

**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MAR**  
**ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN AGRONOMÍA**

**Propuesta técnica-económica para la optimización del proceso de  
ensilaje de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Sureño) como  
alternativa de alimentación en bovinos doble propósito en  
Jicaral, Puntarenas.**

Trabajo de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía

Modalidad Tesis

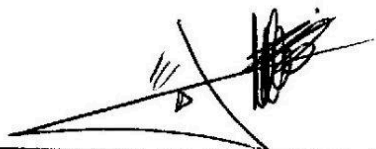
**Bach. Valeria María Arguedas Arce**

**Bach. Yulissa León Sánchez**

Heredia, Costa Rica.

Noviembre, 2025

## MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR



MSc. Andrés Alpizar Naranjo  
Decanato de Ciencias de la Tierra y el Mar



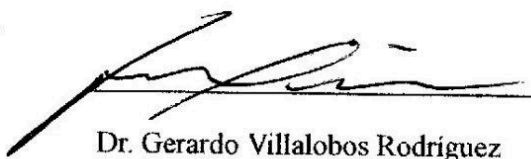
MSc. Alonso Calvo Araya  
Dirección Escuela de Ciencias Agrarias



MSc. Esteban Jimenez Alfaro  
Tutor de tesis



Dr. Carlos Miguel Tobía Rivero  
Asesor de tesis



Dr. Gerardo Villalobos Rodríguez  
Asesor de tesis



Bach. Yulissa León Sánchez  
Sustentante



Bach. Valeria María Arguedas Arce  
Sustentante

## **Resumen**

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar técnica y económicamente el establecimiento del cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Sureño) y su posterior aprovechamiento como ensilaje, como estrategia de suplementación alimenticia en sistemas de producción bovina de doble propósito en Jicaral de Lepanto, Puntarenas. La investigación se desarrolló bajo un enfoque participativo, mediante el intercambio de saberes con productores locales, lo que permitió elaborar un protocolo de manejo agronómico para el establecimiento, mantenimiento y aprovechamiento del cultivo. Se realizaron análisis de composición química y bromatológica del forraje y del ensilaje, evaluando parámetros como materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutro y fibra detergente ácido, con el fin de determinar la calidad nutricional y el potencial del sorgo como fuente alternativa de alimento en época seca. Asimismo, se efectuó un análisis económico del proceso de ensilaje, considerando los costos fijos y variables, la inversión por hectárea y los indicadores de rentabilidad. Los resultados evidenciaron que el sorgo cv. Sureño presenta una producción de biomasa adecuada y una calidad bromatológica competitiva, siendo una alternativa viable y de menor costo frente a otros cultivos forrajeros tradicionales. Se concluye que el uso de sorgo ensilado representa una opción técnica y económicamente sostenible para fortalecer la seguridad alimentaria y la resiliencia de los sistemas ganaderos en zonas de limitada disponibilidad hídrica.

## **Abstract**

The present research aimed to technically and economically evaluate the establishment of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Sureño) and its subsequent use as silage, as a feed supplementation strategy in dual-purpose cattle production systems in Jicaral, district of Lepanto, Puntarenas. The study was developed under a participatory approach through the exchange of knowledge with local producers, which allowed the development of an agronomic management protocol for the establishment, maintenance, and utilization of the crop. Chemical and bromatological analyses were carried out on both the forage and the silage, evaluating parameters such as dry matter, crude protein, neutral detergent fiber, and acid detergent fiber, in order to determine the nutritional quality and the potential of sorghum as an alternative feed source during the dry season. In addition, an economic analysis of the silage process was conducted, considering fixed and variable costs, investment per hectare, and profitability indicators. The results showed that cv. Sureño sorghum presented adequate biomass production and competitive bromatological quality, making it a viable and lower-cost alternative compared to traditional forage crops. It is concluded that the use of sorghum silage represents a technically and economically sustainable option to strengthen food security and resilience in livestock systems located in areas with limited water availability.

## **Agradecimiento**

En el transcurso de esta travesía académica, expresamos nuestro más profundo agradecimiento a nuestras familias, cuyo amor incondicional, paciencia y constante apoyo fueron el ancla que nos sostuvo en los momentos de incertidumbre. Su compañía y aliento han sido pilares fundamentales en este camino.

A nuestro tutor, Esteban Jiménez le tenemos una deuda de gratitud inmensa, su guía experta, sabios consejos y dedicación incansable han sido fundamentales en la culminación de este proyecto. A nuestros valiosos asesores, Gerardo Villalobos y Carlos Tobía, les agradecemos por compartir su conocimiento y experiencia, y por habernos guiado a lo largo de este viaje de descubrimiento académico. Su apoyo ha sido esencial para dar forma a esta tesis. Así como al productor don Pablo Rodríguez, su familia y colaboradores de la finca, por su valiosa disposición y generosidad al facilitarnos el acceso a la propiedad y a sus recursos, apoyo sin el cual este estudio no habría sido posible.

Deseamos agradecer igualmente a Valeri Cubero Arias y a todas las personas que de manera directa o indirecta brindaron apoyo y colaboración durante el desarrollo de esta tesis. Su contribución, ya sea en asesoría, asistencia técnica o acompañamiento académico, fue fundamental para el avance y la consolidación de este trabajo.

Agradezco a FOCAES Investigación por el respaldo financiero brindado, el cual fue fundamental para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco al M.Sc. Andrés Alpízar Naranjo y al equipo del Programa de Producción Sostenible de Rumiantes Menores, quienes apoyaron generosamente con horas asistente, así como con los proyectos SIA 0169-23 y SIA 0431-20, los cuales fueron fundamentales para avanzar en este proceso.

A todos ustedes, les agradecemos de corazón por haber sido parte de este proceso y por haber contribuido al éxito de esta tesis. Su dedicación y apoyo han marcado una diferencia significativa en nuestras vidas académicas. ¡Gracias!

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 General.....	16
2.2 Específicos.....	16
<b>3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
3.1. Contexto mundial y nacional de la producción de leche.....	17
3.2. Composición y calidad bromatológica de la leche de bovinos.....	19
3.2.1 Proteína.....	20
3.2.2 Grasa.....	20
3.2.3 Sólidos totales y lactosa.....	21
3.2.4 Relación con el sistema mamario.....	21
3.3 Desafío de la producción lechera en regiones tropicales.....	22
3.4 Sistemas forrajeros tropicales y alternativas de suplementación.....	24
3.4.1 Bancos forrajeros como reservas estratégicas.....	24
3.4.2 Cultivos anuales forrajeros de alto rendimiento y calidad.....	25
3.4.3 Suplementación estratégica eficiente y resiliente.....	25
3.5 Sorgo forrajero (S. bicolor L. ).....	26
3.5.1 Fisiología y adaptabilidad.....	27
3.5.2 Rendimiento en materia seca y características agronómicas.....	27
3.5.3 Valor nutricional del sorgo y su impacto en la alimentación bovina.....	28
3.5.3.1 Fibra Detergente Neutro (FDN) y Fibra Detergente Ácido (FDA).....	29
3.5.3.2 Digestibilidad.....	30
3.5.3.3 Impacto en la alimentación bovina.....	30
3.5.3.4 Variedades utilizadas localmente.....	31
3.6 Conservación de forrajes: fundamentos del ensilaje.....	32
3.6.1 Principios del proceso de ensilaje.....	32
3.6.2 Condiciones óptimas para un ensilaje.....	32
3.6.3 Tipos de silos.....	33
3.6.4 Evaluación de la calidad del ensilaje.....	35
3.7 Efecto del ensilaje en la producción y calidad de la leche.....	37
3.8 Consideraciones económicas del establecimiento y uso del ensilaje en sistemas de doble propósito.....	39
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>41</b>
4.1 Ubicación y características de la finca.....	41

4.2	Clima en el sitio de estudio.....	42
4.4	Establecimiento y manejo de los cultivos.....	44
4.4.1	Sorgo Sureño.....	44
4.4.1.1	Plan de fertilización Sorgo.....	45
4.4.1.1.1	Caracterización de la fertilidad del suelo.....	45
4.4.1.1.2	Estimación de requerimientos nutricionales por unidad de rendimiento	45
4.4.1.1.3	Análisis de brechas nutrimentales y toma de decisiones.....	46
4.4.1.1.4	Estrategia de fertilización fraccionada en sorgo forrajero: formulación y aplicación.....	47
4.4.1.2	Composición bromatológica de sorgo sureño.....	50
4.5	Ensilaje.....	50
4.6	Diseño experimental, variables de estudio y análisis estadístico.....	52
4.6.1	Tratamientos y diseño experimental.....	52
4.6.2	Análisis estadístico.....	53
4.7	Balance de las dietas por tratamiento.....	56
4.7	Componente animal.....	58
<b>4.8</b>	<b>Alimentación y manejo de las vacas.....</b>	<b>58</b>
4.9	Procedimiento experimental.....	60
4.10	Variables a evaluar.....	61
4.10.1	Composición bromatológica del silo de sorgo y componentes de la dieta.....	61
4.10.2	Producción de leche.....	62
4.10.3	Composición nutricional de la leche.....	62
4.11	Determinación de la estructura de costos.....	63
4.11.1	Determinación cálculo de costo por nutriente.....	64
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>65</b>
5.1.	Análisis de suelo y plan de fertilización.....	65
5.1.1.	Plan de fertilización Sorgo.....	67
5.2.	Establecimiento y manejo de los cultivos.....	69
5.3.	Elaboración de ensilajes.....	73
5.4.	Composición bromatológica de los materiales.....	75
5.4.1	Composición bromatológica del Sorgo cv sureño.....	75
5.4.2.	Composición bromatológica del ensilaje de sorgo sureño.....	78
5.4.1.	Materia seca.....	80
5.4.2.	Proteína cruda (PC).....	80
5.4.3.	Contenidos de FDA y FDN.....	81

5.4.4. Lignina.....	81
5.4.5. Contenido de cenizas y minerales.....	82
5.4.6 Contenido de EE.....	82
5.4.7 Contenido de ENL.....	83
5.5. Producción y composición bromatológica de la leche.....	84
5.5.1 Producción de leche.....	84
5.5.2. Composición bromatológica de la leche.....	85
5.5.2.1. Grasa.....	85
5.5.2.2. Lactosa.....	87
5.5.2.3. Proteína.....	89
5.5.2.4. Sólidos totales.....	91
5.5.2.5. Relación entre la producción de leche y la calidad bromatológica.....	92
5.6. Valoración económica del componente de alimentación.....	94
5.6.1 Costos de establecimiento hasta cosecha de sorgo.....	94
5.6.2 Costo por kilogramo de sorgo en fresco y en materia seca.....	97
5.6.3 Costo por kilogramo de ensilaje de sorgo en fresco y materia seca.....	98
5.6.4 Costo por dietas.....	101
5.6.5 Costo por nutriente.....	102
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>103</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>150</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Comparación diagnóstica entre la oferta edáfica, requerimientos del cultivo y manejo proyectado por nutriente.....	<b>46</b>
<b>Tabla 2.</b> Descripción de los tratamientos experimentales con base a los requerimientos de proteína y energía.....	<b>52</b>
<b>Tabla 3.</b> Esquema del diseño crossover 3×3 para la rotación de tratamientos entre bloques y periodos.....	<b>53</b>
<b>Tabla 4.</b> Composición de las dietas experimentales según tratamiento.....	<b>57</b>
<b>Tabla 5.</b> Bloques de vacas según producción de leche (kg), número de partos y días de lactancia (DEL).....	<b>58</b>
<b>Tabla 6.</b> Análisis de suelo de las parcelas establecidas con las especies forrajeras.....	<b>66</b>
<b>Tabla 7.</b> Balance nutricional del cultivo de sorgo forrajero.....	<b>68</b>
<b>Tabla 8.</b> Protocolos de manejo agronómico de sorgo.....	<b>72</b>
<b>Tabla 9.</b> Protocolos de elaboración de ensilaje de sorgo.....	<b>74</b>
<b>Tabla 10.</b> Composición bromatológica de la planta completa de sorgo sureño cultivado en Jicaral y reportes de literatura.....	<b>76</b>
<b>Tabla 11.</b> Análisis bromatológicos del silo de sorgo sureño cultivado en Jicaral.....	<b>80</b>
<b>Tabla 12.</b> Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre la producción de leche.....	<b>85</b>
<b>Tabla 13.</b> Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre grasa.....	<b>86</b>
<b>Tabla 14.</b> Comparaciones múltiples entre tratamientos para la grasa.....	<b>87</b>
<b>Tabla 15.</b> Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre lactosa.....	<b>89</b>
<b>Tabla 16.</b> Comparaciones múltiples entre tratamientos para la lactosa.....	<b>89</b>
<b>Tabla 17.</b> Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre la proteína.....	<b>90</b>
<b>Tabla 18.</b> Comparaciones múltiples entre tratamientos para la proteína.....	<b>91</b>
<b>Tabla 19.</b> Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre los sólidos totales.....	<b>92</b>
<b>Tabla 20.</b> Detalle de los costos de establecimiento hasta cosecha de sorgo, Jicaral, Puntarenas, Costa Rica, 2025.....	<b>95</b>
<b>Tabla 21.</b> Costo por kilogramo de sorgo fresco y materia seca.....	<b>98</b>
<b>Tabla 22.</b> Costo estimado por kilogramo de ensilaje de sorgo en estado fresco y en base a materia seca, incluyendo costos de cultivo y elaboración. Jicaral, Puntarenas, Costa Rica, 2025.....	<b>100</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Efecto de los niveles de sustitución del suplemento base sobre la producción y la calidad de la leche.....	94
---	----

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Análisis de suelo de las parcelas establecidas con las especies forrajeras.....	151
<b>Anexo 2.</b> Plan de fertilización Soya.....	152
<b>Anexo 3.</b> Balance nutricional del cultivo de soya Cigras 06.....	153
<b>Anexo 4.</b> Plan de fertilización Maíz.....	153
<b>Anexo 5.</b> Balance nutricional del cultivo de maíz EJM_blanco.....	155
<b>Anexo 6.</b> Establecimiento y manejo de los cultivos.....	155
<b>Anexo 7.</b> Protocolos de manejo agronómico de sorgo, maíz y soya.....	158
<b>Anexo 8.</b> Detalle de los costos de establecimiento hasta la cosecha de maíz y soya. Jicaral, Puntarenas, Costa Rica, 2025.....	159
<b>Anexo 9.</b> Balances nutricionales elaborados en cada tratamiento para las vacas en estudio, con un promedio productivo de 10 kg de leche en el software Spartan Dairy 3.....	162
<b>Anexo 10.</b> Medición de producción de leche con el Waikato Milk Meter.....	163
<b>Anexo 11.</b> Análisis de las muestras de leche con el LactoScan.....	163
<b>Anexo 12.</b> Protocolos de siembra.....	164
<b>Anexo 13.</b> Proceso de corta y acarreo de sorgo sureño.....	164
<b>Anexo 14.</b> Elaboración de ensilaje de sorgo.....	165
<b>Anexo 15.</b> Apertura y muestreo del ensilaje de sorgo sureño enriquecido.....	166
<b>Anexo 16.</b> Costos de establecimiento de sorgo.....	168
<b>Anexo 17.</b> Costo de elaboración de silo de sorgo 2819 kg (2,8 ton).....	169
<b>Anexo 18.</b> Costo establecimiento mecanizado del cultivo de maíz (1 ha).....	171
<b>Anexo 19.</b> Costo establecimiento manual del cultivo de soya (1 ha).....	173
<b>Anexo 20.</b> Costos de suplemento por kg.....	176
<b>Anexo 21.</b> Costo dieta control.....	176
<b>Anexo 22.</b> Costo dieta sustitución del 15% de la dieta control.....	177
<b>Anexo 23.</b> Costo dieta 30%.....	178

## 1. INTRODUCCIÓN

Los forrajes representan la fuente más económica y accesible para la alimentación de rumiantes en regiones tropicales (Álvarez, 2017; Jiménez, 2018). En estas zonas, las especies forrajeras presentan adaptaciones fisiológicas particulares, como una mayor eficiencia en el uso del agua y mecanismos alternativos de asimilación de nitrógeno, lo que les otorga ventajas competitivas frente a condiciones ambientales adversas (Acosta, 2018). Sin embargo, estos atributos pueden verse comprometidos por la variabilidad climática, afectando la disponibilidad estacional de biomasa, la calidad nutricional del forraje y, en consecuencia, la sostenibilidad de los sistemas pecuarios (Ríos, 2022).

Según el INEC, (2023) la ganadería ha sido una de las actividades productivas más relevantes y permanentes del sector agropecuario costarricense a lo largo de más de cinco siglos, desempeñando un papel fundamental en la economía rural y nacional. Esta actividad mantiene una participación cercana al 4 % del Producto Interno Bruto (PIB), reflejando su importancia estructural dentro del aparato productivo del país. Según la Encuesta Nacional Agropecuaria 2023, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), el hato ganadero nacional se estimó en 1 510 563 cabezas de ganado. De este total, el 59,7 % corresponde a ganado de carne, el 21,4 % a sistemas de doble propósito, el 18,8 % a ganado lechero (con 284 904 animales), y un 0,1 % se destina a actividades de trabajo agrícola, como la preparación de terrenos. Estos datos evidencian no solo la magnitud del hato nacional, sino también la diversidad de enfoques productivos presentes en la ganadería costarricense.

En los sistemas ganaderos tropicales estabulados, la alimentación puede representar hasta un 80 % de los costos totales de producción (Hernández et al., 2016; Estrada et al., 2018). En Costa Rica, según una investigación presentada por el comité organizador del Congreso Lechero en 2019 (UCR, 2019), el costo alimentario en sistemas de lechería especializada puede rondar el 60 %, principalmente asociado al uso de granos. Otro estudio nacional de 2007 reveló que en una finca con 35 animales, la alimentación representó un

54 % del costo de producción (Calvo, 2021), mientras que una investigación realizada en 2010 en 25 fincas ubicadas en San Carlos, Guanacaste y la Meseta Central indicó un promedio de 52,17 % (González, 2010).

En Nicaragua, Suárez (2010) analizó la rentabilidad de distintos tamaños de fincas en Matagalpa, determinando que el costo de alimentación incluyendo suplementos y minerales promedió un 28,13 %. Estos datos sugieren que en sistemas de engorde bovino los costos alimentarios pueden superar el 60 %, mientras que en la ganadería lechera oscilan entre el 50 % y 60 %.

Esta elevada carga financiera se ve agravada por la fuerte dependencia de insumos externos, especialmente concentrados importados, lo cual aumenta la vulnerabilidad económica frente a fluctuaciones del mercado internacional y eventos climáticos extremos (Chaccara-Chang et al., 2022). En este contexto, se vuelve indispensable avanzar hacia modelos productivos resilientes, que integren criterios de sostenibilidad económica, social y ambiental. Una proporción ideal en la dieta del ganado podría estar compuesta por un 60 % de forrajes y un 40 % de alimentos balanceados (Villalobos, 2019).

En este contexto, el uso estratégico de recursos forrajeros locales, mediante su conservación y aprovechamiento eficiente, se plantea como una alternativa viable para mejorar la rentabilidad ganadera y reducir la dependencia de insumos comerciales (Cordibiola et al., 2022; OCDE-FAO, 2020). Una de las opciones más prometedoras es el uso de cultivos forrajeros de grano y de ciclo corto, como el *Sorghum bicolor* L., con aptitud para la producción y conservación en forma de ensilaje.

El cultivo de sorgo ofrece importantes beneficios dentro de los sistemas productivos ganaderos, ya que no solo proporciona follaje verde de calidad, sino también grano procedente de la panoja, lo que incrementa el aporte proteico en la alimentación animal. Entre las variedades comúnmente utilizadas destacan BMR-0936 y CENTA CF. Más recientemente, se ha incentivado el material Sorgo Sureño, el cual presenta características

agronómicas sobresalientes. Según el Gutiérrez-Palacios, et al., (2013) esta variedad alcanza una altura de hasta 3,19 metros, con panojas semiabiertas de grano color crema, con un rendimiento de materia fresca aproximadamente 56 948 kg/ha y de materia seca de 10 361 kg/ha. Presentado a los 81 días la floración gesta su maduración a los 116 días después de la siembra, con su punto de cosecha aproximadamente a los 80 dds, lo que lo convierte en una alternativa forrajera de alto potencial para sistemas ganaderos tropicales.

En el contexto de una agricultura cada vez más orientada a la sostenibilidad y a la eficiencia productiva, la conservación del forraje se posiciona como una estrategia clave para garantizar la disponibilidad de alimento de calidad durante todo el año, especialmente en épocas de escasez. Este conjunto de prácticas permite mantener, por varios meses, las propiedades nutricionales del forraje fresco, contribuyendo a la estabilidad de los sistemas ganaderos (Bustamante, 2023).

Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la henificación, el henolaje y el ensilaje, cada una con aplicaciones particulares según el tipo de explotación. Estas técnicas no solo optimizan el uso del excedente forrajero, sino que también ayudan a cubrir las necesidades nutricionales del ganado cuando la producción de pasto natural se ve afectada por factores ambientales (Borreani et al, 2018). En este marco, los cultivos forrajeros adquieren un papel fundamental en la cadena de producción animal, ya que son la base para obtener leche y carne de buena calidad, y su adecuada conservación es esencial para mantener la rentabilidad y la resiliencia del sistema (Clemson University, 2024).

