. (2008). Determinación de la calidad forrajera en un pastizal natural de la región del delta bonaerense argentino. *Zootecnia Tropical, 26*(3), 223-225.

Google. (2016). Mapa de parcelas demostrativas Guatavita Cundinamarca, Colombia en Google Earth. Recuperado el 15 de abril de 2016.

Grabber, J. H., Ralph, J., Lapierre, C.yBarrière, Y.(2004).Genetic and molecular basis of grass cell-wall degradability. I. Lignin–cell wall matrix interactions. *ComptesRendusBiologies, 327*(5), 455-465.

Grundmann, G. L., Renault, L. Rosso, L. y Bardin, R.(1995). Differential effects of soil water content and temperature on nitrification and aeration. *SoilScienceSocietyofAmerica. 59*(5), 1342-1349.

Guerrero, R. R. (1993). *Fertilización de cultivos de clima frío*. Bogotá, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos.

Haneklaus, S., Bloem, E. ySchnug, E. (2006). *Handbook of Plant Nutrition. Azufre*. Braunschweig. Alemania: Editorial Taylor & Francis Group.

Henderson, M. S. y Robinson, D. L. (1982). Environmental Influences on Fiber Component Concentration in Herbage of Warm Season Perennial Grasses. *Agronomy Journal, 74*(3), 573-579.

Hofman, G. y Van Clemptum, P.(2004). *Soil and plant nitrogen*. París, Francia: International Fertilizer Indutry association (IFA).

Huhtanen, P., Rinne, M., y Nousianen, J. (2008). Evaluation of concentrates factors affecting silage intake of dairy cows: a development of the relative total diet intake index. *Animal, 2*(6), 942-953.

IDE, G. (1996). *Caracterización fenológica y productiva de Arrhenatherumelatiusspp,Bulbosus, Agrostiscapillaris, Bromusvaldivianus y Holcuslanatus en el 95. Dominio Húmedo de Chile.*(tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

Jaimes, L. y Correa, H. J. (2016). Balance de nitrógeno, fósforo y potasio en vacas Holstein pastando praderas de kikuyo (*Cenchrusclandestinus*) en el norte de Antioquia. *Revista CES medicina veterinaria y zootecnia, 11*(2), 18-41.

Juárez F. I, Fox, D.G, Blake R. W, y Pell A. N. (1999). Evaluation of tropical grasses for milk productionby dual-purpose cows in tropical Mexico.*JournalofDairyScience, 82*(10), 2136-2145.

Jung, H. G.y Vogel, K. P.(1986).Influence of lignin on digestibility of forage cell wall material.*Journalof Animal Science, 62*(6), 1703-1712.

Kaiser, A. G., Piltz, J. W., Hamilton, J. F.y Havilah, E. J.(2001). *Effect of Time of Day on the WaterSoluble Carbohydrate Content of Kikuyu Grass*.Roma, Italia: FAO, Electronic Conference on Tropical Silage.

Kamstra, L. D., Stanley, R.W yIshizaki S.M. (1966). Seasonal and Growth Period Changes of Some Nutritive Components of Kikuyu Grass.*The Journal of Range Management 19*(5): 288-291.

Kim, T. W., Jung, W. J., Lee, B., Yoneyama, T., Kim, H. y Kim, K. (2003). P effects on N uptake and remobilization during regrowth of Italian ryegrass (*Loluimmultiflorum*). *Environmental and Experimental Botany, 50*(3), 233-242.

Lane, L., Ayres, J. y Lovett, J. (2000). *The biology of* Trifoliumrepens *L. (White Clover).*Australia: AustralianGovernment.

Laredo, M. A. y Mendoza P. E. (1982). Valor nutritivo de pastos de zonas frías. I pasto kikuyo (*Pennisetumclandestinum* Hochst). Anual y estacional.*Revista ICA (Bogotá), 17*, 157-167

León, J., Mojica, J. E., Castro, E., Cárdenas, E., Pabón, M. L. y Carulla, J. E. (2007). Balance de nitrógeno y fósforo de vacas lecheras en pastoreo con diferentes ofertas de kikuyo (*Pennisetumclandestinum*) y suplementadas con ensilaje de avena (*Avena sativa*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 21*(4), 559-570.

León, J. (2000). Botánica de los cultivos tropicales. San José, Costa Rica:Editorial Agroamérica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Lisk, D. J. (1972). Trace metals in soils, plants and animals. *AdvAgron, 24*, 267-325.

Lobo, M. ySánchez, O. (2001). Agrostología San José, Costa Rica: Euned.