Entre las opciones disponibles, el ensilaje destaca por su eficacia para preservar el valor nutricional del forraje a través de un proceso de fermentación en condiciones anaeróbicas. Este método consiste en cortar y picar el material vegetal, compactar y almacenar en silos para inducir una fermentación láctica que impide la descomposición del forraje (Bustamante, 2023). Para lograr un ensilaje exitoso, se recomienda utilizar forraje con un contenido de materia seca entre el 30 % y 40 %, y que contenga al menos un 2.5 % de carbohidratos solubles para alimentar a las bacterias responsables del proceso (INIA,

2010). Además, la incorporación de aditivos como inoculantes microbianos o ácidos orgánicos puede mejorar la estabilidad del silo, acelerar la fermentación y aumentar la digestibilidad del alimento (Seven et al, 2021). Entre los beneficios más relevantes del ensilaje se incluyen: el aumento en la productividad animal, una mayor ganancia de peso diario y el mantenimiento de un estado metabólico adecuado en los rumiantes (Borreani, 2018). En definitiva, esta técnica no solo permite al productor mantener un suministro estable de alimento, sino también enfrentar los desafíos de la variabilidad climática, reducir desperdicios y mejorar el bienestar animal.

El sorgo forrajero (*Sorghum bicolor* L. Moench) se ha posicionado como una alternativa estratégica en sistemas ganaderos tropicales, gracias a su alta eficiencia en el uso del agua, tolerancia al estrés hídrico y elevado rendimiento de biomasa, incluso en condiciones de suelos marginales (Félix-Huerta et al., 2021; Reddy et al., 2021). Además, presenta un perfil bromatológico que lo hace adecuado para la alimentación animal, especialmente en sistemas de producción de rumiantes. Una de las formas más eficientes de aprovechar este recurso es mediante su conservación en forma de ensilaje, técnica que permite preservar su valor nutricional y garantizar la disponibilidad de forraje durante periodos críticos, como la estación seca o momentos de baja oferta de pasturas (McDonald et al., 2011; Espinoza-Arellano et al., 2022). Por tanto, el estudio del ensilaje de sorgo bajo diferentes estrategias de manejo y conservación resulta de gran relevancia para mejorar la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas de producción animal en zonas tropicales.

En Costa Rica, las regiones del Pacífico Norte y otras zonas con marcada estacionalidad enfrentan severas limitaciones en la producción de forraje durante la época seca, afectando la sostenibilidad de los sistemas ganaderos extensivos y semiintensivos (MAG, 2023). Esta estacionalidad reduce la disponibilidad de pasturas de forma significativa, generando dependencia de alimentos concentrados o suplementos externos, lo que incrementa los costos de producción (Rojas et al., 2016). En este contexto, el uso de cultivos alternativos como el sorgo forrajero y su conservación mediante ensilado representa una estrategia viable para enfrentar la escasez estacional de alimento. Sin

embargo, aún existen limitaciones técnicas relacionadas con la calidad del ensilaje, su valor nutritivo y los factores que influyen en su estabilidad y eficiencia. Por tanto, esta investigación resulta relevante no solo desde el punto de vista científico y académico (al aportar datos sobre el comportamiento del ensilaje de sorgo bajo condiciones específicas), sino también desde una perspectiva práctica, al brindar herramientas para mejorar la planificación alimenticia en fincas ganaderas, especialmente aquellas ubicadas en zonas vulnerables a la variabilidad climática.

El presente estudio tiene como propósito evaluar el potencial agronómico, bromatológico y productivo del sorgo forrajero cv. Sureño, conservado como ensilaje, en un sistema de producción de leche doble propósito. Asimismo, se analiza su efecto sobre la producción y calidad de la leche, así como su viabilidad económica, bajo condiciones de finca en la región Chorotega de Costa Rica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General**

Evaluar técnica y económicamente el establecimiento del cultivo de sorgo forrajero cv. Sureño (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Sureño) y su posterior uso como ensilaje, como estrategia de suplementación en un sistema de producción bovina de doble propósito en Jicaral de Lepanto, Puntarenas.

### **2.2 Específicos**

1. Elaborar un protocolo de manejo agronómico de los forrajes de maíz, soya, sorgo y del ensilaje de sorgo por medio del intercambio de saberes para disponer de una guía técnica que contemple la experiencia local.
2. Determinar la composición química y bromatológica del forrajes de sorgo y del ensilaje.
3. Evaluar la producción y calidad de la leche en bovinos doble propósito en la finca “La Josefina” ubicada en Jicaral de Lepanto, Puntarenas.
4. Determinar la estructura de costos por medio de la recopilación de los costos fijos y variables del plan de manejo agronómico y la elaboración del ensilaje de sorgo, con la finalidad de estimar el valor económico por kilogramo de forraje ofrecido.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Contexto mundial y nacional de la producción de leche**

La producción de leche representa una de las principales actividades agropecuarias a nivel global, tanto por su contribución a la seguridad alimentaria como por su impacto económico y social en zonas rurales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), para el año 2021 se produjeron más de 887 millones de toneladas métricas de leche en el mundo, cifra que refleja una tendencia ascendente impulsada principalmente por el crecimiento poblacional, el aumento del poder adquisitivo en países en desarrollo y la diversificación del consumo de productos lácteos (FAO, 2021).

En términos geográficos, los principales productores de leche son India, Estados Unidos, la Unión Europea, China y Brasil. La India lidera en volumen total debido al alto número de pequeños productores, mientras que la productividad por animal es más alta en regiones con sistemas intensivos y tecnologías avanzadas, como los Estados Unidos y los países que forman parte de la Unión Europea (FAO, 2025). No obstante, el sector lácteo enfrenta retos estructurales como la volatilidad de precios, la competencia internacional, los efectos adversos del cambio climático y el escrutinio público respecto a la sostenibilidad ambiental del modelo ganadero convencional (Carulla y Ortega, 2016).

El cambio climático constituye una amenaza transversal para la producción lechera. Las altas temperaturas, la variabilidad en las precipitaciones y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos inciden negativamente sobre la fisiología del ganado, la disponibilidad y calidad de los forrajes, y los sistemas de manejo (Rojas-Downing et al., 2017). Frente a este panorama, la adopción de tecnologías de precisión, el mejoramiento genético, la intensificación sostenible y la eficiencia en el uso de recursos naturales se han postulado como estrategias clave para mantener la competitividad del sector (Muñoz, et al., 2020).

Por otra parte, los patrones de consumo han evolucionado significativamente. En los países desarrollados, la demanda se orienta hacia productos funcionales, con valor agregado y características específicas como el origen, el método de producción o el perfil nutricional. Paralelamente, ha emergido un mercado de sustitutos vegetales, especialmente entre consumidores preocupados por la salud, el bienestar animal y la huella ecológica de los alimentos de origen animal (Henchion et al., 2017). En contraste, en regiones como Asia y África, el consumo de leche y derivados continúa en expansión debido al aumento demográfico y al cambio en los hábitos alimentarios (OECD-FAO, 2020).

En el contexto costarricense, la producción de leche es una actividad estratégica dentro del sistema agroalimentario nacional. Según la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA, 2025), en 2021 se produjeron aproximadamente 1.21 millones de toneladas métricas de leche, con una estructura productiva que combina sistemas intensivos, semiestabulados y de pastoreo extensivo. Esta diversidad de sistemas responde tanto a condiciones agroecológicas diferenciadas como a los niveles de tecnificación y acceso al mercado de los productores.

A nivel nacional, la industria láctea en Costa Rica enfrenta múltiples desafíos que reflejan tendencias globales, tales como la creciente competencia internacional y las modificaciones en la política arancelaria bajo el Tratado de Libre Comercio de Centroamérica (CAFTA). Además, se requiere adoptar tecnologías que mejoren la eficiencia productiva y promuevan la sostenibilidad ambiental, lo cual es clave para mantener la competitividad del sector. Asimismo, el aumento de los costos, especialmente en alimentación y manejo del ganado, plantea retos significativos. Sin embargo, existen oportunidades importantes para la diferenciación y conquista de nichos de mercado, siempre que se fortalezca la coordinación entre actores públicos y privados y se implementen estrategias conjuntas que impulsen el desarrollo sostenible de la industria láctea nacional (Benavides Vindas & Hughes Araya, 2024).

Ante estos desafíos, diversas instituciones públicas y privadas en Costa Rica han promovido iniciativas para fortalecer la resiliencia del sector. Entre ellas se incluyen programas de transferencia tecnológica, asistencia técnica en prácticas sostenibles, certificación en bienestar animal y proyectos de investigación en adaptación agroclimática, como los desarrollados por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (MINAE, 2021; INTA, 2020).

En suma, la producción de leche enfrenta un escenario complejo, marcado por tensiones entre el crecimiento de la demanda, la necesidad de sostenibilidad, las transformaciones tecnológicas y la resiliencia frente al cambio climático. La incorporación de prácticas adaptativas, junto con el aprovechamiento eficiente de recursos locales como los forrajes conservados, resulta crucial para sostener la competitividad del sector tanto a nivel global como nacional (SEPSA, 2025).

### **3.2. Composición y calidad bromatológica de la leche de bovinos**

La leche bovina es una secreción biológica compleja y completa desde el punto de vista nutricional, compuesta principalmente por agua, proteínas, lípidos, lactosa, vitaminas y minerales. Su calidad bromatológica se define por el contenido y equilibrio de estos componentes, los cuales están influenciados por factores genéticos, fisiológicos, ambientales y, especialmente, por el tipo y calidad de la dieta ofrecida al animal (Chilliard et al., 2007; Rodríguez & Pulido, 2018).

Desde una perspectiva nutricional, los principales componentes sólidos de la leche son la grasa, la proteína y la lactosa. En conjunto, estos constituyen los denominados sólidos totales, que representan entre 11 y 14 % del volumen de la leche. Dentro de estos, los sólidos no grasos (SNG) agrupan a la proteína, la lactosa y los minerales, y son fundamentales para la elaboración de productos lácteos como quesos y yogures (Acosta-Acosta et al., 2020).

### **3.2.1 Proteína**

La proteína de la leche bovina varía entre 2,8 y 3,5 % y está compuesta en su mayoría por caseínas (alrededor del 80 % del total) y en menor proporción por proteínas solubles como la  $\alpha$ -lactoalbúmina y la  $\beta$ -lactoglobulina. Estas proteínas son esenciales tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico, pues determinan la capacidad de coagulación y la eficiencia en la producción de derivados lácteos (Padilla & Zambrano, 2021).

La concentración proteica en la leche está directamente influenciada por el aporte de energía y proteína en la dieta. La disponibilidad de aminoácidos esenciales y la eficiencia de su utilización en el metabolismo hepático y mamario dependen de la relación entre proteína degradable en rumen (PDR), proteína no degradable (PNDR) y la energía fermentable de la ración (Duque-Quintero et al., 2017). Dietas con baja proporción de carbohidratos solubles o deficiencia energética pueden inducir una movilización proteica corporal y reducir la síntesis de proteína láctea (Sánchez, 2025).

### **3.2.2 Grasa**

El contenido de grasa en la leche oscila generalmente entre 3,2 y 4,5 %, dependiendo de la raza, el estadio de lactancia y la dieta. Los lípidos lácteos están formados principalmente por triglicéridos, con un perfil complejo de ácidos grasos que incluye saturados, monoinsaturados y poliinsaturados. La fracción lipídica aporta no solo energía, sino también compuestos bioactivos con efectos funcionales y sensoriales (Gagliostro, et al., 2018).

Se ha documentado que el tipo de forraje ofrecido, así como el uso de suplementos lipídicos, influye de manera significativa sobre el perfil de ácidos grasos de la leche. Por ejemplo, dietas basadas en pastos frescos tienden a incrementar la proporción de ácidos grasos insaturados como el ácido linoleico (C18:2) y el ácido linolénico (C18:3), lo cual mejora el perfil nutricional del producto final (Benbrook, et al., 2018). En contraste, dietas

ricas en concentrados pueden disminuir el contenido total de grasa y alterar la síntesis de lípidos de novo (Benoit, 2023).

### **3.2.3 Sólidos totales y lactosa**

Los sólidos totales constituyen una medida integrada de la calidad de la leche. Esta variable es crítica para la industria láctea, ya que afecta el rendimiento en la elaboración de derivados. En términos generales, los sólidos totales aumentan con el contenido de grasa y proteína, pero también pueden ser influenciados por la concentración de lactosa, que representa el principal carbohidrato presente en la leche (4.5-5.0 %) (WingChing-Jones & Mora-Chaves, 2013)

La síntesis de lactosa está estrechamente ligada al volumen de producción de leche, dado que actúa como principal osmótico regulador. Por tanto, alteraciones en la ingestión de materia seca, el balance energético y la salud del epitelio mamario pueden modificar su concentración. Estudios han demostrado que una dieta deficiente en energía disponible puede reducir la síntesis de lactosa, afectando tanto el volumen como la composición de la leche (Broderick, 2003).

### **3.2.4 Relación con el sistema mamario**

En sistemas de producción doble propósito, donde las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos forrajeros varían estacionalmente, el tipo de dieta suministrada al hato adquiere un papel preponderante en la producción y calidad de la leche. En particular, el uso de forrajes conservados, como el ensilaje de sorgo, puede contribuir al mantenimiento de parámetros bromatológicos estables durante la época seca, cuando la calidad de los pastos suele disminuir (Álvarez, 2017; Cevallos et al., 2021).

Asimismo, la inclusión de mezclas forrajeras que combinen fuentes energéticas (sorgo, maíz) y proteicas (soya, leguminosas) permite mejorar el perfil nutricional de la dieta, favoreciendo la síntesis de sólidos lácteos y la eficiencia productiva del sistema

(Portillo-López et al., 2021; Lagos & David, 2021). Estos aspectos son fundamentales para responder a las exigencias del mercado y para sostener la rentabilidad de los sistemas bajo condiciones tropicales.

### **3.3 Desafío de la producción lechera en regiones tropicales**

La producción lechera en regiones tropicales enfrenta limitaciones estructurales y ambientales que condicionan su estabilidad y eficiencia. Entre estos factores, la estacionalidad en la disponibilidad y calidad de los forrajes constituye uno de los principales retos para garantizar una producción sostenida a lo largo del año. Dicha variabilidad forrajera afecta tanto la cantidad como el valor nutricional de la dieta, lo cual repercute directamente en la productividad animal, la calidad de la leche y la rentabilidad del sistema (Estrada et al., 2018).

En zonas tropicales, la dinámica climática se caracteriza por una alternancia entre estaciones secas y lluviosas bien definidas. Durante la estación lluviosa, se produce una abundancia relativa de biomasa forrajera, aunque no siempre de la mejor calidad. Por el contrario, en la estación seca se experimenta una marcada reducción en el crecimiento de los pastos, provocada por las elevadas temperaturas, la menor disponibilidad hídrica y el agotamiento de reservas fisiológicas de las gramíneas (Maya, et al., 2022). Esta situación compromete la continuidad de la oferta alimenticia y puede generar deficiencias energéticas y proteicas en la dieta del ganado (Álvarez, 2017).

El impacto de esta estacionalidad se refleja en varios indicadores zootécnicos. Diversos estudios han documentado disminuciones en la producción de leche de entre 15 % y 30 % durante la estación seca en sistemas de pastoreo extensivo (Campos et al., 2015; Cevallos et al., 2021). Estas caídas están asociadas no solo a la baja disponibilidad de materia seca, sino también al incremento en la fibra detergente neutro (FDN) y la reducción en la digestibilidad de los forrajes disponibles, lo cual limita el consumo voluntario y la eficiencia alimentaria (Van Soest, 1994; Minson, 1990).

También, la estacionalidad afecta la composición bromatológica de la leche, particularmente la concentración de sólidos totales, como se ha evidenciado en vacas alimentadas con pastos de baja calidad en condiciones de trópico seco (Jurado-Gámez, et al., 2020). La variabilidad en la dieta impacta la síntesis de componentes clave como la grasa y la proteína, debido a las limitaciones en la disponibilidad de precursores metabólicos y al aumento del estrés fisiológico en el animal (Angulo-Arizala, et al., 2021).

Frente a este panorama, se han propuesto diversas estrategias de mitigación. Entre ellas, destaca el establecimiento de bancos forrajeros, el uso de especies de alta producción con tolerancia a la sequía, y la conservación de forrajes mediante técnicas como el ensilaje o el henolaje, lo cual permite almacenar excedentes producidos durante la época lluviosa para ser utilizados en la estación seca (Estrada et al., 2018).

La elección de especies adaptadas, como el sorgo forrajero (*S. bicolor* L.), ha demostrado ser una alternativa viable en zonas con estacionalidad pronunciada, debido a su resistencia al déficit hídrico, su alto rendimiento en materia seca y su adecuada respuesta al corte (Pérez & Rodríguez, 2020). Además, la incorporación de leguminosas forrajeras y cultivos intercalados con valor nutricional complementario, como maíz o soya, puede mejorar el balance energético y proteico de la ración, reduciendo así los efectos negativos de la estacionalidad sobre la producción (Valerio, et al., 2010).

No obstante, la implementación de estas estrategias requiere planificación técnica, acceso a recursos y capacitación de los productores, especialmente en sistemas familiares o de pequeña escala, donde las limitaciones económicas y logísticas son más marcadas. Por ello, el abordaje de la estacionalidad en la producción lechera debe enmarcarse en un enfoque integral que contemple aspectos técnicos, económicos y sociales (Herrera, et al., 2022).

En síntesis, la estacionalidad forrajera constituye una de las principales restricciones para la producción lechera en regiones tropicales, especialmente en sistemas basados en pastoreo. Su impacto sobre la productividad y la calidad de la leche exige la adopción de prácticas de manejo adaptativo y estrategias de conservación que permitan estabilizar la oferta alimentaria durante todo el año, contribuyendo a mejorar la eficiencia productiva y la resiliencia de los sistemas ganaderos tropicales (Bravo-Peña, et al., 2024).

### **3.4 Sistemas forrajeros tropicales y alternativas de suplementación**

La base alimentaria de los sistemas de producción bovina en regiones tropicales está conformada, en su mayoría, por pastos cultivados y naturales, cuya productividad y calidad varían según las condiciones edafoclimáticas y el manejo agronómico implementado. Los sistemas forrajeros tropicales se caracterizan por una alta dependencia de especies perennes, las cuales presentan buena adaptación a ambientes con estacionalidad hídrica, pero también una marcada fluctuación en su valor nutritivo a lo largo del año (Murgueitio et al., 2025; Estrada et al., 2018). Ante esta variabilidad, la planificación estratégica de la oferta forrajera y la integración de alternativas de suplementación resultan esenciales para mantener la productividad animal y la estabilidad del sistema.

#### **3.4.1 Bancos forrajeros como reservas estratégicas**

Los bancos forrajeros constituyen una estrategia ampliamente promovida en zonas tropicales como mecanismo de amortiguación frente a la estacionalidad de los pastos. Se trata de áreas delimitadas para el cultivo intensivo de especies forrajeras de alto rendimiento y calidad, que son utilizadas como fuente de suplemento en épocas de escasez, principalmente durante la estación seca (Álvarez, 2017; Murgueitio et al., 2011).

Los bancos forrajeros pueden estar conformados por gramíneas de corte como *Pennisetum purpureum* y *Brachiaria brizantha*, las cuales presentan contenidos de proteína cruda entre 8-14 % y buena digestibilidad, además de leguminosas como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* y *Tithonia diversifolia*, que aportan proteína, minerales y

compuestos bioactivos beneficiosos para la digestión (de Pinho Costa et al., 2014; Sima Obiang et al., 2023). La inclusión de estas especies en la dieta favorece la ingesta de nutrientes y la producción de leche en bovinos, especialmente en sistemas que combinan pasturas naturales con ensilajes o suplementos estratégicos (Francisco L. A. da Silva et al., 2018; Hopper et al., 2022).

#### **3.4.2 Cultivos anuales forrajeros de alto rendimiento y calidad**

Los cultivos forrajeros anuales, como el sorgo (*S. bicolor* L.), el maíz (*Z. mays*) y la soya (*G. max*), representan una alternativa eficaz para generar forraje de alta calidad nutricional en períodos determinados, ya sea para consumo en verde o para conservación como ensilaje. Estas especies permiten planificar picos de producción, diversificar la dieta del hato y mejorar el balance energético y proteico durante los meses críticos (Pérez & Rodríguez, 2020; González & Ruiz, 2020).

En particular, el sorgo forrajero ha sido ampliamente evaluado en condiciones de trópico seco por su adaptabilidad a suelos de baja fertilidad, su eficiencia en el uso del agua y su capacidad de rebrote tras el corte. Además, presenta altos rendimientos de materia seca y niveles aceptables de proteína cruda, especialmente cuando se cosecha en estado vegetativo o se combina con otras especies como la soya (Álvarez, 2017; Chacón, et al., 2018). Este tipo de sistemas permite aprovechar al máximo los recursos edáficos y climáticos disponibles en periodos lluviosos, generando biomasa que puede ser almacenada y utilizada posteriormente.

#### **3.4.3 Suplementación estratégica eficiente y resiliente**

La suplementación estratégica consiste en la oferta controlada de alimentos que compensen los déficits nutricionales del forraje base, ya sea en términos de energía, proteína, minerales o fibra digestible. Esta práctica se torna especialmente relevante en épocas de transición estacional o durante eventos climáticos adversos, como sequías

prolongadas, donde la producción y calidad de los pastos se ven comprometidas (Estrada et al., 2018; Cevallos, Taipe, & Caiza de la Cueva, 2021).

La eficiencia de la suplementación depende de su adecuada formulación, compatibilidad con los recursos forrajeros disponibles y su impacto sobre los parámetros productivos y económicos del sistema. Por ejemplo, la inclusión de ensilajes de cultivos anuales balanceados energéticamente con subproductos agroindustriales o fuentes proteicas locales ha demostrado mejorar la conversión alimenticia y estabilizar la producción de leche en sistemas de doble propósito (Chacón, Vargas, & Herrera, 2018; González & Ruiz, 2020).

Adicionalmente, la suplementación puede jugar un papel clave en estrategias de adaptación al cambio climático, al permitir mantener una producción constante frente a condiciones de alta variabilidad. Para ello, es fundamental el diseño de planes forrajeros integrales que contemplen el calendario agroclimático, la disponibilidad de áreas cultivables, el tipo de animales en producción y la capacidad de almacenamiento y manejo de los recursos (Pulido & Rodríguez, 2018).

### **3.5 Sorgo forrajero (*S. bicolor* L.)**

El sorgo forrajero (*S. bicolor* L. Moench) es una especie relevante en sistemas ganaderos tropicales, debido a su alta capacidad de adaptación, eficiencia en el uso de recursos y adecuado perfil nutricional (Pérez & Rodríguez, 2020; Ramos et al., 2019). Su cultivo ha cobrado interés creciente como alternativa para la producción de biomasa forrajera, especialmente en regiones con estacionalidad climática pronunciada, como el trópico seco, donde la escasez de forrajes durante la estación seca constituye una limitante crítica para la producción animal. El sorgo es el quinto cereal más importante a nivel mundial, cultivado ampliamente en regiones tropicales y subtropicales.

### **3.5.1 Fisiología y adaptabilidad**

Desde el punto de vista fisiológico, el sorgo forrajero presenta un metabolismo fotosintético tipo C4, el cual le confiere una elevada eficiencia en la fijación de carbono, especialmente en condiciones de alta radiación solar y temperaturas elevadas (Sage, 2004; von Caemmerer, 2000). Esta característica permite una mayor tasa de crecimiento y una mejor eficiencia en el uso del agua y nutrientes en comparación con otras gramíneas tropicales.

Su sistema radicular profundo, junto con una cutícula cerosa y estomas regulados, favorece su tolerancia a condiciones de sequía, lo que lo convierte en una opción agronómica viable en zonas con baja disponibilidad hídrica o con patrones de precipitación irregulares (Blum, 2009). Además, el sorgo forrajero muestra buena capacidad de rebrote después del corte, lo que permite realizar múltiples cosechas por ciclo productivo, incrementando la productividad por unidad de superficie (Borrell, Mullet, & George-Jaeggli, 2014).

### **3.5.2 Rendimiento en materia seca y características agronómicas**

La materia seca es un parámetro crítico en la conservación y calidad del ensilaje, un valor adecuado permite un correcto proceso fermentativo y minimiza pérdidas de nutrientes por lixiviados. El valor ideal es del 30-40 % para ensilaje de forrajes, con el objetivo de favorecer una fermentación láctica eficiente o fermentaciones no deseadas en materiales demasiado secos (Kung et al., 2018). Diversos ensayos agronómicos en condiciones tropicales han reportado rendimientos de materia seca (MS) que varían ampliamente según la variedad, manejo agronómico y condiciones climáticas, con valores aproximados a 24 toneladas por hectárea por ciclo. Estos resultados dependen de factores como la edad y frecuencia de corte, densidad de siembra y aplicación de fertilizantes (Mendoza & Sánchez, 2023; Montes, 2012; Orozco & Mendoza, 2023). Esta alta productividad posiciona al sorgo forrajero como uno de los cultivos anuales de mayor rendimiento en zonas de trópico seco, con potencial para superar a algunas especies perennes bajo condiciones de manejo adecuadas.

Adicionalmente, el sorgo forrajero demuestra buena respuesta al manejo agronómico, siendo apto para su integración en sistemas intensivos o en rotación con otros cultivos anuales. Su adaptabilidad a suelos marginales y tolerancia a salinidad moderada amplían su uso en diversas regiones agroecológicas (Romero & Pérez, 2018). La selección adecuada de la variedad es fundamental, pues influye significativamente sobre la producción de materia seca y la calidad nutricional del forraje, contribuyendo a optimizar el rendimiento productivo de los sistemas de producción animal (Banks & Smith, 2005; Mendoza & Sánchez, 2023).

### **3.5.3 Valor nutricional del sorgo y su impacto en la alimentación bovina**

El valor nutritivo del sorgo forrajero está determinado por su contenido de materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y digestibilidad in vitro. En general, los valores promedio para forraje cosechado en estado vegetativo fluctúan entre 7 y 10 % de proteína cruda, 55–65 % de FDN, 30–40 % de FDA y una digestibilidad de la materia seca cercana al 55–60 % (Herrero, et al., 2013; Tavares, et al., 2019). Aunque su contenido proteico es menor que el de las leguminosas forrajeras, su alta biomasa, buena palatabilidad y aceptable digestibilidad lo convierten en un recurso estratégico para la suplementación de rumiantes, particularmente cuando se utiliza en combinación con fuentes proteicas como la soya (*G. max*) o *Tithonia diversifolia* (González & Ruiz, 2020; Alpízar & Arias, 2016).

El sorgo forrajero también es apto para su conservación como ensilaje, debido a su adecuado contenido de azúcares solubles. No obstante, su baja concentración inicial de materia seca puede requerir el uso de aditivos para optimizar el proceso fermentativo, estos aditivos pueden aportar humedad como la melaza o el suero de leche o astringentes los cuales reducen la humedad como el afrecho de trigo y maíz, acemite de trigo, entre otros y mejorar la estabilidad y calidad nutricional del ensilaje; otra práctica que se puede realizar para disminuir el contenido de humedad del material es pre marchitando el forraje y exponerlo al sol por 2-4 horas (Pérez y Álvarez, 2022).

La concentración de proteína cruda en el sorgo forrajero varía según el estado fenológico en el momento de la cosecha, la fertilización y las condiciones edafoclimáticas. En general, los valores reportados para forraje cosechado en fase vegetativa oscilan entre 7 y 10 % (Pérez & Rodríguez, 2020). Esta proporción es suficiente para cubrir parcialmente los requerimientos de mantenimiento en bovinos adultos, pero resulta insuficiente para animales en alta producción láctea o crecimiento acelerado, por lo que es común su suplementación con fuentes proteicas como soya o leguminosas forrajeras (Herrero, et al., 2013).

En comparación, el maíz forrajero presenta contenidos de proteína cruda similares o ligeramente inferiores (6–9 %) al sorgo forrajero, mientras que pastos de corte como *Pennisetum purpureum* o *Brachiaria spp.* pueden variar ampliamente, entre 6 % y 12 % de proteína cruda, dependiendo del manejo agronómico y la edad de rebrote (Soto, et al., 2019; Tavares, et al., 2019).

#### **3.5.3.1 Fibra Detergente Neutro (FDN) y Fibra Detergente Ácido (FDA)**

La fibra detergente neutro (FDN) representa la fracción estructural de la planta, compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina y esta asociada con el llenado ruminal y el consumo voluntario. En el sorgo forrajero, los valores de FDN suelen variar entre 55 % y 65 %, dependiendo de la edad y estado de madurez de la planta, con un aumento significativo conforme avanza el ciclo, lo que puede limitar el consumo en cosechas tardías (Mendoza & Sánchez, 2023; Souza et al., 2020). Para referencia, el maíz forrajero muestra valores más bajos, entre 45 % y 55 %, facilitando una mayor ingestión de materia seca, mientras que los pastos tropicales maduros pueden superar el 70 %, afectando negativamente la digestibilidad (Ramos et al., 2019; González, 2010).

La fibra detergente ácido (FDA) refleja principalmente la lignificación del tejido, reduciendo la fracción digestible del forraje. En sorgo, los valores promedio de FDA oscilan entre 30 % y 40 %, similares a los del maíz forrajero, y generalmente inferiores a los de pastos tropicales sin manejo, que pueden tener hasta 45 % de FDA (Teixeira et al.,

2018; Zerbato et al., 2022). Niveles elevados de FDA están relacionados con una reducción en la eficiencia alimentaria y limitan la producción animal, especialmente en leche y carne. Los valores ideales para un forraje de calidad son por debajo del 30 %, un incremento en FAD disminuye directamente la digestibilidad total del alimento (Goering & Van Soest, 1970; NRC, 2001).

### **3.5.3.2 Digestibilidad**

La digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) es una medida integrada de la calidad del forraje. En el caso del sorgo, los valores de digestibilidad dependen fuertemente del estado de madurez, con rangos que varían generalmente entre 50 % y 65 % en cortes vegetativos, disminuyendo significativamente al llegar a floración o formación de grano (Vargas et al., 2005; Souza et al., 2020). Por su parte, el maíz forrajero suele presentar digestibilidades superiores, entre 65 % y 75 %, debido a su mayor concentración de almidón y menor contenido de fibra lignificada (Blümmel et al., 2013).

Los pastos de corte tropicales como *Pennisetum purpureum* presentan digestibilidades variables que oscilan entre 45 % y 65 %, según edad de corte y fertilización aplicada (Araya & Quesada, 2011). En este sentido, el sorgo se posiciona como una opción intermedia, superando la digestibilidad de gramíneas maduras comunes y acercándose a la digestibilidad del maíz, especialmente cuando se practica una cosecha temprana y un manejo adecuado (Núñez & Cantú, 2006).

### **3.5.3.3 Impacto en la alimentación bovina**

El uso del sorgo forrajero en la alimentación de rumiantes permite diseñar sistemas productivos flexibles, resilientes y económicamente viables, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas. Su aporte energético combinado con un contenido moderado de proteína cruda lo hace idóneo como base forrajera, sobre todo cuando se complementa con suplementos proteicos o minerales que equilibran la dieta (Mendoza & Sánchez, 2023; Chacón et al., 2018). Además, su aceptable digestibilidad y palatabilidad

facilitan su inclusión tanto en dietas de forraje fresco como en sistemas de conservación por ensilaje.

En sistemas de producción de leche doble propósito, el sorgo ha mostrado eficacia para mantener niveles estables de producción durante períodos críticos como la estación seca, contribuyendo a estabilizar la oferta nutricional y reducir la dependencia de concentrados comerciales costosos (Cevallos, Taipe, & Caiza de la Cueva, 2021; González & Ruiz, 2020). La integración de sorgo con cultivos leguminosos como la soya y el uso de residuos agroindustriales como fuente proteica han demostrado optimizar el balance nutricional y aumentar los índices de conversión alimenticia, mejorando la eficiencia productiva y económica de los sistemas ganaderos (Romero & Pérez, 2018).

#### **3.5.3.4 Variedades utilizadas localmente**

En el contexto costarricense, se han evaluado distintas variedades de sorgo con fines forrajeros. Entre las más utilizadas se encuentran Sureño, CENTA S3, CENTA RCY, y algunos híbridos adaptados provenientes de programas del CIAT y el INTA. La variedad Sureño, en particular, ha mostrado buen comportamiento agronómico bajo condiciones de trópico seco, con alta capacidad de rebrote, buena respuesta a la fertilización nitrogenada y rendimientos sostenidos durante el ciclo seco-húmedo (Pérez & Rodríguez, 2020; Álvarez, 2017).

La selección varietal debe considerar no solo el rendimiento en MS, sino también la composición nutricional, la tolerancia a enfermedades fúngicas como el *Colletotrichum* y la capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas locales. En este sentido, las evaluaciones participativas en fincas de doble propósito han sido fundamentales para validar el potencial de estos materiales en sistemas reales de producción.

### **3.6 Conservación de forrajes: fundamentos del ensilaje**

La conservación de forrajes mediante el proceso de ensilaje constituye una técnica fundamental en la alimentación de rumiantes en regiones tropicales, especialmente en sistemas con marcada estacionalidad forrajera. Esta práctica permite preservar la calidad nutricional del forraje durante largos periodos, garantizando una fuente estable de alimento en épocas de escasez, como la estación seca (Álvarez, 2017).

#### **3.6.1 Principios del proceso de ensilaje**

El ensilaje es un proceso de fermentación anaerobia controlada, en el cual los azúcares solubles presentes en el forraje son convertidos en ácidos orgánicos, principalmente ácido láctico por acción de bacterias lácticas. Esta acidificación progresiva reduce el pH del material almacenado, inhibe el crecimiento de microorganismos indeseables y permite conservar el valor nutritivo del forraje por varios meses (McDonald et al., 1991).

La clave del éxito del ensilaje reside en la rápida instauración de condiciones anaeróbicas, el aporte adecuado de carbohidratos solubles, una fermentación eficiente y la estabilización del pH por debajo de 4,2. Una fermentación deficiente puede dar lugar a pérdidas significativas de nutrientes, desarrollo de mohos, producción de ácidos indeseables como el butírico y deterioro organoléptico del ensilaje (Ferraretto, Minas & Shaver, 2015).

#### **3.6.2 Condiciones óptimas para un ensilaje**

El proceso de ensilaje requiere condiciones fisicoquímicas específicas para garantizar una conservación eficiente del forraje. Uno de los parámetros más críticos es el contenido de materia seca (MS) del material a ensilar. El rango ideal de MS para gramíneas y cultivos forrajeros se sitúa entre 28 % y 35 %, ya que valores inferiores pueden ocasionar la producción de efluentes y favorecer fermentaciones indeseables, mientras que niveles superiores dificultan la compactación y aumentan el riesgo de deterioro por exposición al oxígeno (Ferraretto, Minas & Shaver, 2015).

La densidad adecuada del forraje es esencial para eliminar el oxígeno residual en el silo. En silos horizontales, se recomienda alcanzar una densidad mínima de entre 500 y 700 kg de MV por metro cúbico, lo cual contribuye a reducir la respiración vegetal post corte y limita el desarrollo de microorganismos aerobios que deterioran el material conservado (McDonald et al., 1991).

Un indicador clave del éxito del proceso de ensilado es el pH final alcanzado en el silo, el cual está directamente relacionado con la actividad de las bacterias ácido-lácticas. El valor óptimo de pH depende del contenido de MS, pero en general se debe mantener entre 3,8 y 4,2 en gramíneas tropicales y entre 4,0 y 4,5 en ensilajes que incluyen leguminosas o mezclas, ya que estos niveles permiten preservar la digestibilidad del forraje y evitar procesos de proteólisis excesiva (Santamaría y Martínez, 2024).

El perfil de fermentación también constituye un criterio diagnóstico de calidad del ensilaje. Una fermentación eficiente y estable se caracteriza por una predominancia del ácido láctico frente a otros ácidos orgánicos como el acético o el butírico, una baja concentración de amoníaco y la ausencia de olores putrefactos, lo que refleja un entorno anaerobio saludable y un adecuado proceso de conservación (Ferraretto, Minas & Shaver, 2015).

### **3.6.3 Tipos de silos**

La elección del tipo de silo representa una decisión estratégica en los sistemas de conservación de forrajes, ya que incide directamente en la eficiencia de compactación, el control de la fermentación y la magnitud de las pérdidas por aireación, lixiviación o deterioro. En regiones tropicales, donde la producción de forraje presenta alta estacionalidad, se han adoptado diversas estructuras adaptadas a las condiciones productivas, técnicas y económicas de cada unidad ganadera (Chacón et al., 2018; Gutiérrez-Bañuelos et al., 2021).

Uno de los sistemas más difundidos es el silo de montón o horizontal, el cual consiste en la acumulación de forraje directamente sobre una superficie plana, generalmente revestida con plástico agrícola. Esta modalidad es ampliamente utilizada en fincas pequeñas o medianas debido a su bajo costo de implementación. No obstante, requiere una compactación cuidadosa y un sellado hermético para evitar la penetración de oxígeno y el deterioro aeróbico, particularmente en los bordes y capas superficiales (Wilkinson & Davies, 2013).

El silo de trinchera es una estructura excavada en el suelo, diseñada para almacenar grandes volúmenes de forraje en condiciones anaeróbicas. Su forma alargada y sus paredes laterales favorecen la compactación mecánica, mientras que su bajo perfil reduce la exposición al oxígeno. Este tipo de silo es común en explotaciones medianas y grandes, donde se dispone de maquinaria para el llenado, pisado y sellado del material. Su efectividad depende del manejo adecuado del drenaje, el recubrimiento con láminas plásticas impermeables y la pronta utilización del forraje una vez abierto (Chacón et al., 2018; Gutiérrez-Bañuelos et al., 2021).

El silo de anillo o sincho es una alternativa modular construida mediante cilindros metálicos o estructuras circulares de malla, dentro de los cuales se deposita el forraje picado. Se compacta manualmente o con herramientas sencillas, y se sella con plásticos y pesos sobre la parte superior. Esta modalidad permite un manejo por lotes, se adapta a explotaciones pequeñas y ofrece un control aceptable del proceso fermentativo, aunque su capacidad es limitada y su relación superficie-volumen favorece mayores pérdidas si no se consume rápidamente (Chacón et al., 2018).

El silo bolsa es una tecnología moderna basada en el uso de bolsas plásticas herméticas de gran longitud, en las cuales se introduce el forraje con equipos especializados. Su principal ventaja radica en la eficiencia anaeróbica y la flexibilidad de almacenamiento, ya que permite ubicar las bolsas en diferentes áreas de la finca según la logística disponible. Además, reduce las pérdidas por aireación al permitir la extracción

progresiva del material. No obstante, su adopción está condicionada por el acceso a maquinaria y a insumos específicos (Ferraretto, Minas & Shaver, 2015; Silva et al., 2020).

El silo de barril, utiliza recipientes plásticos o metálicos de capacidad media (por ejemplo, de 200 litros), dentro de los cuales se compacta manualmente el forraje. Esta opción es común en unidades de producción familiar, ya que permite conservar pequeñas cantidades de forraje con buena calidad fermentativa, siempre que se mantenga un adecuado sellado y control del tiempo de apertura (Chacón et al., 2018; Gutiérrez-Bañuelos et al., 2021).

Finalmente, el silo tipo bolsa comercial (diferente del silo bolsa tubular) consiste en bolsas plásticas de menor capacidad (por ejemplo, entre 25 y 100 kg), selladas manualmente. Esta opción, aunque más artesanal, facilita el almacenamiento segmentado, el transporte y la dosificación del alimento en sistemas con bajo acceso a infraestructura (Silva et al., 2020).

### **3.6.4 Evaluación de la calidad del ensilaje**

La calidad del ensilaje depende de una interacción compleja entre las características del forraje, las condiciones del proceso de conservación y las dinámicas fermentativas que se desarrollan durante el almacenamiento. La evaluación técnica del ensilaje debe considerar indicadores bromatológicos, como la digestibilidad y el contenido de proteína, así como parámetros fermentativos que reflejan la eficiencia del proceso de acidificación y la estabilidad del material almacenado (McDonald, Henderson, & Heron, 1991; Gutiérrez-Bañuelos, Hernández-González, & Ramírez-Godínez, 2021).

Uno de los principales indicadores de calidad fermentativa es el pH final, que debe ubicarse idealmente entre 3.8 y 4.2 en gramíneas tropicales, y entre 4.0 y 4.5 en mezclas que incluyen leguminosas para garantizar un ambiente estable y libre de crecimiento de microorganismos indeseables (Weinberg & Muck, 1996). Un pH elevado señala fermentación ineficiente, incrementando el riesgo de proteólisis excesiva, mientras que un

pH demasiado bajo puede estar relacionado con fermentaciones secundarias por levaduras o bacterias acéticas, lo que deteriora la calidad del ensilaje (Ferraretto, Minas, & Shaver, 2015).

Otro parámetro clave es la concentración de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), producto de la degradación proteica bajo condiciones de pH inadecuado o presencia de bacterias del género *Clostridium*. Valores de  $\text{NH}_3\text{-N}$  por debajo del 10 % del nitrógeno total se consideran aceptables; concentraciones superiores indican proteólisis microbiana significativa, comprometiendo el valor nutritivo y la palatabilidad del ensilado (Silva et al., 2020; Sánchez Ledezma, 2018).

La digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) es un indicador clave para evaluar la calidad nutritiva del ensilaje, pues integra la disponibilidad de energía y la degradabilidad del material. Ensilajes bien fermentados suelen presentar valores de DIVMS entre 55 % y 70 %, dependiendo del tipo de forraje, su estado de madurez y las condiciones de conservación (McDonald et al., 1991; Ferraretto & Shaver, 2015). Estos valores están influenciados por la fracción fibrosa de la planta, particularmente los contenidos de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA), así como por el grado de lignificación, que limitan la digestibilidad al aumentar la proporción de tejidos no degradables (Jung & Allen, 1995; Van Soest, 1994).

La composición de ácidos orgánicos también permite evaluar la eficiencia de la fermentación. Una fermentación deseable se caracteriza por una predominancia del ácido láctico, acompañado de bajas concentraciones de ácido acético y trazas de ácido butírico, cuya presencia en cantidades elevadas indica fermentaciones clostridiales. La relación ácido láctico/acético superior a 2 se asocia con ensilajes de buena calidad (Muck, 2010).

Para mejorar el perfil fermentativo y la estabilidad del ensilaje, se emplean diversos aditivos, cuya función principal es modificar el ambiente microbiano o mejorar las condiciones físico-químicas del material ensilado.