Losinno, B. y Conti, M. E. (2005). Evolución temporal del potasio en 30 años de agricultura continúa en el noreste de pampa ondulada. *Informacionesagronómicas, 26*, 23-35

Marais, J. P. (2001). Factors affecting the nutritive value of kikuyu grass (*Pennisetumclandestinum*) - A review.*Tropical grasslands, 35*(2), 65-84

Marschner, H. (1998). *Mineral Nutrition of Higher Plants*.Londres, Inglaterra: Harcourt Brace & Company Publishers.

Mejía, T.A., Ochoa R. y Sierra M. (2014). *Efecto de diferentes dosis de fertilizante compuesto en la calidad del pasto kikuyo (PennisetumclandestinumHochst. Ex Chiov).*Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.

Melgar, R. y Díaz, M.Z. (2008). *Fertilización de cultivos y pasturas*. Buenos Aires, Argentina: Ed. Hemisferio sur.

Merhaut, D. (2006). *Handbook of plant nutrition. Calcio*. Los Ángeles, EE. UU.: Ed. Taylor & Francis Group.

Mieres, J. (2004).*Guía para la alimentación de rumiantes, Serie Técnica 142.*Montevideo, Uruguay: Unidad de Agronegocios y Difusión del INIA.

Mila, A. y Corredor, G. (2004). Evolución de la composición botánica de una pradera de kikuyo (Pennisetumclandestinum) recuperada mediante escarificación mecánica y fertilización con compost. *RevistaCorpoica, 5*(1), 70-75.

Miles, N., Thurtell, L.yRiekert, S.(2000). Quality of Kikuyu herbage from pastures in the Eastern Cape coastal belt of South Africa. *South African Journal of Animal Science, 30*(1), 85-86.

Miles, G.P., Samuel, M. A., Jones, A. M. y Ellis, B. E. (2004). Mastoparan rapidly activates plant MAP kinase signaling independent of heterotrimeric G proteins. *Plant Physiol, 134*(4), 1332-1336.

Miller, L.A., Moorby, J.M., Davies, D.R. (2001). Increased concentration of water-soluble carbohydrate in perennial ryegrass (*Loliumperenne*): milk production from late lactation dairy cows. *Grass Forage Sci, 56*(4), 383–94.

Mills, H.A. y Benton, J.J. (1996). *Plant Analysis Handbook. A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*. EE. UU.: Ed. Micro macro Publishing.

Muñoz, M. (1980). *Flora del Parque Nacional Puyehue*. Santiago, Chile: Universitaria.

Murillo, M.G. (2003). *Potencial forrajero del trébol pata de pájaro (Lotus corniculatus) en ecosistemas de trópico de altura* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Muscolo, A., Panuccio, M. R.ySidari, M.(2003).Effects of salinity on growth, carbohydrate metabolism and nutritive properties of kikuyu grass (PennisetumclandestinumHochst).*PlantScience, 164*(6), 1103-1110.

Naranjo, H. (2002). Evaluación nutricional del pasto kikuyo a diferentes edades de corte. Planta de concentrados, sales y fertilizantes-Colanta.

OregonStateUniversity (1999). *Brochure: Perennial Ryegrass. Oregon Ryegrass Growers Seed Commission.*

Osorio, F.(1999). Efecto de la dieta sobre la composición de la leche. En*Memorias del I Seminario Internacional sobre avances en nutrición y alimentación animal.* Medellín, Colombia

Palacio, M.C. (2007). *Fertilización del pasto kikuyo con nutrimonnutriocho.* Recuperado de http://www.monomeros.com/descargas/dpinformativo4.pdf.

Paladines, O., Izquierdo, F. y Salazar, M. (2003). Fertilización de pasturas. *Cultivos controlados, 9*(43), 18-20

Pearson. D. (1993).*Técnicas de laboratorio para el análisis de alimentos.* Zaragoza, España: Acribia S.A.

Peng, Y., Zhang, X., Deng, Y. y Ma, X. (2008).Evaluation of genetic diversity in wild orchardgrass (*Dactylisglomerata L.*) based on AFLP markers. *Hereditas, 145*(4), 174-181

Pérez, J.M. (2014). *Estrategias para la renovación de praderas degradadas en la hacienda Los Pulpitos* (tesis de pregrado). Corporación Universitaria Lasallista Facultad de Ciencias Administrativas y Agropecuarias Industrias Pecuarias, Caldas, Antioquia.

Pilbeam, D.J., Morley, P.S. (2006). *Handbook of plant nutrition. Calcio.*Londres, Inglaterra: Ed. Taylor & Francis Group.

Pirela, M. (2005). Manual de ganadería doble propósito: valor nutritivo de los pastos tropicales. Recuperado de http//:www.avpa.ula.ve/docuPDFs/libros_online/manualganadería/sección3/articulo6-s3.pdf

Posada, S., Cerón, J., Arenas, J., Hamedt, J. yÁlvarez, A. (2013). Evaluación del establecimiento de ryegrass (*Loliumsp.*) en potreros de kikuyo (*Pennisetumclandestinum*) usando la metodología de cerolabranza. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 8*(1), 1-10.

Quiroga, D. y Barreto, A. (2002). Respuesta en rendimiento y calidad de una pradera de *Pennisetumclandestinum*degradada a tratamientos de mecanización y aplicación de compost en la sabana de Bogotá (tesis de pregrado).Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Ralph, J.(1996).*Cell Wall Cross-linking in Grasses; Informational Conference with Dairy and Forage Industries*. EE. UU.:DairyForageResearch Center.

Ramírez, C., San Martín, C., Ellies, A. yFinot, V. (1991). El valor indicador ecológico de las malezas del Centro Sur de Chile*. Agro Sur (Chile) 19*(2), 94-116

Rebolledo R., Martínez H., Palma M., Aguilera P. y Klein K. (2004). Actividad de visita de Bombusdahlbomi (Guérin) y Bombusruderatus (F.) (Hymenoptera:Apidae) sobre Trébol Rosado (Trifolium pratense L.) en la IX Región de La Araucanía, Chile. *AgriculturaTécnica, 64*(3), 31-35.

Reeves, M.,Fulkerson, W.J. yKellaway, R.C. (1996). Forage quality of kikuyu (Pennisetumclandestinum): The effect of time of defoliation and nitrogen fertiliser application and in comparison with perennial ryegrass (Loliumperenne). *Australian Journal of Agricultural Research, 47*(8): 1349-1359

Reynolds, C. K. y Kristensen, N. B. (2008). Nitrogen recycling through the gut and the nitrogen economy of ruminants: An asynchronous symbiosis. *J. Anim. Sci. 86*(14): E293-305.

Rodríguez, D.(1999). *Caracterización de la respuesta a la fertilización en producción y calidad forrajera en los valles de Chiquinquirá y Simijaca (Estudio de caso),* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Romero, C y Márquez, O. (2002).Efecto de la fertilización fosforada en pasto *Brachiariahumidicola* sobre la producción láctea de vacas doble propósito. *Revista Científica,XII*(2), 578-580.

Ronnenkamp, D. y Hay, P. (2011). *Análisis de Forrajes e Inventario.* Sitio Argentino de Producción Animal. Recuperado de http://www.produccion-animal.com.ar/tablas_composicion_alimentos/29-analisis.pdf

Russel, J.S. y Webb, H.R. (1976). Climatic range of grasses and legumes used in pasture. Results of a survey conducted at the 11th International Grassland Congress. *Journal of the Astralian Institute of Agriculture Science, 42*, 156-166.

Sánchez, P. A.y Salinas, J. S. (1981). Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in Tropical America. *Advances in Agronomy, 34*, 279-398

Seaney, R.R., Henson, P.R. (1970).Birdsfoot trefoil. *Adv. Agron, 22*, 119-157.

Seguin, P.,Russelle, M. P.,Sheaffer C. C.,Ehlke N. J. y Graham P. H. (2000).Dinitrogen fixation in kura clover and birdsfoot trefoil. Agronomy Journal, 92(6), 1216-1220.

Shao, H. B., W.Y. Song y L.Y. Chu. (2008). Advances of calcium signals involved in plant anti-drought. *C.R. Biol, 331*(8), 587-596.

Silva, A.P., Coral, D.M., Menjivar, J.C. (2005). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la actividad microbial y rendimiento de avena forrajera en un suelo andisol del departamento de Nariño, Colombia. *Acta Agron., 55*(1), 55-63,

Simpson, J. yStobbs J. (1981). Nitrogen supply and animal production from pastures. En F. Morley. (Ed.). *Grazing animals(pp. 261-287).*Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Smith, D. (1973). Influence of drying and storage conditions on non-structural carbohydrates of herbages tissue; a review. *Journal of British Grassland Society, 28*(3), 129-134.

Soto, L., Laredo, M. A. y Alarcón, E.(1980).Digestibilidad y consumo voluntario del pasto kikuyo (PennisetumclandestinumHochst) en ovinos bajo fertilización nitrogenada.*Revista ICA, 15*(2), 79-90.

Soto, C., Valencia, A., Galvis. R. y Correa H. (2005). Efecto de la edad de corte y del nivel de fertilización nitrogenada sobre el valor energético y proteico del pasto kikuyo (PennisetumClandestinum). *Rev Col CiencPec, 18*(1), 17-26.