Entre los más utilizados se encuentra la melaza, que actúa como fuente de carbohidratos solubles, estimulando la fermentación láctica en forrajes con bajo contenido de azúcares disponibles (Chacón et al., 2018).

La urea es otro aditivo comúnmente aplicado, se emplea como fuente de nitrógeno no proteico con el fin de incrementar el contenido de proteína cruda del ensilaje, aunque su uso debe ser cuidadoso para evitar problemas de toxicidad (Vargas, 2012). Por su parte, el suero lácteo aporta una carga microbiana natural beneficiosa que favorece la acidificación rápida del material, al tiempo que mejora su palatabilidad. Finalmente, el uso de inoculantes bacterianos, particularmente cepas homofermentativas de *Lactobacillus plantarum*, permite una producción más eficiente de ácido láctico, lo que acelera la estabilización del silo y contribuye a una conservación más efectiva del valor nutritivo del forraje (Silva et al., 2020).

### **3.7 Efecto del ensilaje en la producción y calidad de la leche**

El uso de ensilaje como estrategia de conservación forrajera constituye una herramienta fundamental en los sistemas de producción lechera, especialmente en regiones tropicales donde la estacionalidad climática afecta la disponibilidad y calidad del forraje fresco. Diversos estudios han demostrado que el ensilaje, cuando se elabora y utiliza adecuadamente, puede mantener o incluso mejorar la producción y calidad de la leche, al asegurar un suministro continuo de nutrientes esenciales para las vacas en lactancia (Gutiérrez-Bañuelos et al., 2021; Chacón et al., 2018).

Desde el punto de vista del consumo voluntario, los ensilajes bien fermentados presentan alta palatabilidad y aceptabilidad por parte del ganado, favoreciendo una ingesta adecuada de materia seca. Esto es especialmente cierto en materiales con bajo contenido de ácido butírico y amoníaco, así como con una adecuada proporción de carbohidratos solubles lo cual estimula la actividad microbiana ruminal (Silva et al., 2020; Muck, 2010). Por ejemplo, ensilajes de sorgo o maíz con digestibilidades in vitro superiores al 60 %, han

mostrado ser comparables en consumo a forrajes frescos de buena calidad (Ferraretto, Minas & Shaver, 2015).

El ensilaje contribuye a la eficiencia alimentaria en sistemas lecheros al proporcionar una fuente estable de energía y proteína digestible, especialmente durante la estación seca. Mezclas ensiladas de gramíneas y leguminosas, o de cultivos como sorgo y soya, han demostrado mejorar la conversión alimenticia, expresada como litros de leche por kilogramo de materia seca consumida, gracias a su adecuado balance nutricional (Blümmel et al., 2013; Souza et al., 2020). Además, la inclusión de inoculantes bacterianos como *Lactobacillus plantarum* puede optimizar la fermentación, aumentar la digestibilidad y favorecer la estabilidad del ensilaje, contribuyendo a mantener la producción láctea sin comprometer la salud animal (Gutiérrez-Bañuelos et al., 2021). Estas ventajas resaltan la importancia de un manejo técnico apropiado en la elaboración del ensilaje para maximizar su aporte en términos productivos y económicos.

Respecto a la producción de leche, múltiples estudios han documentado respuestas positivas al suministro de ensilajes de buena calidad. En sistemas semiintensivos del trópico seco, el uso de ensilaje de sorgo en mezclas con leguminosas ha permitido mantener niveles de producción superiores a 12 L/vaca/día durante la época seca, en contraste con dietas basadas exclusivamente en pastos frescos de baja calidad nutricional (Chacón et al., 2018). En un metaanálisis sobre el efecto del tipo de forraje conservado, Ferraretto et al. (2015) indicaron un aumento promedio de 1.2 litros de leche por vaca por día en vacas que recibían ensilajes de maíz frente a pasto henificado, atribuible al mayor contenido energético y digestibilidad del ensilaje.

En cuanto a la calidad de la leche, el tipo y calidad del forraje ensilado influye directamente en los niveles de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales. Ensilajes con mayor digestibilidad y aporte de fibra efectiva favorecen la síntesis de grasa láctea a través de la producción de acetato en el rumen, mientras que un suministro equilibrado de proteína metabolizable puede mejorar el contenido de proteína láctea (NRC, 2001). En estudios

realizados en sistemas tropicales, se ha observado que dietas con inclusión de ensilajes bien fermentados mantuvieron niveles de grasa entre 3.5 y 4.2 %, y proteína entre 3.0 y 3.4 %, valores considerados adecuados para leche cruda destinada a procesamiento industrial (Gutiérrez-Bañuelos et al., 2021).

Las secciones anteriores han expuesto cómo el ensilaje contribuye a mejorar la calidad nutricional de la dieta, gracias a su perfil fermentativo, digestibilidad y composición bromatológica, así como su impacto positivo en la producción y calidad de la leche en sistemas doble propósito. Estos beneficios, sin embargo, están estrechamente vinculados a los costos que implica su establecimiento y manejo, y a la capacidad del productor para convertir estos beneficios zootécnicos en rentabilidad económica. Por ello, es necesario comprender los principios económicos que sustentan su viabilidad, considerando tanto los costos de producción como los ingresos generados, y evaluando la eficiencia de su implementación frente a otras alternativas forrajeras. En esta sección se abordan los fundamentos económicos del ensilaje, como base para interpretar su relevancia en los sistemas productivos tropicales.

### **3.8 Consideraciones económicas del establecimiento y uso del ensilaje en sistemas de doble propósito**

El análisis económico del establecimiento y uso del ensilaje en sistemas de producción doble propósito es esencial para determinar su viabilidad como estrategia productiva frente a la estacionalidad forrajera característica de las regiones tropicales. Desde el enfoque de la economía agrícola, la toma de decisiones en torno al ensilaje implica considerar tanto los costos asociados a su implementación como los beneficios económicos que genera a corto y largo plazo (Kay et al., 2016; Nicholson & Black, 2014).

Los costos fijos se definen como aquellos que permanecen constantes dentro de un determinado rango de producción, independientemente de la cantidad de forraje ensilado. Estos incluyen la depreciación y el mantenimiento de la maquinaria agrícola (tractores, picadoras, compactadoras), los salarios del personal permanente, el arrendamiento de

tierras y los impuestos. Estos costos representan compromisos financieros que deben ser cubiertos para sostener la operación a lo largo del tiempo (García et al., 2020; Nicholson & Black, 2014).

En contraste, los costos variables dependen directamente de la cantidad de ensilaje producido y fluctúan según el volumen procesado en cada ciclo. Dentro de este grupo se encuentran los gastos en insumos agrícolas (semillas, fertilizantes, herbicidas), mano de obra estacional, combustible, inoculantes bacterianos, plásticos para cobertura y otros materiales específicos utilizados en la conservación del forraje (Herrero & Thornton, 2013; González et al., 2017). La correcta estimación y control de estos costos es crucial para identificar oportunidades de eficiencia y reducir pérdidas económicas.

Otro concepto fundamental es la rentabilidad, que se refiere a la relación entre los ingresos generados y los costos totales incurridos en la producción. Una práctica es económicamente viable cuando produce beneficios netos positivos y, además, compite favorablemente con alternativas de alimentación, como la compra de heno o concentrados. La rentabilidad depende de factores como el rendimiento y calidad del forraje, la eficiencia de conversión alimenticia, los precios de los insumos y productos finales, así como la capacidad del sistema para amortizar los costos fijos a lo largo del tiempo (Souza et al., 2020; Nicholson & Black, 2014).

En los sistemas doble propósito, el ensilaje no solo contribuye a estabilizar la producción y calidad de la leche durante la estación seca, sino que también permite mantener la condición corporal de los animales y mejorar la productividad reproductiva, generando beneficios indirectos que tienen un valor económico adicional (Herrero & Thornton, 2013; González et al., 2017). Así, la evaluación económica debe considerar no solo los ingresos directos por litro de leche o kilogramo de carne, sino también los efectos sobre la salud y productividad del hato a largo plazo.

Metodológicamente, para evaluar la viabilidad económica del ensilaje, se suelen calcular indicadores como el margen bruto (ingresos menos costos variables), el margen neto (ingresos menos costos totales), el costo unitario de producción (por tonelada de materia seca ensilada o por litro de leche producido), y el retorno sobre la inversión (ROI). Adicionalmente, la inclusión de análisis de sensibilidad permite estimar el impacto de variaciones en los precios de los insumos, del rendimiento del cultivo o de la calidad del ensilaje sobre los resultados económicos, lo cual es especialmente relevante en contextos de alta volatilidad como los sistemas tropicales (Nicholson & Black, 2014; García et al., 2020).

Finalmente, es importante reconocer que la adopción del ensilaje como estrategia forrajera no depende únicamente de la rentabilidad económica inmediata, sino también de factores institucionales, sociales y ambientales, tales como la disponibilidad de crédito para inversión inicial, la capacitación técnica de los productores y los impactos sobre el uso sostenible del suelo (Herrero & Thornton, 2013; González et al., 2017). Por ello, su evaluación debe realizarse de manera integral, considerando tanto los beneficios directos como las externalidades positivas o negativas que genera en el sistema productivo.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Ubicación y características de la finca**

La investigación se desarrolló en finca “La Josefina”, propiedad de Ganadera La Josefina S.A, entre las 9°57'28.9" latitud Norte y 85°08'09.6" longitud Oeste y a una altura de 47 m.s.n.m, San Pedro y Corozal de Jicaral, Lepanto, Puntarenas.

La Josefina es una finca de vocación agropecuaria que posee una extensión de 600 ha, de las cuales 50 ha están dedicadas a la ganadería bovina de doble propósito, con cruces de las razas Gyrolando, Pardo Suizo y Gyr lechero. En esta superficie existe un sistema de pastoreo con la presencia de los pastos Angleton (*Dichanthium aristatum*), *Brizantha cv. Tanzania* y *Brachiaria brizantha*, dividido en 33 apartos con áreas entre los 10,000 y

20,000 m<sup>2</sup>, por lo que son 33 apartos de 15,000 m<sup>2</sup> en promedio. En adición se dispuso un área de 16 ha para la cosecha y elaboración de silopacas (*Digitaria decumbens* cv. Transvala) y 3 ha para la siembra del Sorgo Sureño (*Sorghum bicolor* L. Moench).

Los suelos que predominan son de tipo inceptisol con relieve plano y fertilidad media caracterizada por concentraciones bajas de nitrógeno, materia orgánica y micronutrientes (Naula, et al., 2025).

#### **4.2 Clima en el sitio de estudio**

Durante el período de ejecución del experimento, comprendido entre el 18 de marzo y el 01 de junio del 2024, el sitio de estudio presentó condiciones climáticas típicas de las regiones tropicales secas. El clima anual se caracterizó por una temperatura media de aproximadamente 30 °C, con máximas de hasta 35 °C y mínimas alrededor de 23 °C. La evapotranspiración anual en el sitio de estudio se estima entre 1200 mm y 1600 mm, con una media aproximada de 1400 mm (IMN, 2024). Durante el período específico del experimento, que abarcó cerca de 2,5 meses (marzo a junio), la evapotranspiración acumulada fue de 342 mm, correspondiente únicamente a ese intervalo y coherente con las condiciones típicas de la estación seca y el inicio de la lluviosa en la región.

Durante el periodo específico de ejecución del experimento, la temperatura media registrada fue ligeramente inferior a la anual, con 28 °C, máxima de 30,5 °C y mínima de 23,6 °C. La evapotranspiración acumulada en este periodo fue de 342 mm, reflejando condiciones secas típicas del final de la estación seca e inicio de la transición hacia la estación lluviosa (IMN, 2024). La humedad relativa media durante este periodo se situó en torno al 65–75 %, con precipitaciones concentradas hacia finales de mayo en un rango de 80–100 mm, según registros climáticos locales (IMN, 2024).

En cuanto a las condiciones edáficas, predominan suelos Inceptisoles con textura franca a franco-arcillosa, de moderada fertilidad y buen drenaje (Naula, et al., 2024). La capacidad de retención de agua es intermedia, lo cual permite soportar cultivos forrajeros

con adecuada respuesta cuando se aplican prácticas de manejo como fertilización y conservación de humedad. El pH del suelo varía entre 5,5 y 6,5, con contenido de materia orgánica bajo a moderado (2–3 %), fósforo disponible limitado y niveles de potasio medianos, lo que hace recomendable la aplicación de correctivos y fertilizantes para alcanzar una buena productividad forrajera (MAG, 2023; FAO, 2006)

### **4.3. Muestreo de suelo**

Con el propósito de caracterizar las condiciones edáficas del sitio experimental, se realizó un muestreo de suelo en las parcelas de los cultivos. Se siguieron los lineamientos del Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliare del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional. Se realizó un muestreo compuesto representativo que consistente en la recolección de 15–20 submuestras tomadas a 0–20 cm de profundidad siguiendo un patrón en zigzag en una unidad homogénea de aproximadamente ½ ha. Las submuestras fueron homogeneizadas para conformar una muestra compuesta que se envió al laboratorio para su análisis. Los análisis se efectuaron en el laboratorio ubicado en Santa Lucía de Barva de Heredia, bajo condiciones controladas de temperatura (18–25 °C) y humedad relativa (< 80 %), conforme al protocolo interno IS-027-2023.

Las variables analizadas incluyeron propiedades químicas y nutricionales del suelo. El pH y la conductividad eléctrica fueron determinados según los métodos establecidos por la FAO GLOSOLAN-SOP-06 y GLOSOLAN-SOP-07, respectivamente. El contenido de carbono total y nitrógeno total se evaluó mediante combustión, siguiendo el procedimiento operativo GLOSOLAN-SOP-03 y GLOSOLAN-SOP-13. La acidez intercambiable y los cationes intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio) se determinó por el procedimiento que indica Henríquez-Henríquez (1995).

A partir de lo anterior, se calculó la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y la saturación porcentual de acidez, calcio, magnesio y potasio, así como las relaciones catiónicas (Ca/Mg, Ca/K, (Ca+Mg)/K). Además, se evaluó el fósforo disponible mediante el método de la FAO GLOSOLAN-SOP-10, y se cuantifican los micronutrientes cobre, zinc, manganeso y hierro según lo establece Henríquez-Henríquez et al., (1995). Los análisis se realizaron entre noviembre y diciembre de 2023, y los resultados obtenidos proporcionaron información clave para interpretar la fertilidad del suelo y fundamentar las recomendaciones de manejo nutricional y correctivo en el contexto del experimento.

#### **4.4 Establecimiento y manejo de los cultivos**

##### **4.4.1 Sorgo Sureño**

Se estableció un área de 1 ha de *Sorghum bicolor* L. cv Sureño. El terreno fue preparado con dos pases de rastra. Posteriormente, se aplicó glufosinato de amonio como herbicida de contacto. Luego de transcurridos cuatro días de la aplicación del quemante, se procedió a la siembra mecánica. La semilla utilizada tenía un porcentaje de germinación del 98 % y fue tratada previamente con fungicida sistémico (carboxin y captan) en dosis de 1 g/kg de semilla, e insecticida (imidacloprid y deltametrina) en dosis de 10 ml/70 ml de agua por cada kg de semilla.

La siembra se realizó a una densidad de 100,000 a 150,000 plantas/ha, utilizando una distancia entre hileras de 0,70 m y entre plantas de 0,07 a 0,10 m, garantizando entre 10 a 15 semillas por metro lineal a una profundidad de 0,02 a 0,03 m. Para el control de arvenses, se aplicó una única vez al suelo una combinación de pendimetalina en dosis de 2 a 3 L/ha y atrazina en dosis de 1,5 a 3 L/ha. En cuanto al control postemergente de arvenses, se aplicó paraquat en una sola ocasión, en una dosis de 1,5 a 3 L/ha. Finalmente, las plagas fueron controladas a los 35 (dds) con deltametrina en dosis de 75 a 100 ml/ha.

#### **4.4.1.1 Plan de fertilización Sorgo**

La planificación del programa de fertilización para el cultivo de *Sorghum bicolor* L. cv. Sureño se fundamentó en un enfoque de manejo nutricional integrado, basado en el principio de suficiencia y balance nutricional, con el objetivo de maximizar la eficiencia fisiológica del cultivo en ambientes tropicales de marcada estacionalidad. El diseño metodológico comprendió cuatro fases: (1) caracterización de la fertilidad edáfica, (2) estimación de requerimientos nutricionales por unidad de rendimiento, (3) análisis de brechas nutrimentales, y (4) formulación del plan de fertilización fraccionado.

##### **4.4.1.1.1. Caracterización de la fertilidad del suelo**

La interpretación de estos parámetros se realizó aplicando criterios de suficiencia nutricional establecidos por organismos técnicos reconocidos como el INTA (2023), el DICTA (2023), y García (2005), ajustados a las condiciones edafoclimáticas específicas del Pacífico Norte costarricense, caracterizadas por suelos francos a francos arcillosos, pH ligeramente ácido y CICE media a alta.

##### **4.4.1.1.2. Estimación de requerimientos nutricionales por unidad de rendimiento**

El plan de fertilización se diseñó con base en un rendimiento meta de 55 toneladas de forraje verde por hectárea, valor considerado óptimo para materiales forrajeros de ciclo corto como el cv. Sureño, bajo condiciones de manejo tecnificado y disponibilidad hídrica controlada. A partir de dicho objetivo productivo, se estimaron los requerimientos nutricionales en términos de extracción neta de nutrientes, considerando tanto las necesidades del cultivo como las pérdidas potenciales por procesos de inmovilización, volatilización y lixiviación.

Los valores de referencia utilizados para esta estimación fueron tomados de literatura técnica validada (INTA, 2023; García, 2005; Fageria et al., 2009), los cuales proporcionan coeficientes medios de absorción por tonelada de biomasa fresca producida. Se priorizaron los macronutrientes primarios (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) y secundarios (Ca, Mg, S), y

se valoró la relevancia de micronutrientes clave como Zn y B, cuya función es crítica en procesos enzimáticos, división celular y elongación de tejidos vegetales.

#### 4.4.1.1.3. Análisis de brechas nutrimentales y toma de decisiones

A partir de la comparación entre la oferta del suelo y la demanda nutricional del cultivo se procedió a identificar brechas de suministro para cada nutriente. Este diagnóstico permitió determinar el grado de suficiencia relativa por nutriente, y con ello definir el enfoque de intervención (suplementación parcial, corrección total o monitoreo sin intervención).

La siguiente Tabla 1 sistematiza la información considerada para la toma de decisiones, comparando los niveles edáficos medidos, la clasificación cualitativa de suficiencia, los requerimientos estimados del cultivo, y la estrategia de aplicación propuesta. Esta herramienta permitió estructurar un plan racional de fertilización, adaptado a las condiciones locales y al comportamiento esperado del cultivo.

**Tabla 1.**

*Comparación diagnóstica entre la oferta edáfica, requerimientos del cultivo y manejo proyectado por nutriente.*

Nutriente	Disponibilidad edáfica (IS-029-2023)	Clasificación	Requerimiento estimado (kg/ha) <sup>1</sup>	Estrategia metodológica de manejo
N (total)	0,21 %	Medio	180–200	Suplementación fraccionada en 3 fases: siembra, macollaje y prefloración
P	128 kg/ha	Alto	60–80	Aplicación localizada inicial, para garantizar disponibilidad en rizosfera

K (intercambiable)	514,8 kg/ha	Alto	100–120	No aplicado inicialmente. Monitoreo visual de síntomas
Ca	6800 kg/ha	Alto	—	No se aplicaron enmiendas. Relación Ca/Mg favorable
Mg	312 kg/ha	Moderado	—	No se aplicaron correctivos
Zn	4 mg/kg	Medio-alto	—	Evaluación posterior mediante análisis foliar y síntomas visuales
Cu	12,6 mg/kg	Adecuado	—	No se recomienda intervención
pH	6,6	Óptimo	—	No se requirió encalado

<sup>1</sup> Fuente: INTA (2023), García (2005), Fageria et al. (2009).

#### **4.4.1.1.4. Estrategia de fertilización fraccionada en sorgo forrajero: formulación y aplicación**

El plan de fertilización del sorgo forrajero cv. Sureño se estructuró de forma fraccionada, con el objetivo de ajustar el suministro de nutrientes a las etapas fenológicas de mayor demanda, reducir pérdidas y mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes (Fageria & Baligar, 2005). Para ello, se utilizaron como base los resultados del análisis químico de suelo, que mostraron un pH entre 6,2 y 6,6, niveles altos de fósforo disponible en un lote y moderados en otro, potasio intercambiable de moderado a alto y contenido bajo de nitrógeno total. Asimismo, se consideraron las recomendaciones técnicas reportadas para el cultivo en condiciones similares (INTA, 2023; DICTA, 2023; García, 2005) y la experiencia local en la zona de estudio.

Es importante señalar que, previo al diseño del plan de fertilización en lo referente al nitrógeno, debe considerarse que, aunque el análisis de suelo reporta un 0,18 % de este elemento (valor que se clasifica dentro de un rango medio), dicho resultado no representa la fracción disponible para el cultivo. El análisis de nitrógeno total refleja la suma de las formas orgánicas e inorgánicas presentes en el suelo; entre un 90 y un 98 % del nitrógeno total suele encontrarse asociado a la materia orgánica y a compuestos de descomposición lenta, lo que impide que esté disponible de forma inmediata para las plantas (Havlin et al., 2014; Brady & Weil, 2016).