Soto, S., Rodríguez, J. y Russo, R. (2009). Digestibilidad invitro en forrajes tropicales a diferentes edades de rebrote. *Revista Tierra Tropical, 5*(1), 83-89.

Spears, R. A., Kohn, R. A. y Young, A. J. (2003). Whole-Farm Nitrogen Balance on Western Dairy Farms. *Journal of dairy science, 86*(12, 4178-4186.

Stark, J.M., Firestone, M.K. (1996). Kinetic Characteristics of Ammonium Oxidizer Communities in a California Oak Woodland–Annual Grassland. *Soil Biology & Biochemistry, 28*(10-11).

Steinshamn. H., Hoglind, M., Garmo, T.,Thuen, E. y Brenøe, U. T. (2006). Feed nitrogen conversion in lactating dairy cows on pasture as affected by concentrate supplementation. *Animal feed science and technology, 131*(1-2), 25-41

Sturz, A.V., Christie, B.R., Matheson, B.G. y Nowak, J. (1997). Biodiversity of endophytic bacteria which colonize red clover nodules, roots, stems and foliage and their influence on host growth. *Biology of Fertilization of Soils, 25*(1), 13-19.

Suzuki, C., Kunito, T. Aono, T., Liu, T. y Oyaizu, H.(2005). Microbial indices of soil fertility. *J. Appl. Microbiol, 98*(5), 1062-1074.

Toledo, J. M. (2012).*Manual para la evaluación agronómica*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Treharne, K. J.(1975). Effect of temperature on photosynthetic and photo- respiration activityin tall fescue. EnR. Marcelle. (Ed.),*Environmental and Biochemical and Biocontrol of Photosynthesis* (pp. 61-69). Belgium: Marcell.

Trujillo, A.I. y Uriarte, G. (2003). Valor nutritivo de las pasturas. Recuperado de http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/NUTRICION/TEORICOS/Tema%202.%20Material%20de%20lectura.%20Alimentos.%20Valor%20nutritivo%20de%20las%20pasturas.pdf

Ustarroz E., Latimori, N. y Peuser, R.(1997). Módulo de programación forrajera. Alimentación en bovinos para carne. Córdoba, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Van derHoek, K.W. (1998). Nitrogen efficiency in global animal production. *Environmental Pollution, 102*(98), 127-132

Van Soest, P. J.(1994).*Nutritional ecology of the ruminant*.New York, EE. UU.: Cornell University Press.

Van Soest, P. J., Robertson, J. B. y Lewis, B. A. (1991). Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science, 74*(10), 3583-3597.

Van Soest, P.J., Mertens, D.R. yDeinum, B. Preharvest facrtors influencing qualiiy of conserved forages.*Journalof Animal Science, 47*(3), 712-720.

Villalobos L. (2006). *Disponibilidad y valor nutricional del pasto Ryegrass perenne tetraploide (Lolium perenne) en las zonas altas de Costa Rica* (tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Villalobos L., Sánchez J. (2010). Evaluación agronómica y nutricional del pasto ryegrass perenne tetraploide (Lolium perenne) producido en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. II: Valor nutricional. *Agronomía Costarricense, 34*(1), 43-52.

Wattiaux, M. yArmentano, L. (2002). *Nutrición y alimentación*. Madison, EE. UU.: Universityof Wisconsin.

Watts, K.(2005).*Water soluble carbohydrate content of forages in autumn*. Washington, EE. UU. Recuperado de http://safergrass.org/pdf/WalthamFallgrass.pdf

White, P.J. (2000). Calcium channels in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) -Biomembranes, 1465*(1-2), 171-189.

Whitehead, D. C. (1995). *Grassland nitrogen.* Oxford, Inglaterra: CAB International, International

Wilson, G.P.M. (1985). An Australian Viewpoint. En G. J.Piggot. (Ed.). *Kikiuyo grass farming for high production* (pp. 7-10). Hamilton, New Zealand: Gallagher Electronics Ltd.

Wyss, U., Morel, I.yCollomb, M.(2006). Fatty acid content of three grass/clover mixtures. Grass Science in Europe, 11, 348-350.

Xie, W. G., Zhang, X. Q., Cai, H. W., Liu, W. y Peng, Y. (2010).Genetic diversity analysis and transferability of cereal EST-SSR markers to orchardgrass (*Dactylisglomerata* L.). *BiochemicalSystematics and Ecology,38*(4), 740-749.

Zapata, F.(2000).*Kikuyo. Especies Forrajeras Versión 1.0*. Bogotá, Colombia: Agrosoft Ltda.