Las plantas absorben el nitrógeno principalmente en sus formas minerales, amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Estas fracciones presentan una alta movilidad en el suelo donde el amonio puede inmovilizarse o fijarse en partículas de arcilla, mientras que el nitrato, por su solubilidad, se pierde con facilidad por lixiviación en condiciones de lluvia o riego excesivo (Fageria, 2009).

Debido a esta dinámica, el análisis de N total no constituye un indicador confiable de la disponibilidad efectiva de nitrógeno para el cultivo. En la práctica agronómica se asume que este nutriente debe ser suplido casi en su totalidad mediante fertilización, aunque una parte del nitrógeno orgánico pueda liberarse gradualmente a través de la mineralización. Este proceso depende de factores edafoclimáticos como el nivel de materia orgánica, la temperatura, la humedad y la aireación del suelo (Raun & Johnson, 1999; FAO, 2006).

En síntesis, el valor de N total obtenido en los análisis de suelos puede considerarse como un indicador indirecto del contenido de materia orgánica, pero no como una medida directa de la disponibilidad del nutriente para los cultivos. Por esta razón, en este caso se parte del supuesto de que el requerimiento de nitrógeno debe cubrirse principalmente mediante la aplicación de fertilizantes.

El fraccionamiento se diseñó para cubrir tres momentos críticos del ciclo del cultivo:

- Aplicación de base (siembra): se aplicó el 50 % del nitrógeno total, el 100 % del fósforo y el 50 % del potasio, además de azufre y micronutrientes si eran requeridos. El fósforo se colocó en banda a 5 cm lateral y ligeramente por debajo de la semilla, para mejorar su disponibilidad y favorecer el desarrollo radicular inicial. El nitrógeno inicial buscó asegurar un arranque vigoroso, mientras que el potasio aportado en esta fase complementa las reservas del suelo para el crecimiento temprano.
- Cobertura 1 (macollaje, 20–25 días después de la siembra): se aplicó el 25 % del nitrógeno y el 25 % del potasio, dado que en esta etapa el cultivo presenta una aceleración en la formación de tallos y hojas, incrementando la demanda de N para la síntesis de proteínas y de K para la regulación hídrica y la translocación de fotosintatos.
- Cobertura 2 (prefloración, 40–45 días después de la siembra): se suministró el 25 % restante del nitrógeno y del potasio, coincidiendo con el máximo crecimiento vegetativo y la antesala al llenado de granos, lo que asegura la disponibilidad de nutrientes para sostener la fotosíntesis y la acumulación de biomasa.

En las aplicaciones de cobertura el nitrógeno se aplicó al voleo en momentos con humedad adecuada o previo a lluvias moderadas, minimizando las pérdidas por volatilización. En adición, para la urea se consideró el uso de inhibidores de nitrificación para prolongar la disponibilidad en el suelo. Este esquema permitió alinear el suministro de nutrientes con las necesidades fisiológicas del cultivo, tomando en cuenta la fertilidad inicial del suelo y las condiciones climáticas locales, con la posibilidad de ajustar las dosis en campañas futuras a partir de los resultados productivos y de calidad del forraje.

#### **4.4.1.2 Composición bromatológica de sorgo sureño**

Para la evaluación de la calidad nutricional del forraje, se realizó un muestreo representativo de la planta entera de sorgo cv. Sureño al momento de la cosecha. El estudio contempló dos parcelas de aproximadamente 0.5 hectáreas cada una. En cada parcela, se seleccionaron 12 puntos de muestreo distribuidos de forma aleatoria, donde se recolectaron tramos de tres metros lineales de plantas. Las plantas fueron cortadas completamente, dejando una base de aproximadamente 5 cm sobre el nivel del suelo.

Las muestras recolectadas en campo fueron transportadas fuera de la parcela, donde se procedió a pesarlas y mezclarlas con el resto del material correspondiente a la misma unidad. Posteriormente, el material vegetal fue picado y homogeneizado, y mediante cuarteo se tomó una submuestra de aproximadamente 1 kg por parcela. Esta submuestra fue empacada en bolsas plásticas debidamente rotuladas y selladas herméticamente, y se trasladó en hieleras con refrigeración al Laboratorio de Nutrición Animal de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional (ECA-UNA) para su análisis.

En el laboratorio, se procedió a determinar los siguientes parámetros bromatológicos: materia seca (MS a 60 °C), proteína cruda (PC), extracto etéreo (EE) y contenido de cenizas (Cs), de acuerdo con los métodos establecidos por la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (AOAC, 1990). Adicionalmente, los contenidos de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y lignina se determinaron conforme a la metodología descrita por Goering y Van Soest (1970).

#### **4.5 Ensilaje**

La cosecha del cultivo forrajero se realizó 80 DDS, cuando el sorgo se encontraba en el estado fenológico R3 (grano lechoso), correspondiente a la etapa óptima para el ensilaje de planta entera. El corte se efectuó de forma mecanizada, con una altura de corte de 5 cm sobre la superficie del suelo, con el objetivo de maximizar la recuperación de biomasa y minimizar residuos.

Posterior a la cosecha del sorgo forrajero, se procedió a la elaboración del ensilaje utilizando la modalidad de silo tipo anillo, una estructura de forma cilíndrica compuesta por anillos desmontables. Cada silo fue montado sobre una base cementada con leve inclinación y sistema de drenaje, para facilitar la recolección de lixiviados durante la fase inicial de fermentación.

Cada silo presentó 2 metros de diámetro y 0,9 metros de altura, permitiendo una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 2,800 kg de forraje fresco por unidad. El material vegetal fue troceado mecánicamente hasta obtener un tamaño aproximado de una pulgada (2,5 cm), y se colocó en capas de aproximadamente 200 kg, con una densidad de 700 kg/m<sup>3</sup> por capa, garantizando condiciones anaeróbicas desde la base del silo.

Durante el llenado, se aplicaron aditivos por capa con el fin de mejorar el proceso fermentativo del material ensilado como la melaza y la adición de urea para incrementar la concentración de proteína cruda del ensilaje: 4 kg de urea granulada como fuente de nitrógeno no proteico y 8 kg de melaza por capa, como fuente de carbohidratos solubles para estimular la actividad de bacterias ácido-lácticas. Cada silo fue conformado por 14 capas sucesivas, resultando en un total de 11,200 kg de material ensilado distribuidos en cuatro silos de anillo.

Una vez finalizado el llenado, se procedió a desmontar la estructura del anillo y se selló herméticamente el silo con plástico agrícola de 400 µm de espesor, el cual fue asegurado con cuerda de nailon (piola) alrededor del perímetro. Los bordes sobrantes fueron cubiertos con una barrera de arena, como medida adicional para evitar la infiltración de aire. Por último, los silos fueron protegidos de la radiación solar directa mediante la colocación de lonas de polietileno opacas, a fin de mantener la estabilidad térmica durante el proceso de fermentación.

## 4.6 Diseño experimental, variables de estudio y análisis estadístico

### 4.6.1 Tratamientos y diseño experimental

Se implementó un diseño experimental cruzado 3×3, reconocido por su capacidad para controlar la variabilidad entre unidades experimentales y aumentar la precisión en la comparación de tratamientos, ya que cada animal actúa como su propio control (Wellek & Blettner, 2020; Dwan et al., 2019). En estudios de nutrición animal, este tipo de diseño permite reducir el efecto de las diferencias individuales y optimizar el uso de recursos (Zheng et al., 2021; St-Pierre & Weiss, 2019).

El experimento incluyó nueve vacas en lactancia, distribuidas en tres bloques equilibrados según número de partos y días en lactancia, las cuales rotan de forma balanceada entre tres tratamientos dietéticos (Tabla 2).

#### **Tabla 2.**

*Descripción de los tratamientos experimentales con base a los requerimientos de proteína y energía.*

Nº Tratamiento	Descripción	Abreviatura
1	100 % de suplemento base (6,07 kg MS/animal/día, equivale a 7.17 en MF/animal/día).	D_C
2	Suplementación conformada por el 85 % de TC + 15 % de silo de sorgo (7,28 kg MS/animal/día, equivale a 14.34 MF/animal/día)	D_15
3	Suplementación conformada por el 70 % de TC + 30 % de silo de sorgo (7,36 kg MS/animal/día, equivale a 21.35 MF/animal/día)	D_30

Nota: El 15 % y el 30 % corresponden al reemplazo de materia seca del suplemento base por ensilaje de sorgo.

Fuente: Elaboración propia.

Cada periodo experimental tuvo una duración total de 21 días: 15 días de adaptación a la dieta correspondiente y 7 días para la medición de variables productivas y de calidad de

la leche. La unidad experimental se definió como la combinación vaca–periodo, lo que permite evaluar el efecto de cada tratamiento en cada animal de forma independiente.

La rotación de tratamientos se organizó siguiendo un esquema balanceado para minimizar posibles efectos de secuencia o arrastre, garantizando que cada tratamiento apareciera una vez en cada periodo para cada grupo (Tabla 3).

**Tabla 3.**

*Esquema del diseño crossover 3×3 para la rotación de tratamientos entre bloques y periodos*

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Periodo 1	D_C	D_15	D_30
Periodo 2	D_15	D_30	D_C
Periodo 3	D_30	D_C	D_15

Este diseño permitió evaluar el efecto de tres niveles de inclusión de ensilaje de sorgo (0 %, 15 % y 30 %) en la dieta de vacas en lactancia sobre variables de producción y composición de la leche, bajo condiciones controladas de variabilidad fisiológica y temporal.

#### **4.6.2 Análisis estadístico**

El análisis estadístico se basó en el diseño cruzado descrito en la sección 4.6.1, lo que permitió modelar la respuesta productiva y la composición de la leche bajo tres tratamientos dietéticos aplicados de forma rotacional. Para ello, se empleó un modelo lineal mixto que incluyó como efectos fijos el tratamiento y el periodo, y consideró a la vaca como efecto aleatorio, incorporando además el número de partos como covariable de ajuste. Esta estructura estadística posibilita comparar los tratamientos controlando la variabilidad individual y los efectos asociados al periodo experimental, garantizando estimaciones más precisas y libres de sesgos por diferencias entre animales.

Para capturar el efecto temporal del diseño, se generó la variable categórica periodo, que indicó el momento específico de medición para cada animal dentro de la secuencia experimental. Además, se incluyeron como covariables fisiológicas el número de partos (No\_Partos) y los días en lactancia (DEL). No obstante, esta última fue descartada en el modelo final, al no contribuir de manera significativa a la explicación de la variabilidad observada.

El modelo lineal mixto ajustado (*Ec. 1*) integró efectos fijos para los factores trat (tratamiento) y period (periodo), junto con la covariable continua No\_Partos. El efecto aleatorio se atribuyó a las vacas individuales, con el fin de modelar la variabilidad no explicada por los efectos fijos, bajo la suposición de una distribución normal con  $\mu = 0$  y varianza  $\sigma_u^2$ .

En cuanto al error residual, se asumió independencia entre observaciones y homogeneidad de varianzas. No se impuso una estructura de correlación específica entre mediciones repetidas, ya que las evaluaciones exploratorias evidenciaron una baja dependencia temporal. La significancia estadística se evaluó utilizando un nivel de confianza de  $\alpha = 0,05$ , considerando diferencias significativas cuando  $p < 0,05$ .

$$Y_{ijkl} = \mu + trat_i + period_j + \beta_1(No.Parto_k) + u_k + \varepsilon_{ijkl} \quad Ec. 1$$

donde:

$Y_{ijkl}$  es la observación de la producción de leche (kg) para la vaca  $k$ , bajo el tratamiento  $i$  y en el periodo  $j$ .

$\mu$ , es la media general.

$trat_i$ , es el efecto fijo del tratamiento dieta  $i$  ( $i = D_C, D_{15}, D_{30}$ )

$period_j$ , es el efecto fijo del periodo de medición  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ).

$\beta_1$ , es coeficiente de regresión asociado a la covariable continua número de partos

$No. Parto_k$ , es el número de partos correspondiente a la vaca  $k$ .

$u_k$ , es el efecto aleatorio asociado a la vaca  $k$ ,  $u_k \sim N(0, \sigma_u^2)$ .

$\varepsilon_{ijkl}$ , es el error aleatorio,  $\varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$

Las hipótesis estadísticas formuladas para cada variable dependiente evaluada (producción de leche y parámetros de calidad) se expresan mediante un contraste entre las medias poblacionales asociadas a los tres tratamientos (D\_C, D\_15, D\_30). La hipótesis nula establece que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que la hipótesis alternativa plantea que al menos uno de ellos difiere significativamente. Estas hipótesis fueron evaluadas mediante análisis de varianza dentro del marco de un modelo lineal mixto, considerando el efecto aleatorio de la vaca y el efecto fijo del tratamiento, conforme al diseño experimental cruzado aplicado:

Sea  $Y_{ij}$  una variable dependiente continua de interés (producción de leche, grasa, proteína, sólidos totales), observada en la vaca  $j$  bajo el tratamiento  $i$ , donde  $i \in \{D_C, D_{15}, D_{30}\}$ , entonces:

La hipótesis nula ( $H_0$ ):

$$H_0 = \mu_{D_C} = \mu_{D_{15}} = \mu_{D_{30}}$$

Lo anterior significa que no existen diferencias significativas entre las medias poblacionales de los tratamientos en la variable dependiente  $Y$ .

La hipótesis alternativa:

$$(H_1): H_1: \exists i, j \in \{D_C, D_{15}, D_{30}\}, i \neq j \text{ tal que } \mu_i \neq \mu_j$$

Lo que indica que existe al menos una diferencia significativa entre los tratamientos en su efecto sobre la variable dependiente  $Y$ .

El análisis estadístico se efectuó mediante el software R (R Core Team, 2023), empleando los paquetes lme4, lmerTest y emmeans. Se ajustaron modelos lineales mixtos utilizando la función lmer(), considerando como efectos fijos el tratamiento dieta (descrito en la sección 4.6), el bloque, el número de partos y los días en lactancia (DEL), mientras que la identificación individual de cada vaca se incluyó como efecto aleatorio, dado que cada animal recibió los tres tratamientos a lo largo del experimento. Para la selección del modelo más parsimonioso se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC).

La validación de los supuestos del modelo se realizó a través de la inspección visual de los residuos estandarizados mediante gráficos QQ y gráficos de residuos ajustados para evaluar la normalidad y homocedasticidad, respectivamente. Cuando se detectaron efectos significativos del tratamiento ( $p < 0,05$ ), se procedió a comparar las medias marginales ajustadas mediante la función emmeans(), aplicando la prueba de Tukey con corrección por multiplicidad. Esta corrección se utiliza para controlar el riesgo acumulado de error tipo I (falsos positivos) que surge al realizar múltiples comparaciones simultáneas entre tratamientos, asegurando que el nivel de significancia global se mantenga en  $\alpha = 0,05$ .

Finalmente, los resultados se representaron gráficamente mediante diagramas de caja (boxplots) elaborados con el paquete ggplot2, lo que permitió visualizar la distribución de las variables dependientes en función de los tratamientos evaluados.

#### **4.7 Balance de las dietas por tratamiento**

Las dietas fueron formuladas utilizando el software Spartan Dairy 3, el cual cuenta con una interfaz similar a una hoja de cálculo. Se inició un nuevo documento en el que se visualizaron columnas destinadas a los ingredientes, análisis nutricional y requerimientos del animal. Se seleccionó como referencia una vaca lactante con un peso de 470 kg y una producción diaria de 10 kg de leche.

A continuación, se seleccionaron los ingredientes de la dieta desde la biblioteca del software, actualizando sus valores nutricionales con base en los análisis bromatológicos del

silo de sorgo y la información de etiqueta de los suplementos: alimento balanceado (AB), harina de soya y maíz molido.

Una vez definidos todos los ingredientes, se ingresó la cantidad correspondiente en kg/día para cada uno. El programa analizó el aporte nutricional de cada componente, permitiendo verificar si la dieta cumplía con los requerimientos de energía neta de lactancia (ENL), materia seca (MS) y proteína cruda (PC). Las cantidades fueron ajustadas tantas veces como fue necesario hasta lograr un balance adecuado. Este procedimiento se repitió para los tres tratamientos (T\_C, T\_15 y T\_30), asegurando que todas las dietas (isoproteicas e isoenergéticas) tuvieran un aporte energético y proteico equivalente dando como resultado la Tabla 4 .

**Tabla 4.**

*Composición de las dietas experimentales según tratamiento*

	Suplementación (kg)		
	TC	T15%	T30%
Silo de sorgo	0	8	16
Carbonato de calcio	0.050	0.050	0.050
Sal	0.100	0.100	0.100
Minerales	0.100	0.100	0.100
Urea	0.120	0.090	0
Harina de soya	1	0.80	1
Melaza	1.60	1.50	1.50
Maíz molido	2	1.90	1
AB1	2.40	2	1.80
Silopaca	12	10	8

Nota: TC: tratamiento con la dieta control, sin suplementación, T15: tratamiento con el 15 % de suplementación con silo de sorgo y T30: tratamiento con el 30 % de suplementación con silo de sorgo. 1 AB: Alimento Balanceado.

#### 4.7 Componente animal

Se utilizaron 9 vacas identificadas individualmente por arete tipo bandera y con biotipos encastados con Gyrolando, Pardo Suizo y Gyr lechero, entre el primer y segundo tercio de lactancia. Se organizaron en tres bloques de tres vacas cada uno, generados según producción de leche, número de partos y días de lactancia (DEL) (Tabla 5).

**Tabla 5.**

*Bloques de vacas según producción de leche (kg), número de partos y días de lactancia (DEL).*

<b>Criterios</b>	<b>Bloque 1</b>	<b>Bloque 2</b>	<b>Bloque 3</b>
Producción de leche (kg)	7,1	6,1	5,3
Número de partos	2,3	2,7	1.6
Días de lactancia (DEL)	113	123	115

La información para el agrupamiento de los animales se generó por medio de las mediciones con Waikato Milk Meterse de la producción de leche, los registros de parición y número de partos a partir del año 2020, seleccionados de un total de 46 vacas en producción. La información se validó con las bitácoras y sistemas de control electrónicos de la empresa.

#### 4.8 Alimentación y manejo de las vacas

La alimentación base de las vacas consistió en el consumo de silopaca de pasto *Digitaria decumbens* cv. Transvala, sal mineralizada y agua a libre disposición, disponibles en el potrero con Angleton (*Dichanthium aristatum*) con una superficie de 7,000 m<sup>2</sup>.

Para el control de parásitos externos, se realizaron desparasitaciones con amitraz al inicio del ensayo y posteriormente cuando la carga parasitaria lo requirió. En el caso de los parásitos internos, se aplicó una única dosis de fenbendazol a todos los animales al inicio de las pruebas de respuesta animal procurando en todo momento el bienestar de los individuos.

Asimismo, en aquellos casos en los que la salud de los animales se vio comprometida y no fue posible aplicar medidas preventivas, se recurrió al uso de antibióticos. Estas intervenciones se realizaron bajo la supervisión y recomendación del médico veterinario responsable de la finca. Todas las acciones relacionadas con la atención sanitaria de los animales se efectuaron en estricto cumplimiento de los principios de bienestar animal establecidos por el Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA) de Costa Rica, los cuales garantizan el respeto a la integridad física y emocional de los animales durante los procedimientos productivos y experimentales.

Además de la dieta base de silopaca, los animales fueron suplementados dos veces al día en los cepos de la sala de ordeño con una mezcla compuesta por silo de sorgo, carbonato de calcio, sales minerales, urea, harina de soya, melaza, maíz molido, antibiótico (cuando correspondía) y silopaca adicional, según el tratamiento asignado a cada bloque.

El ordeño se realizó dos veces al día mediante equipo mecánico, siguiendo un protocolo estructurado que garantizara el control higiénico y el suministro correcto de la dieta. Dicho procedimiento incluyó:

- a) Ingreso de las vacas en estudio una vez finalizado el ordeño rutinario, para permitirles tiempo suficiente de consumo de la suplementación;
- b) Identificación de cada animal mediante cintos de color, según el bloque experimental, lo cual facilitó la asignación adecuada de dietas;
- c) Desinfección de los pezones con solución a base de yodo;
- d) Secado individual de cada cuarto con toallas limpias (una por cuarto);
- e) Colocación correcta de las pezoneras para el inicio del ordeño;
- f) Estimulación mediante masaje de la ubre durante el ordeño para favorecer la eyección de la leche alveolar;
- g) Verificación posterior para asegurar que no quedaran residuos de leche, reduciendo el riesgo de mastitis;
- h) Aplicación del sellador a base de yodo al finalizar el ordeño, manteniendo a los animales en el sitio hasta que consumieran completamente la suplementación ofrecida.

#### **4.9 Procedimiento experimental**

El período de evaluación tuvo una duración total de 63 días, desarrollado durante la época seca (marzo a junio). Este lapso se dividió en tres ciclos experimentales de 21 días cada uno, correspondientes al diseño cruzado implementado. Cada ciclo comprendió 14 días de adaptación a la dieta asignada según el tratamiento experimental, seguidos por 7 días de medición de las variables productivas y de calidad de la leche. El protocolo aplicado se estructuró en los siguientes pasos:

1. Traslado de los animales: las vacas del estudio fueron conducidas diariamente desde el potrero de alojamiento hasta las instalaciones de ordeño y suplementación.
2. Manejo del silo de sorgo: el silo requerido para cada tratamiento fue trasladado a la sala de alimentación. Este material se utilizó a partir de los 120 días posteriores a su ensilado, asegurando una fermentación adecuada antes de su apertura.
3. Preparación de las dietas: se organizaron tres baldes etiquetados con los tratamientos respectivos, en los cuales se mezclaron los ingredientes de la suplementación (alimento concentrado, soya molida, carbonato de calcio y maíz molido). Por separado, se alistaron otros tres recipientes también identificados donde se adiciona melaza y en dos de los tratamientos, urea diluida en agua.
4. Ordeño y toma de muestras: se llevó a cabo el ordeño según la rutina establecida. Durante la semana de medición, tres veces por semana se registró la producción individual de leche y se recolectó una muestra por vaca para el análisis bromatológico. Las muestras fueron etiquetadas con el número de arete correspondiente.
5. Suplementación según tratamiento: la suplementación fue ofrecida de forma fraccionada en los dos ordeños diarios. El consumo fue voluntario y no se forzó a los animales a ingerir la totalidad de la dieta. El rechazo fue cuantificado mediante pesaje y registrado individualmente con base en el número de arete y tratamiento correspondiente.

6. Retorno al potrero: finalizado el consumo del suplemento, los animales regresaban al potrero de alojamiento, donde permanecían durante todo el ensayo con acceso libre a silopaca de pasto Angleton como base forrajera.

#### **4.10 Variables a evaluar**

##### **4.10.1 Composición bromatológica del silo de sorgo y componentes de la dieta**

Para la determinación bromatológica del silo de sorgo, se recolectó una muestra representativa de cada uno de los silos tipo anillo, aproximadamente 120 días después de su elaboración. En cada silo se tomaron cinco submuestras mediante muestreo aleatorio con barreno, procurando abarcar toda la profundidad del silo y evitando los bordes para reducir el riesgo de contaminación por oxidación. Las submuestras se homogeneizaron, se procedió al cuarteo y se extrajo una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg, la cual fue colocada en una bolsa plástica debidamente identificada, sellada herméticamente y transportada el mismo día en hielera al Laboratorio de Nutrición Animal de la Escuela de Ciencias Agrarias (ECA) de la Universidad Nacional (UNA), donde se realizaron los respectivos análisis bromatológicos.

En el laboratorio, el material fue analizado mediante técnicas de química húmeda, con base en los siguientes procedimientos:

- a) Materia seca (MS): determinada por secado en estufa a 60 °C durante 48 horas.
- b) Proteína cruda (PC), extracto etéreo (EE) y cenizas (Cs): analizados conforme a los métodos oficiales de la *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC, 1990).
- c) Fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD) y lignina: cuantificados siguiendo la metodología de Goering y Van Soest (1970).
- d) Energía Neta de Lactancia (ENL): estimada utilizando la metodología propuesta por Weiss (2004).

#### **4.10.2. Producción de leche**

La producción diaria de leche (kg) se determinó durante los siete días correspondientes a la semana de medición, conforme a lo establecido en el protocolo experimental. El rendimiento individual de cada vaca fue registrado utilizando un dispositivo Waikato Milk Meter, instalado entre la unidad de ordeño y la tubería principal de recolección de leche.

Este equipo fue debidamente calibrado antes de su uso, con el fin de garantizar que el volumen recolectado en el frasco medidor refleja con precisión la cantidad total de leche producida por cada animal, precisión del 100 gr dada por la mitad mínima división.

Los datos diarios obtenidos fueron anotados manualmente en las bitácoras de campo y posteriormente, digitalizados en una hoja electrónica para su procesamiento y análisis estadístico.

#### **4.10.3. Composición nutricional de la leche**

Durante el período de medición, se recolectaron diariamente aproximadamente 25 ml de leche por vaca, específicamente en el ordeño de la mañana. Por cada animal, se obtuvieron tres muestras a lo largo de los siete días de medición correspondientes a cada periodo experimental, lo que resultó en un total de 27 muestras por tratamiento y 81 muestras en todo el estudio. Las muestras fueron tomadas directamente del frasco medidor del Waikato Milk Meter, instalado en cada punto de ordeño (Anexo 10).

La leche fue depositada en bolsas de muestreo esterilizadas (Whirl-Pak®) con cierre hermético, diseñadas específicamente para la recolección y transporte de muestras líquidas. Todas las bolsas fueron debidamente rotuladas e inmediatamente almacenadas en hieleras para preservar su integridad hasta el momento del análisis.

El análisis de composición bromatológica de la leche se realizó mediante el equipo LactoScan SP, evaluando las siguientes variables: grasa, proteína, lactosa y sólidos totales (ST). El procedimiento aplicado en el análisis fue el siguiente:

1. Selección de la especie origen de la leche en el sistema.
2. Limpieza y desinfección interna del equipo utilizando una solución alcalina (LactoDaily).
3. Vertido de la muestra en un recipiente plástico de 100 ml, conectado al tubo de entrada del analizador.
4. Activación del equipo para la lectura automática.
5. Registro de los valores de temperatura, grasa, proteína, lactosa y sólidos totales.
6. Eliminación segura de la muestra procesada.
7. Limpieza final del equipo con agua destilada y una solución ácida (LactoWeekly).

#### **4.11 Determinación de la estructura de costos**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo-descriptivo, orientado a la determinación de la estructura de costos de establecimiento, mantenimiento y cosecha del cultivo de sorgo cv. Sureño, así como del costo de elaboración del ensilaje en sistemas bovinos de doble propósito en el sitio de estudio.

Además, se estimaron los costos por kilogramo de materia fresca (MF) y de materia seca (MS) del material final ensilado, con el fin de conocer el valor económico del alimento ofrecido en la dieta. Para ello, se delimitó el sistema productivo, definiendo como unidad de análisis una hectárea de cultivo en condiciones representativas de una ganadería doble propósito de bajura, con un nivel tecnológico mecanizado de intensidad media.

Posteriormente, se identificaron los componentes de costos fijos y variables asociados al proceso productivo. Dentro de los costos fijos se consideró la depreciación lineal de la maquinaria agrícola (tractor, picadora y carretas) con una vida útil estimada de

10 años, así como la amortización de la infraestructura utilizada para el almacenamiento (silos tipo anillo). En cuanto a los costos variables, se incluyeron los rubros agronómicos (semilla, fertilizantes, herbicidas), el procesamiento del material (uso de aditivos) y la mano de obra requerida en cada etapa.

La recopilación de datos se realizó mediante encuestas estructuradas al productor, así como también a proveedores de insumos, complementada con información secundaria de entidades como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Los precios de referencia se actualizaron a valores de 2025 utilizando índices del Banco Central de Costa Rica.

Se diseñaron planillas de cálculo especializadas que integraron los componentes de costos en una matriz de análisis por rubro, unidad, cantidad y precio unitario. La depreciación de activos se calculó considerando un valor residual del 10 % para maquinaria. La producción neta de forraje y ensilaje se estimó aplicando factores de corrección por pérdidas durante la corta y la fermentación del 5 % al 10 %, validados mediante muestreos al momento de la cosecha y uso de los ensilajes.

#### **4.11.1 Determinación cálculo de costo por nutriente**

En relación con el análisis económico del ensilaje de sorgo, se realizó el cálculo por nutriente considerando su composición (Tabla 11). Para ello, se aplicó la metodología de costo por unidad de nutriente ampliamente empleada por instituciones de extensión agropecuaria y centros de investigación (Gessner, 2024; Bethard, 1998). Este enfoque permite comparar el valor relativo de distintos alimentos en función de su contenido nutricional y su costo real por unidad de materia seca (MS).

La base de cálculo y conversión a materia seca se estimó considerando el costo base del ensilaje se expresó en USD/kg MS, según la siguiente relación (Gessner, 2024):

$$\text{Costo por kg de MS} = \frac{\text{Costo total por ton}}{1000 * \text{Fracción de MS}} \quad \text{Ecu 2.}$$

Esta estandarización permite eliminar el efecto de la humedad y realizar comparaciones homogéneas entre alimentos con diferentes contenidos de agua (Utah State University Extension, 2020).

Por otro lado, la determinación del costo por nutriente se calculó a partir del costo por kilogramo de MS (0,258 USD/kg MS), se estimó el costo por unidad de proteína cruda (PC), extracto etéreo (EE) y energía neta de lactancia (ENL), según las fórmulas recomendadas por (Bethard, 1998):

$$\text{Costo por kg de PC} = \frac{\text{Costo por kg de MS}}{\text{Fracción de PC}} \quad \text{Ecu 3.}$$

$$\text{Costo por kg de EE} = \frac{\text{Costo por kg de MS}}{\text{Fracción de EE}} \quad \text{Ecu 4.}$$

$$\text{Costo por kg de ENL} = \frac{\text{Costo por kg de MS}}{\text{Fracción de ENL (Mcal/kg MS)}} \quad \text{Ecu 5.}$$

El valor de ENL se fijó en 1,2 Mcal/kg MS, correspondiente a sorgos forrajeros ensilados en estado intermedio de madurez y con adecuada compactación, de acuerdo con la literatura técnica (Pino F & Heinrichs AJ, 2017).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis de suelo y plan de fertilización

El análisis de suelos realizado en las parcelas de sorgo en la finca La Josefina reveló variaciones relevantes en las condiciones edáficas que justificaron un ajuste diferencial en los planes de fertilización. El pH del suelo osciló entre 5.9 (ligeramente ácido) y 6.6 en el

lote 1 de sorgo, lo que sugiere una acidez moderada favorable para cultivos tropicales, aunque con potenciales limitaciones en la disponibilidad de fósforo en suelos más ácidos.

Los niveles de fósforo disponible (P) mostraron una marcada heterogeneidad, siendo altos en el sorgo (hasta 128 kg/ha en el lote 1), lo que fundamentó el uso de fertilizantes de arranque con alto contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (cómo la fórmula 18-46-0) en este último. Asimismo, las concentraciones de potasio intercambiable (K) variaron desde 514.8 kg/ha en sorgo, lo cual fue decisivo para ajustar la fertilización potásica durante el desarrollo de los cultivos.

La capacidad de intercambio catiónico (CICE), con valores entre 12 y 19 cmol(+)/L, indicó una capacidad media a alta de retención de nutrientes, especialmente favorable en el lote 1 de sorgo. Este parámetro, junto con los niveles de carbono total (0.6 % a 2.4 %), respaldó la estrategia de no aplicar enmiendas orgánicas adicionales antes de la siembra.

Con base en estos resultados (ver Tabla 6.), se diseñaron planes de fertilización diferenciados para cada cultivo (secciones 5.1.1 a 5.1.3), priorizando la sincronización entre la oferta de nutrientes y las fases fenológicas críticas. El uso de fertilizantes foliares quelatados se recomendó particularmente para cultivos como la soya y el maíz, donde el pH ácido y los niveles moderados de micronutrientes podrían limitar la absorción en fases tempranas del desarrollo.

**Tabla 6.**

*Análisis de suelo de las parcelas establecidas con las especies forrajeras.*

Análisis	Unidades	Sorgo Lote 1	Sorgo Lote 2
pH	UpH	6,6	6,2
Conductividad eléctrica	ms/cm	0,063	0,016
Carbono total	%	2,4	0,6
Nitrógeno total	%	0,21	0,17
Acidez	cmol/l	0,090	0,090

Calcio	kg/ha	6.800	4.000
Magnesio	kg/ha	312	528
Potasio	kg/ha	514,8	163,8
CICE	cmol(+)/l	19	12
Fósforo	kg/ha	128	7,6
Cobre	kg/ha	12,6	12
Zinc	kg/ha	4	4,6
Manganeso	kg/ha	6	11,2
Hierro	kg/ha	128	180
Sat acid	%	0,5	0,7
Sat Ca	%	89	80
Sat Mg	%	7	18
Sat K	%	3	1,7
Ca/Mg	NA	13	4,4
Ca/K	NA	26	46
Ca+Mg/K	NA	28	57

### 5.1.1. Plan de fertilización Sorgo

Con base en los resultados del análisis de suelo (Tabla 6) y las exigencias nutricionales del sorgo forrajero, se diseñó un esquema de fertilización ajustado a las condiciones edáficas del sitio y a la meta productiva de 55 toneladas de forraje por hectárea. El programa contempló aplicaciones fraccionadas de macronutrientes en tres momentos críticos del desarrollo fenológico del cultivo: siembra, macollaje y prefloración, con el objetivo de sincronizar la disponibilidad de nutrientes con la demanda fisiológica de la planta y optimizar la eficiencia en su absorción (Demagnet y Canales, 2020).

Durante la etapa de pre-siembra no se aplicaron enmiendas orgánicas ni correctores de magnesio, al considerarse adecuada la relación calcio/magnesio (Ca/Mg), estimada por

debajo del umbral crítico de 10:1. En la siembra (DDS 0), se incorporó una fórmula 18-46-0 a razón de 180 kg/ha, lo que equivale a 32,4 kg/ha de nitrógeno (N) y 82,8 kg/ha de fósforo ( $P_2O_5$ ). Esta aplicación se realizó en banda, a 5 cm de profundidad, para mejorar la eficiencia en la absorción del fósforo.

Durante el estadio de macollaje (DDS 20–25), se aplicó urea granulada al 46 % a una dosis de 175 kg/ha (equivalente a 80,5 kg/ha de N), distribuida al voleo junto con un inhibidor de la nitrificación (DMPP), a fin de minimizar las pérdidas por volatilización y lixiviación. Posteriormente, en la fase de pre floración (DDS 40–45), se realizó una segunda aplicación de urea al 46 %, a una dosis de 155 kg/ha (equivalente a 71,3 kg/ha de N), también aplicada de manera superficial.

La Tabla 7 resume de forma sintética las fuentes utilizadas, las dosis aplicadas y el aporte de nutrientes principales por hectárea, estructuradas según la etapa fenológica del cultivo.

**Tabla 7.**

*Balance nutricional del cultivo de sorgo forrajero.*

<b>Nutriente</b>	<b>Aporte total (kg/ha)</b>
<b>N</b>	184.2 (fertilizantes)
<b><math>P_2O_5</math></b>	82.8
<b><math>K_2O</math></b>	0

En suelos con capacidad de intercambio catiónico (CICE) media a alta, como los presentes en la región de Jicaral, la disponibilidad de micronutrientes suele mantenerse en niveles adecuados cuando el pH se encuentra en un rango ligeramente ácido, entre 6.2 y 6.6. Sin embargo, para validar la suficiencia nutricional desde una perspectiva fisiológica, se recomienda realizar análisis foliares durante la etapa de macollaje, etapa en la cual se intensifica la demanda de nutrientes. Los valores críticos comúnmente aceptados en tejido foliar son <15 ppm para zinc (Zn) y <0.2 % para azufre (S), según lo propuesto por Marschner (2012) y Reuter & Robinson (1997).

Si bien la simplificación del plan de fertilización puede contribuir a una reducción de los costos operativos, esta estrategia implica un mayor riesgo agronómico si no se cuenta con una adecuada validación de las reservas edáficas. En este contexto, el uso de fertilizantes foliares representa una herramienta eficaz para corregir deficiencias específicas de micronutrientes durante fases críticas del crecimiento, permitiendo una absorción más rápida y directa por parte del cultivo, y favoreciendo su desarrollo y rendimiento potencial (Fageria et al., 2009).

## **5.2. Establecimiento y manejo de los cultivos**

El proceso de intercambio de saberes entre actores locales y técnicos permitió la adecuación de protocolos de manejo adaptados a las condiciones específicas de los sitios de estudio (Anexo 12). Los resultados demuestran que las especies evaluadas poseen un alto potencial para integrarse en sistemas de producción ganadera, evidenciado por su perfil nutricional óptimo, capacidad de adaptación a condiciones edafoclimáticas variables y resistencia al estrés hídrico mediante mecanismos eficientes de rebrote. Estas características las posicionan como alternativas viables para fortalecer la resiliencia de los sistemas agropecuarios frente a escenarios climáticos adversos (Demagnet y Canales, 2020).

Los protocolos realizados se dividieron en 4 secciones: preparación del terreno, siembra, mantenimiento (fertilización, manejo de plagas, enfermedades) y cosecha, a continuación se presenta el protocolo de producción de sorgo sureño implementado, en adición se realizaron el de maíz EJM Blanco y de soya Cigras 06 los cuales se pueden ver en el Anexo 7.

- Preparación del terreno

El uso del arado permitió romper la capa superficial compactada del suelo, mejorando la aireación y facilitando el desarrollo del sistema radicular de las plantas. Posteriormente, los pases de rastra contribuyeron a afinar el suelo, eliminar malezas

iniciales y nivelar la superficie, lo cual favorece una distribución uniforme de las semillas y una emergencia más homogénea del cultivo (INTA, 2020; FAO, 2014).

- Siembra

Para el sorgo cv sureño la distribución se realizó a una distancia entre hileras de 0,70 m y entre plantas de 0,07 a 0,10 m, lo que equivale a un promedio de 12 plantas por metro lineal, sembradas a una profundidad de 0,02 a 0,03 m, con la finalidad de optimizar la producción de biomasa sin comprometer la sanidad de la planta, se sembró con una sembradora mecánica adaptada a un tractor (INTA, 2020).

- Mantenimiento

La fertilización en el cultivo de sorgo se define por los niveles de extracción de nutrientes que aporta el suelo, además es importante el pH que posee el suelo en el caso de la finca La Josefina donde no se tuvo que realizar esa corrección. Según Demanet y Canales (2020) se recomienda realizar fertilizaciones de 220-240 kg/ha de nitrógeno, distribuido en 2 aplicaciones 35 % presembrado, 30 % en el momento de la siembra y 35 % cuando la planta posee 3 o 4 hojas expandidas.

El INTA (2020) recomienda realizar 3 fertilizaciones en el cultivo de sorgo sureño, la primera de los 10 a los 15 días dds con 10-30-10, la segunda fertilización a los 20 a 25 dds con urea y 10-30-10 en relación 2:1 y la tercer fertilización previo a los 45 días con urea.

Para el manejo integrado de arvenses y plagas en los cultivos, se realizó una revisión de literatura enfocada en identificar productos registrados por el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) de Costa Rica, complementada con recomendaciones de productores locales, el equipo técnico del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y académicos especializados. Esta estrategia buscó

conciliar el uso de productos eficaces con criterios de sostenibilidad, seguridad ambiental y pertinencia local (Demagnet y Canales 2020).

Se recomienda realizar un manejo de arvenses con preemergentes como la atrazina y metolaclor y post emergencia atrazina+dicamba (Demagnet y Canales 2020), en el caso del INTA (2020) se recomienda pendimetalina como preemergente y postemergente, en conjunto con un manejo manual.

El manejo de plagas se abordó bajo un enfoque de manejo integrado, priorizando el uso de productos biológicos y prácticas preventivas. En el cultivo de sorgo sureño, se identificaron focos de áfidos (*Aphis gossypii*) y gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), se realizó una aplicación de un insecticida de contacto a base de *deltametrina*, según las recomendaciones técnicas (INTA, 2020). Es importante mencionar que la ausencia de aplicación de fungicidas como controladores se debió a aplicaciones preventivas con fungicida de ingrediente activo como Azoxystrobin. por lo que repercutió en baja incidencia de estos organismos en la plantación, dentro del umbral económico no presentaron significancia.

- Cosecha

La cosecha se realizó cuando los cultivos alcanzaron su punto óptimo de aprovechamiento forrajero. En el caso del sorgo (variedad Sureño), se cosechó a los 80 dds. Este momento fenológico coincide con la fase de grano lechoso, considerada ideal para la cosecha de forraje ya que permite un mayor aprovechamiento nutricional de la biomasa (Martínez et al., 2017), especialmente en sistemas de alimentación animal.

Se realizó un análisis del rendimiento por hectárea en las parcelas de Sorgo establecidas en la Finca La Josefina, la metodología empleada para realizar el rendimiento de biomasa fue un muestreo aleatorio simple dando como resultado un rendimiento de 4,1 kg por metro lineal de sorgo sureño.

**Tabla 8.** *Protocolos de manejo agronómico de sorgo.*

		Sorgo
<b>Preparación del terreno</b>		
	Rastra	1
<b>Siembra</b>		
	Semilla kg/ha	15
	Densidad de siembra	0,70 m entre hileras 0,07-0,10 entre plantas
<b>Mantenimiento</b>		
	1er fertilización	18-46-0
	2da fertilización	urea
	3ra fertilización	urea + foliar
	Herbicidas pre-emergentes	pendimetalina (2-3L/ha) + atrazina (1.5–3 kg/ha)
	Herbicidas post-emergentes	Paraquat (1,5-3L/ha) o 2-4D (1L/ha)
	Insecticida	deltametrina (75–100 ml/ha)
<b>Cosecha</b>		
	Cosecha del material	80 días

Es importante señalar que, si bien en la primera cosecha de sorgo sureño pueden existir reservas suficientes de nutrientes en el suelo, con el avance de las cosechas sucesivas (segunda y tercera), será necesario suplementar dichos nutrientes mediante la aplicación de fertilizantes. Esto se debe al agotamiento progresivo de los nutrientes del suelo debido a la extracción continua que realiza el cultivo en cada ciclo productivo, lo que provoca una disminución de la fertilidad a lo largo del tiempo, especialmente en suelos sin reposición adecuada (Díaz, 2015; García et al., 2017). Por lo tanto, es fundamental implementar un

plan de fertilización adaptado a las necesidades específicas del cultivo y a las condiciones edáficas del suelo, con el fin de garantizar la sostenibilidad y el rendimiento productivo en las cosechas sucesivas (Rodríguez & Gómez, 2018).

### **5.3. Elaboración de ensilajes**

Se llevó a cabo la elaboración de ensilaje utilizando material vegetal de sorgo cv. Sureño, cosechado a los 80 días después de la siembra, cuando el grano en la panoja se encontraba en estado lechoso (etapa llenado de grano), considerado óptimo para la producción de forraje conservado de alta calidad. Al cosechar en esta etapa fenológica se asegura un balance adecuado entre el contenido de humedad, digestibilidad y valor nutricional del forraje. Al grano estar en estado lechoso, se permite una mayor concentración de azúcares solubles y a su vez se favorece la fermentación láctica, la reducción de riesgo y la mejora de la palatabilidad del ensilaje (Bernal & Espinosa, 2017).

A partir del rendimiento promedio de biomasa estimado en 4.1 kg por metro lineal de sorgo, se realizaron los cálculos correspondientes para definir la cantidad total de forraje a ensilar.

Se elaboraron cuatro anillos cada uno compuesto por 14 capas de 200 kg, totalizando 2.800 kg de material fresco por anillo (Anexo 14). Para mejorar la calidad nutricional y la fermentación del ensilaje, el material fue enriquecido con urea al 2 % debido a su aporte de nitrógeno no proteico, lo cual incrementa el contenido de proteína cruda del ensilaje y melaza al 4 % que actúa como fuente de carbohidratos fermentables, estimulando el desarrollo de bacterias ácido lácticas beneficiosas para garantizar una buena calidad de ensilaje (Pereira et al., 2020) En conjunto, se almacenaron 11,2 toneladas de forraje.

La apertura de los silos se realizó de manera secuencial, iniciando a los 120 días posteriores al almacenamiento del forraje de sorgo, con un intervalo de apertura de aproximadamente 22 días entre anillos (Anexo 15). Se le realizó un análisis bromatológico,

encontrando un contenido promedio de proteína cruda del 15%, energía neta de lactancia (ENL) de 1,2 Mcal/kg MS, entre otros parámetros detallados en la Tabla 11.

**Tabla 9.**  
*Protocolos de elaboración de ensilaje de sorgo*

	<b>Características</b>	<b>Materiales</b>	<b>Total</b>
<b>Análisis de biomasa</b>	Lote 1: 3,9 metro/lineal Lote 2: 4,1 metro/lineal	Machete, balanza y piola	14 muestras/ha
<b>Cosecha del materia</b>	10 cm sobre el suelo 60-70% de humedad	Cosechadora Chopper y tractor agrícola	
Picado del material	Aprox 1 pulgada	Chopper y tractor agrícola	
Acarreo del material	2 ton por carretilla	Carreta y tractor	5,5 viajes
<b>Elaboración del ensilaje</b>	Dimensiones 2 m x 0,9 m	Molde de anillo	4 anillos
Densidad del material	700 kg/m <sup>3</sup>	Pisoteo	5-7 personas
Capas	Sorgo picado	200 kg	14 capas
Aditivos	Urea 2 %	4 kg	56 kg
	Melaza 4 %	8 kg	112 kg
<b>Sellado y almacenamiento</b>	Plástico	Rollo de 400 gg (4 x 6 m)	1 rollo
	Piola		1 rollo
	Arena	2 metros	8 - 10 m

## 5.4. Composición bromatológica de los materiales

### 5.4.1 Composición bromatológica del Sorgo cv sureño

La caracterización bromatológica de la planta completa de sorgo cv. Sureño, previa al proceso de ensilaje, se presenta en la Tabla 10. Los resultados indican un contenido de materia seca (MS) entre 24,09 y 25,81 valores que reflejan un estado fisiológico temprano al momento de la cosecha, acorde con un corte en fase de grano lechoso, condición deseable para maximizar digestibilidad y contenido energético del forraje (Sánchez y Zeledón, 2019).

El contenido de proteína cruda (PC) osciló entre 7,89 y 9,26 lo que posiciona al cultivo dentro del rango típico para gramíneas tropicales de ciclo corto, aunque inferior al de materiales proteicos o leguminosas forrajeras.

La concentración de cenizas (CE) se mantuvo entre 4,92 y 6,60, lo cual sugiere un aporte adecuado de minerales totales, aunque se recomienda realizar análisis de macro y micronutrientes específicos para una mejor interpretación del perfil mineral. Finalmente, el extracto etéreo (EE), indicador del contenido lipídico del forraje, fue de 3,05 y 3,03 (Rodríguez-Molano y Pulido-Suárez, 2018; Sosa-Montes, et al., 2022).

**Tabla 10.**

*Composición bromatológica de la planta completa de sorgo sureño cultivado en Jicaral y reportes de literatura.*

Variedad	MS 60 %	FND %	FAD %	LIG %	PC %	EE %	CE %	Fuente
Sureño	25,81	52,88- ± 0,01	28,45 ± 0,08	14,19 ± 1,17	7,89 ± 0,93	3,05 ± 0,20	4,92 ± 0,03	
Sureño	24,09	62,37 ± 0,29	37,02 ± 0,35	24,50 ± 3,39	9,26 ± 0,35	3,03 ± 0,43	6,60± 0,02	Lab. ECA
CENTA- CE	30,10	53,45	28,20	-	7,00	-	6,92	
CENTA- 2 BMR	29	50,25	29,88	-	6,01	-	-	

CENTA S-3bmr	28	55	29	-	8	-	-	Díaz, et al., (2002).
CENTA S-4bmr	28	56	30	-	7	-	-	
CENTA S-3 (normal)	26	57	36	-	6	-	-	
Sorgo forrajero ( <i>Sorghum vulgare</i> )	21,67	70,23	47,51	6,73	8,34	2,37	9,33	Martínez, (2018).
Sorgo negro ( <i>Sorghum alnum</i> )	14,23	66,18	40,11		10,08	2,24	8,78	

Nota: MS (Materia Seca) PC (Proteína Cruda), FND (Fibra en Detergente Neutro), FAD (Fibra en Detergente Acido), LIG (Lignina), EE (extracto etereo), CE (Cenizas)

#### **Materia seca (MS):**

El contenido de materia seca de las diferentes variedades de sorgo reportado en la literatura varió entre 14,23 %, en el caso del sorgo negro y 30,10 % en la variedad CENTA-CE, esta última con el valor más alto registrado, lo que indica una mayor aptitud para el ensilaje. El material de la variedad de sorgo sureño, utilizado en este estudio, presentó valores intermedios respecto a las demás variedades reflejando un mayor porcentaje de humedad y, por ende, un riesgo incrementado de pérdidas por lixiviación.

Estas diferencias podrían estar asociadas a las altas precipitaciones registradas durante la cosecha, dado por efectos de fenómenos climáticos durante dicho periodo. Por ello, se requirió de un período de secado previo al ensilaje (premarchitado) que permita incrementar el contenido de materia seca del material (Angulo et al., 2022; Hao et al., 2021).

#### **Proteína cruda (PC):**

El sorgo sureño presenta niveles óptimos de proteína cruda de 7,89 y 9,26 % los cuales se encuentran dentro de los requerimientos nutricionales de mantenimiento de bovinos adultos (7–9 %) y de hembras lecheras (14–18 %) (NRC, 2001), así como las variedades mejoradas CENTA S-3bmr (8 %), CENTA S-4bmr (7 %) y el sorgo negro (*Sorghum almum* 10,08 %), así como el sorgo forrajero común (*Sorghum vulgare* 8,34 %). En contraste con la variedad de CENTA-CE presentando niveles más bajos de PC entre 6 y 7%, los cuales no cubren los requerimientos de mantenimiento en bovinos.

Se recomienda complementar las dietas con fuentes externas de proteína o asociarlos con leguminosas forrajeras, particularmente en sistemas de doble propósito y producción lechera, a fin de optimizar el balance nutricional y la eficiencia productiva (Estrada et al., 2019; Solís, Meneses & Villacrés, 2022).

### **Contenidos de FDA y FDN**

En la alimentación bovina, se considera que valores de FDN entre 45–55% son adecuados para asegurar un buen consumo voluntario de materia seca, dado que esta fracción está más relacionada con el volumen que ocupa la ración en el rumen y, por tanto, con la capacidad de ingestión del animal (Mertens, 1994). La variedad Sureño presentó valores entre 52,88 dentro del rango óptimo y 62,37 un valor más elevado (60–70%), lo que corresponde a un forraje de calidad media. Aunque estos valores de FDN no imposibilitan el consumo, sí pueden limitar la ingestión de materia seca en comparación con materiales de menor fibra.

No obstante, la digestibilidad del forraje se encuentra más estrechamente asociada al contenido de FDA, dado que esta fracción incluye la celulosa y la lignina, componentes estructurales menos degradables. Valores altos de FDA reducen la disponibilidad de nutrientes y, por ende, la eficiencia de aprovechamiento del forraje (Allen, 2000; NRC, 2001). Como referencia, el sorgo forrajero convencional puede alcanzar hasta un 70,23%

de FDN (Martínez, 2018), lo que refleja un forraje con menor calidad nutricional y mayor limitación digestiva respecto a materiales de menor fibra.

Los porcentajes de FAD ideales son del 20-30% cuando son forrajes de alta calidad y digestibilidad, en el caso de forrajes más fibrosos y maduros presenta porcentajes superiores al 35%; El sorgo sureño presenta un valor dentro del rango ideal de 28,45 % y un valor más elevado mostrando un material más fibroso con valores de 37,02% por lo que el consumo del bovino será menor debido al contenido más alto de celulosa y lignina (NCR, 2001; Weiss, 1994).

#### **5.4.2. Composición bromatológica del ensilaje de sorgo sureño**

La calidad nutricional del ensilaje de sorgo cv. Sureño fue evaluada mediante análisis bromatológicos realizados sobre muestras colectadas de los cuatro anillos de silo establecidos. Los resultados, resumidos en la Tabla 11, evidencian un contenido de materia seca (MS) que varió entre 29,30 y 28,91%, valores por debajo del rango óptimo (30-40 %) para asegurar un proceso de fermentación eficiente y minimizar las pérdidas por efluentes o deterioro aeróbico (Rodríguez-Carías, 2019).

El contenido de proteína cruda (PC) fue relativamente homogéneo entre los silos, con valores entre 15,13 % y 15,30 %, lo que evidencia una adecuada conservación del nitrógeno total durante el proceso fermentativo. Sin embargo, es importante resaltar que estos niveles estuvieron influenciados por la adición de urea como fuente de nitrógeno no proteico. Así, al incorporar un 2 % de urea en el silo, el incremento en PC es cercano a 5,72 puntos porcentuales, lo que indica que, en ausencia de este aditivo, el ensilaje tendría valores de proteína cruda estimados entre 7–10 %.

De este modo, aunque el contenido final de PC registrado es adecuado para la categoría animal en estudio, debe considerarse que una fracción importante proviene de nitrógeno no proteico. Por tanto, se hace necesario complementar con fuentes proteicas

verdaderas que aseguren un suministro balanceado de aminoácidos esenciales para cubrir los requerimientos de vacas en producción.

En cuanto a la energía neta de lactancia (ENL), los valores se mantuvieron entre 1,23 y 1,26 Mcal/kg, lo que confirma la conservación de la fracción energética del forraje tras el proceso de ensilado. Esta energía es suficiente para dietas de mantenimiento y producción intermedia, particularmente en sistemas de doble propósito.

La concentración de cenizas (CE) se ubicó entre 6,69 % y 7,22 %, sin variaciones significativas respecto a la planta entera, lo que sugiere estabilidad en la fracción mineral del forraje ensilado. El extracto etéreo (EE) mostró valores bajos, entre 0,85 % y 0,95 % como es común en reportes de ensilaje elaborado con gramíneas tropicales

Estos resultados indican que el ensilaje de sorgo sureño conservó adecuadamente sus características nutricionales, ofreciendo un alimento voluminoso de buena calidad fermentativa, lo que refuerza la necesidad de un diseño estratégico de suplementación en dietas para rumiantes.

**Tabla 11.**

*Análisis bromatológicos del silo de sorgo sureño cultivado en Jicaral.*

Nombre	MS 60%	FND%	FAD%	LIG%	EE%	PC%	CE%	ENL Mcal/kg
Sureño	29,30	49,94 ±1,40	30,08 ±0,08	4,05 ±0,08	3,61 ±0,02	17,13 ±0,19	8,17 ±0,06	1,23
Sureño	28,91	49,37 ±1,01	30,15 ±0,92	3,20 ±0,03	4,58 ±0,18	17,30 ±0,07	8,57 ±0,01	1,26

MS (Materia Seca) PC (Proteína Cruda), FND (Fibra en Detergente Neutro), FAD (Fibra en Detergente Acido), LIG (Lignina), EE (extracto etereo), CE (Cenizas) ENL (Energía Neta de Lactancia). Fuente: Laboratorio de Nutrición Animal de la Escuela de Ciencias Agrarias

En la Tabla 11 se observan análisis bromatológicos de silo de sorgo, en donde se muestra el sorgo sureño utilizado en el estudio, además se utilizan los reportes de Gómez (2024) con 3 variedades de sorgo liberadas por el INTA (Centa RCY, Eskameca y Centa

Soberano), elaborados en la Estación Experimental Los Diamantes, Pococí, Limón y en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez, Cañas, Guanacaste.

#### **5.4.1. Materia seca**

El sorgo Sureño presentó valores de MS entre 28.91 % y 29.30 %, ligeramente por debajo del rango óptimo; esto se puede deber a el alto contenido de humedad en el material al momento de la cosecha como se muestra en la Tabla 11, por lo que es necesario un breve periodo de secado previo al ensilaje para alcanzar el contenido deseado, y así reducir riesgos de pérdidas por efluentes y fermentaciones butíricas no deseadas (Muck, 2010).

Gómez (2024) realizó silos con sorgo forrajero con variedades del INTA, cabe destacar que estos no estaban enriquecidos con urea o melaza. Las variedades Eskameca y Centa Soberano mostraron valores considerablemente más altos en su contenido de materia seca en el ensilado de grano de 51.84 % a 72.32 % respectivamente, sin embargo en el silo de forraje dichos valores fueron inferiores de 22,89 % y 18,31 %. Es importante resaltar que valores de MS por encima del 45 % dificulta el proceso de compactación y limita la fermentación anaeróbica por lo que al ensilar la planta completa (forraje y grano) mejora la calidad y contenido de humedad en el ensilaje (McDonald et al., 1991; Wilkinson & Davies, 2013).

#### **5.4.2. Proteína cruda (PC)**

La proteína cruda (PC) aporta los compuestos nitrogenados necesarios para la síntesis de proteína microbiana en el rumen y para satisfacer los requerimientos nutricionales del animal, permitiendo así alcanzar su productividad óptima. De acuerdo con el NRC (2001) los forrajes destinados a vacas lecheras deben contener al menos un 15-16 % de PC en base seca, a fin de sostener una producción eficiente sin recurrir a suplementación proteica adicional. En este contexto, el sorgo Sureño, con un contenido de PC del 15 %, constituye una excelente alternativa alimenticia, ya que cubre los requerimientos tanto de mantenimiento como de producción de leche. El aumento en el

aporte nitrógeno no proteico se debe al enriquecimiento con urea, mejorando la digestibilidad y rendimiento animal (Torres, 2020; Sánchez, 2021).

Las variedades Eskameca y Centa Soberano alcanzaron contenidos de proteína cruda (PC) de 7,17 % y 9,09 % en grano, mientras que en el forraje se registraron 5,87 % y 6,12 %, respectivamente (Gómez, 2024). Estos niveles permiten cubrir los requerimientos de mantenimiento en bovinos y son adecuados para la formulación de dietas dirigidas a vacas de baja a moderada producción. Cuando se complementan con insumos de mayor contenido proteico, favorecen un mejor balance de nutrientes y reducen la necesidad de suplementación adicional (Ayala & Guerrero, 2018).

#### **5.4.3. Contenidos de FDA y FDN**

Los niveles deseados se encuentran por debajo del 50 %, debido a que valores superiores tienden a reducir el consumo voluntario debido al llenado ruminal (Van Soest, 1994; NRC, 2001). El sorgo sureño presentó valores de FDN entre los 49.94 % y 49.37 %, indicando un valor de consumo aceptable, sin embargo, se encuentra en el límite del valor máximo lo que indica un valor no óptimo en dietas de alta exigencia, como en vacas lecheras en pico de producción. Por otro lado, las variedades mejoradas como Eskameca, Centa Soberano y Centa RCY, presentaron valores a nivel de forraje de 57,08 %, 57,30 % y 56,69 % respectivamente por encima del límite deseado, reforzando la recomendación de mezclar el grano y forraje en el ensilaje para obtener mejores resultados, con una fibra menos densa, permitiendo una mayor ingestión voluntaria y potencialmente mejor rendimiento productivo (Jung & Allen, 1995; Mertens, 1997).

#### **5.4.4. Lignina**

El contenido de la lignina en los forrajes están directamente relacionados con la digestibilidad y consumo del material en la alimentación (Jung & Allen, 1995; Oba & Allen, 1999; Bernard & Tao, 2020.). Las variedades Centa (Soberano y RCY) y Eskameca a nivel de forraje son superiores de 3,93-5,67 % el caso del sorgo sureño presentó valores

entre 3-4 % de lignina, sin embargo, los rangos ideales que indican un forraje de alta calidad deben ser inferiores al 5 % de lignina, por lo que el ensilaje de sorgo presenta una buena digestibilidad y por consiguiente una mejor aceptación en el consumo.

#### **5.4.5. Contenido de cenizas y minerales**

El ganado bovino lechero presenta elevados requerimientos de calcio, debido a la alta concentración de este mineral en la leche, mientras que el fósforo, aunque se recicla parcialmente a través de la saliva hacia el rumen, también representa un nutriente crítico en la formulación de dietas balanceadas. Los rangos óptimos recomendados para estos minerales se sitúan entre 0,5 y 1 % para calcio y entre 0,2 y 0,4 % para fósforo.

El contenido de cenizas refleja la concentración total de minerales presentes, incluyendo calcio, fósforo, magnesio y potasio. En ensilajes de calidad, se espera un valor cercano al 9,1 %, mientras que niveles superiores al 12 % podrían indicar contaminación con sales (Van Saun, 2022; Anrique, 2014).

Según Gómez (2024), los ensilados elaborados a partir de las variedades Centa (Soberano y RCY) y Eskameca presentan contenidos de cenizas de 2–3 % en grano y de 9,56–10,28 % en forraje. Por su parte, el ensilado de sorgo sureño utilizado en el presente estudio mostró un 8 % de cenizas, lo que indica un adecuado aporte mineral para la dieta del ganado lechero.

Al presentar un contenido inferior al 12 % de Ce la aceptación del ensilado por palatabilidad incrementa, si se presentaran valores superiores podrían generar problemas digestivos por metales pesados (Vargas, 2005).

#### **5.4.6 Contenido de EE**

El extracto etéreo representa el contenido de grasas, aceites y cera del alimento, los lípidos representan una fuente concentrada de energía de 2 veces más energía que los carbohidratos simples, en forrajes y ensilados destinados a la alimentación de bovinos

lecheros los rangos ideales son de un 5-6 % del contenido de materia seca (NCR, 2001). El sorgo sureño presenta valores de 3,61 % y 4,58 %, valores ideales que no representan riesgo para la función ruminal, además no afectan la digestibilidad. Al presentar este rango la densidad energética incrementa mejorando la eficacia de conversión alimenticia, presenta un aporte de ácidos grasos esenciales para las funciones reproductivas y síntesis de membranas celulares y mejora la palatabilidad de las dietas (González, 2022; García, 2024; Vargas, 2005).

#### **5.4.7 Contenido de ENL**

El contenido de Energía Neta de Lactancia (ENL) presentó valores muy similares entre tratamientos, con un incremento numérico conforme aumentó el nivel de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo. El tratamiento T\_30 registró el valor más alto (1,57 Mcal/kg MS), seguido por T\_15 (1,56 Mcal/kg MS) y T\_0 (1,55 Mcal/kg MS). Las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ).

Aunque las variaciones fueron pequeñas, la tendencia sugiere que una mayor inclusión de ensilaje de sorgo podría contribuir a un ligero aumento en el aporte energético de la dieta. Este efecto puede estar relacionado con un mayor contenido de carbohidratos solubles y fibra de moderada digestibilidad en el ensilaje, lo que favorece la producción de ácidos grasos volátiles especialmente propionato en el rumen. El propionato es un precursor clave para la síntesis de lactosa, compuesto que regula osmóticamente el volumen de leche producida (NRC, 2001; Anrique, 2014; Van Suan, 2022).

La similitud de valores entre tratamientos indica que la sustitución parcial del suplemento comercial por ensilaje de sorgo no comprometió la densidad energética de las dietas. Este hallazgo coincide con lo reportado por González y Ruiz (2020), quienes destacan que en sistemas de doble propósito el sorgo forrajero bien manejado y conservado puede mantener un perfil energético comparable al de otros forrajes ensilados como maíz o caña forrajera, con valores de ENL en el rango de 1,54–1,58 Mcal/kg MS. Esto es relevante

desde el punto de vista productivo, ya que respalda la viabilidad de reducir el uso de concentrados sin afectar el suministro energético necesario para la lactancia.

## **5.5. Producción y composición bromatológica de la leche**

### **5.5.1 Producción de leche**

La producción de leche (kg/animal/día) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento control (T\_C) presentó la media más alta (8,98 kg/día), seguido por T\_30 (8,61 kg/día) y T\_15 (8,59 kg/día); sin embargo, las diferencias entre ellos no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) (Tabla 12). Los resultados obtenidos mostraron que el promedio de producción de leche por vaca/día fue inferior a los valores reportados para razas especializadas y sus cruzas en condiciones óptimas. De acuerdo con Saldarriaga (2011), la raza Gyr lechero puede alcanzar promedios de 10–12 L/día, mientras que la raza Gyrolando presenta valores de 12–14 L/día (Peralta-Torres et al., 2021). Estas cifras superan las registradas en el presente ensayo, evidenciando una brecha productiva respecto a los valores de referencia.

Estos resultados coinciden con lo señalado por estudios en sistemas de doble propósito en zonas tropicales, donde la interacción entre factores ambientales, genéticos y de manejo determina de manera significativa la respuesta productiva, y resaltan la necesidad de optimizar la alimentación y el manejo para aprovechar el potencial productivo de las razas utilizadas. El error estándar fue idéntico para los tres tratamientos (0,588), reflejando homogeneidad de varianza y un diseño balanceado. Estos resultados indican que la sustitución parcial del suplemento base por ensilaje de sorgo, en los niveles del 15 % y 30 %, no afectó negativamente la producción de leche en los animales bajo las condiciones evaluadas.

**Tabla 12.**

*Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre la producción de leche.*

	Trat	Media <sup>1</sup>	N	Error estándar	Intervalo confianza 95%	
					Inferior	Superior
<b>Producción de leche (kg)</b>	T_15	8,59 <sup>a</sup>	81	0,588	6,85	10,3
	T_30	8,61 <sup>a</sup>	81	0,588	6,86	10,3
	T_C	8,98 <sup>a</sup>	81	0,588	7,23	10,7

<sup>1</sup> kg/animal/día. Letras distintas indican diferencias significativas a  $p < 0.05$ .

El modelo cumple adecuadamente con los supuestos de normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas, independencia de los residuos y normalidad de los efectos aleatorios. Estos resultados validan la correcta interpretación de los efectos fijos y aleatorios bajo un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

## 5.5.2. Composición bromatológica de la leche

### 5.5.2.1. Grasa

La concentración de grasa (%) en la leche mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento D\_30 presentó la media ajustada más alta (3,5%), seguido de D\_15 (3,4%) y D\_C (2,9%). El análisis de varianza indicó que el efecto del tratamiento fue significativo ( $p < 0,001$ ), mientras que no se encontraron diferencias significativas asociadas al periodo ( $p = 0,122$ ) ni al número de partos ( $p = 0,124$ ). El error estándar fue igual para los tres tratamientos (0,237), reflejando homogeneidad de varianza y un diseño balanceado. Los intervalos de confianza al 95% de las medias ajustadas fueron los siguientes: D\_15 (2,61 – 4,18 %), D\_30 (2,71 – 4,29 %) y D\_C (2,11 – 3,68 %) (Tabla 13).

La inclusión de ensilaje de sorgo mejoró significativamente el contenido de grasa en la leche, debido al aporte de la fibra de este forraje, favoreciendo la síntesis de grasa láctea

por un incremento en la producción de ácidos grasos volátiles (Acosta-Acosta, et al., 2020). Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que destacan la importancia de las dietas ricas en fibra para optimizar la calidad composicional de la leche en sistemas tropicales (Mojica, et al. 2013)

**Tabla 13.**

*Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre grasa.*

	Trat	Media	N	Error estándar	Intervalo confianza 95%	
					Inferior	Superior
<b>Grasa (%)</b>	T_15	3,4 <sup>a</sup>	81	0,28	2,61	4,18
	T_30	3,5 <sup>a</sup>	81	0,28	2,71	4,29
	T_C	2,9 <sup>b</sup>	81	0,28	2,11	3,68

Letras diferentes en la misma columna muestran diferencia significativa  $p < 0,05$

Las comparaciones múltiples con ajuste de Tukey revelaron que no existieron diferencias significativas entre D\_15 y D\_30 ( $p = 0,8046$ ), pero sí se detectaron diferencias altamente significativas entre D\_15 y D\_C ( $p = 0,0099$ ) y entre D\_30 y D\_C ( $p = 0,0015$ ). Estos resultados indican que los tratamientos con sustitución parcial del suplemento base por ensilaje de sorgo en un 15 % o un 30 % lograron mantener una mayor concentración de grasa en comparación con la dieta base control, bajo las condiciones experimentales evaluadas (Tabla 14). Estos resultados sugieren que la inclusión parcial de ensilaje de sorgo en la dieta contribuyó a mejorar el perfil de grasa en la producción lechera bajo las condiciones del estudio.

**Tabla 14.**

*Comparaciones múltiples entre tratamientos para la grasa.*

Diferencia	Error	Valor t	Valor p	Significancia
------------	-------	---------	---------	---------------

	<b>estimada (%)</b>	<b>estándar (SE)</b>			
D_15 - D_30	-0.104	0,166	-0,629	0,8046	No significativo
D_15 - D_C	+0.500	0,165	3,014	0,0099	Significativo <sup>1</sup>
D_30 - D_C	+0.605	0,166	3,643	0,0015	Significativo <sup>1</sup>

<sup>1</sup> $p < 0.01$ .

El modelo cumple adecuadamente con los supuestos de normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas, independencia de los residuos y normalidad de los efectos aleatorios, validando la correcta interpretación de los efectos fijos y aleatorios bajo un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

#### **5.5.2.2. Lactosa**

La concentración de lactosa (%) en la leche mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento D\_C presentó la media ajustada más alta (4,60 %), seguido por D\_15 (4,48 %) y D\_30 (4,40 %). El análisis de varianza indicó que el efecto del tratamiento fue altamente significativo ( $p < 0,001$ ), mientras que el efecto del periodo también resultó significativo ( $p = 0.048$ ). No se observaron efectos significativos del número de partos sobre la concentración de lactosa ( $p = 0,594$ ) (Tabla 15). Según Agudelo y Bedoya (2005), el contenido de lactosa ronda el 4,7% de la leche bovina, en razas como la jersey presenta un contenido de 4,5%, en la raza Holstein suplementada con ensilaje de soya se obtuvieron valores de 4,7% (Arias-Gamboa, et al., 2018; Tobía, et al., 2004); por lo que el contenido de lactosa obtenido en el ensayo se encuentra dentro de los valores estándar reportados para diversas razas de ganado bovino.

Según estudios en condiciones tropicales, la lactosa es sintetizada en la glándula mamaria a partir de glucosa sanguínea, cuya disponibilidad depende directamente de la fermentación ruminal; En el ensayo el contenido de lactosa fue menor en las dietas con

suplementación de ensilaje D\_15 (4,48 %) y D\_30 (4,40 %), esto se puede deber a un bajo contenido de carbohidratos fermentables, que limita la producción de ácido propiónico (precursor hepático de glucosa), el alimento balanceado es más rico en contenido de almidón y azúcares solubles, los cuales fermentan con mayor velocidad en el rumen, generando ácido propiónico explicando porque el contenido de lactosa es mayor en la dieta control (Troncoso, 2014).

El error estándar fue idéntico para los tres tratamientos (0,0773), reflejando homogeneidad de varianza y un diseño experimental balanceado. Los intervalos de confianza al 95 % para la concentración de lactosa fueron los siguientes: D\_15 (4,26-4,70 %), D\_30 (4,18-4,63 %) y D\_C (4,38-4,82 %) (Tabla 15).

**Tabla 15.**

*Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre lactosa.*

	Trat	Media	N	Error estándar	Intervalo confianza 95%	
					Inferior	Superior
<b>Lactosa (%)</b>	T_15	4,48 <sup>a</sup>	81	0,0773	4,26	4,70
	T_30	4,40 <sup>a</sup>	81	0,0773	4,18	4,63
	T_C	4,60 <sup>b</sup>	81	0,0773	4,38	4,82

Letras distintas indican diferencias significativas a  $p < 0.05$ .

Las comparaciones múltiples entre tratamientos para la concentración de lactosa (%) en la leche, utilizando el ajuste de Tukey, revelaron diferencias significativas entre algunos tratamientos. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos D\_15 y D\_30 ( $p = 0,1674$ ), indicando que la sustitución del 15 % y 30 % del suplemento base no generó diferencias en la concentración de lactosa. Sin embargo, se observaron diferencias significativas entre D\_15 y D\_C ( $p = 0,0126$ ) y diferencias altamente significativas entre D\_30 y D\_C ( $p < 0.0001$ ). Estos resultados indican que la dieta control (D\_C) permitió mantener una concentración de lactosa significativamente

superior respecto a los tratamientos que incluyeron ensilaje de sorgo en su formulación. De esta manera, el tratamiento D\_C presentó un comportamiento favorable en términos de concentración de lactosa bajo las condiciones evaluadas (Tabla 16).

**Tabla 16.**

*Comparaciones múltiples entre tratamientos para la lactosa.*

	<b>Diferencia estimada (%)</b>	<b>Error estándar (SE)</b>	<b>Valor t</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
D_15 - D_30	0,0759	0,0415	1,830	0,1674	No significativa
D_15 - D_C	-0,1215	0,0415	-2,928	0,0126	Significativa <sup>1</sup>
D_30 - D_C	-0,1974	0,0415	-4,757	<0,0001	Altamente significativo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> $p < 0.01$ . <sup>2</sup> $p < 0.001$

El modelo cumple adecuadamente con los supuestos de normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas, independencia de los residuos y normalidad de los efectos aleatorios. Estos resultados validan la correcta interpretación de los efectos fijos y aleatorios bajo un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

### 5.5.2.3. Proteína

La concentración de proteína (%) en la leche mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento D\_C presentó la media ajustada más alta (3,06%), seguido por D\_15 (2,97 %) y D\_30 (2,92 %). El análisis de varianza indicó que el efecto de tratamiento fue altamente significativo ( $p < 0,001$ ), mientras que el efecto del periodo mostró una tendencia hacia la significancia ( $p = 0,078$ ). No se observaron efectos significativos del número de partos sobre la concentración de proteína ( $p = 0,500$ ) (Tabla 17).

El error estándar fue idéntico para los tres tratamientos (0,0559), reflejando homogeneidad de varianza y un diseño experimental balanceado. Los intervalos de

confianza al 95 % para las medias ajustadas fueron: D\_15 (2.88 – 3.02 %), D\_30 (2.83 – 2.98 %) y D\_C (2.97–3.11 %) (Tabla 17).

**Tabla 17.**

*Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre la proteína.*

	Trat	Media	N	Error estándar	Intervalo confianza 95%	
					Inferior	Superior
<b>Proteína (%)</b>	T_15	2,97 <sup>a</sup>	81	0,0559	2,81	3,13
	T_30	2,92 <sup>a</sup>	81	0,0559	2,76	3,08
	T_C	3,06 <sup>b</sup>	81	0,0559	2,90	3,22

Letras distintas indican diferencias significativas a  $p < 0.05$ .

Las comparaciones múltiples mediante ajuste de Tukey revelaron que no hubo diferencias significativas entre D\_15 y D\_30 ( $p = 0,2486$ ); sin embargo, se detectó una diferencia estadísticamente significativa entre D\_C y D\_15 ( $p = 0,0107$ ), indicando que la dieta control permitió una mayor concentración de proteína en comparación con las dietas que incluyeron ensilaje de sorgo (Tabla 18).

**Tabla 18.**

*Comparaciones múltiples entre tratamientos para la proteína.*

	Diferencia estimada (%)	Error estándar (SE)	Valor t	Valor P	Significancia
D_15 - D_30	0,0489	0,0304	1,609	0,2486	No significativo
D_15 - D_C	-0,907	0,0304	-2,986	0,0107	Significativa <sup>1</sup>
D_30 - D_C	-0,1396	0,0304	-4,595	0,0001	Altamente significativa <sup>2</sup>

<sup>1</sup> $p < 0.01$ . <sup>2</sup> $p < 0.001$

El modelo cumple adecuadamente con los supuestos de normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas, independencia de los residuos y normalidad de los efectos aleatorios. Estos resultados validan la correcta interpretación de los efectos fijos y aleatorios bajo un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

Los resultados indican que D\_C, compuesta principalmente por alimento balanceado, presentó una concentración de proteína mayor (3,06 %) en comparación con las dietas suplementadas con silo de sorgo (D\_15: 2,97 %; D\_30: 2,92 %), esto se puede deber a la síntesis de proteína en la glándula mamaria. El alimento balanceado presenta una mayor disponibilidad de energía metabolizable y aminoácidos esenciales, los cuales fomentan la producción de caseína y otras proteínas lácteas, por otro lado, el ensilaje de sorgo puede presentar limitaciones en la proteína digestible y en la producción de glucosa hepática que proviene de la fermentación ruminal, lo que podría afectar de forma indirecta la síntesis de proteínas (Almeida, et al., 2017)

#### 5.5.2.4. Sólidos totales

La concentración de sólidos totales (%) en la leche no mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento D\_C presentó la media ajustada más baja (11,2 %), seguido por D\_15 y D\_30 (11,5 %) (Tabla 19).

El error estándar fue idéntico para los tres tratamientos (0,306), reflejando homogeneidad de varianza y precisión en las estimaciones. Los intervalos de confianza al 95 % para las medias ajustadas fueron: D\_15 y D\_30 (10,6-12,4 %) y D\_C (10,3-12,2 %).

#### Tabla 19.

*Efecto de los diferentes niveles de sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo sobre los sólidos totales.*

Trat	Media	N	Error Estándar	Intervalo confianza 95%	
				Inferior	Superior
T_15	11,5 <sup>a</sup>	9	0,306	10,6	12,4

<b>Sólidos totales (%)</b>	T_30	11,5 <sup>a</sup>	9	0,306	10,6	12,4
	T_C	11,2 <sup>a</sup>	9	0,306	10,3	12,2

Letras distintas indican diferencias significativas a  $p < 0.05$ .

El modelo cumple adecuadamente con los supuestos de normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas, independencia de los residuos y normalidad de los efectos aleatorios, validando la correcta interpretación de los efectos bajo un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$

Los resultados no muestran diferencias significativas en los sólidos totales entre la dieta control y las dietas con sustitución por ensilaje de sorgo, por lo que la variación de estos valores se puede asociar a un menor aporte de energía y proteína digestible del ensilaje en comparación con el alimento balanceado, que influyen en la producción de grasa y proteínas los cuales son los principales contribuyentes al contenido de sólidos totales (Almeida, et al., 2017).

#### **5.5.2.5. Relación entre la producción de leche y la calidad bromatológica**

Se analizó la relación entre la producción de leche promedio por vaca/día y las variables de calidad bromatológica de la leche (grasa, proteína, lactosa y sólidos totales). Los resultados mostraron que, la producción de leche promedio fue ligeramente mayor en el tratamiento control (D\_C), seguido por D\_30 y luego D\_15 (Figura 1). Aunque visualmente hay una pequeña diferencia, los intervalos de error estándar se solapan entre tratamientos, lo que sugiere que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ), es decir, la sustitución parcial en las dietas con ensilaje de sorgo no afectó negativamente la producción, lo que evidencia que el ensilaje de sorgo puede integrarse hasta un 30 % sin comprometer el rendimiento lechero.

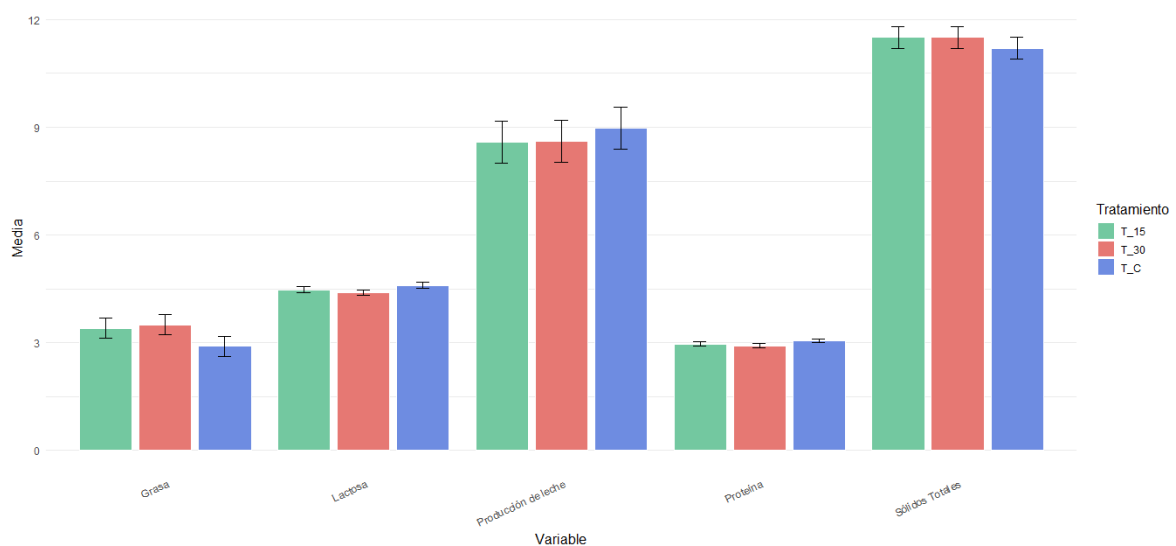
Las variables de calidad bromatológica, en el caso de la grasa en la leche tendió a ser ligeramente superior en D\_30 y D\_15, y menor en D\_C, las diferencias, sin embargo,

son pequeñas y no son estadísticamente significativas según el tamaño de las barras de error, lo que sugiere que las dietas modificadas podrían tener un efecto positivo en el contenido graso de la leche. Respecto a la proteína (%), se observó una disminución progresiva asociada al incremento del nivel de sustitución, siendo el tratamiento D\_30 el que presentó el menor contenido proteico, sin embargo no presentaba una diferencia significativa lo que indica que la calidad proteica de la leche se mantuvo estable con la incorporación del ensilaje.

Para la lactosa (%), el contenido fue mayor en el tratamiento control (D\_C) en comparación con D\_15 y D\_30, sin embargo los valores en los distintos tratamientos fue similar lo que sugiere que el metabolismo energético de las vacas y la síntesis de lactosa no se vieron afectados por la sustitución del suplemento base. Finalmente, los sólidos totales (%) fueron iguales en las dietas con sustitución de ensilaje y menores en la dieta control por lo que este comportamiento podría estar relacionado con fluctuaciones en el contenido de grasa y lactosa, pero no muestra un patrón claro de incremento o disminución. (Figura 1).

### Figura 1.

*Efecto de los niveles de sustitución del suplemento base sobre la producción y la calidad de la leche.*



En resumen, el gráfico evidencia que la sustitución del suplemento base por ensilaje de sorgo, hasta niveles del 30 %, no afectó significativamente la producción ni los parámetros de calidad de la leche (grasa, lactosa, proteína y sólidos totales), por lo que el ensilaje de sorgo es una alternativa viable y sostenible para la alimentación de vacas lecheras, especialmente en condiciones de escasez de forraje o durante la época seca (Figura 1).

## **5.6. Valoración económica del componente de alimentación**

### **5.6.1 Costos de establecimiento hasta cosecha de sorgo**

Con el objetivo de valorar económicamente la producción de forrajes utilizados en la suplementación animal, se calcularon los costos de establecimiento hasta la cosecha del sorgo (*S. bicolor* L. cv. Sureño). La estimación incluye los costos asociados a preparación del terreno, insumos, fertilización, control de malezas, manejo sanitario y cosecha, con base en registros de campo y precios locales vigentes al momento del estudio. El análisis incluyó los costos/ha del cultivo, los cuales constituyen la base para el análisis de eficiencia técnica y económica de la suplementación propuesta en esta investigación.

La Tabla 20 muestra el desglose de los gastos asociados al establecimiento hasta la cosecha de los cultivos de sorgo forrajero (3 cortes) en condiciones edafoclimáticas de Jicaral, durante el ciclo productivo 2025. Las erogaciones se organizaron en tres categorías principales: preparación del terreno, siembra y mantenimiento del cultivo (es decir, nutrición, fitosanidad, manejo de plagas), permitiendo un análisis comparativo integral entre los sistemas de producción evaluados.

En cuanto al establecimiento y manejo agronómico el costo total por hectárea, el cultivo de sorgo tuvo un costo de 978,46 USD/ha, estimando por fracciones el rubro total de costo va subdividido en costo de preparación del terreno (111,67 USD/ha), siembra (408,14 USD/ha), y mantenimiento (458,65 USD/ha).

El sorgo mostró el menor costo de mantenimiento, lo cual coincide con estudios de Velázquez et al. (2020) que destacan su rusticidad, bajo requerimiento hídrico y adaptabilidad a suelos de fertilidad media. En el caso de la siembra presentó un valor menor que los demás (408,14 USD/ha). Se observó que los costos asociados a la preparación del terreno se mantuvieron relativamente constantes entre cultivos, con valores que oscilaron entre 111,67 USD/ha para el sorgo. En términos generales, los resultados obtenidos confirman que el sorgo forrajero representa una alternativa competitiva en términos económicos para sistemas de producción de doble propósito, ofreciendo una relación costo-beneficio favorable dada su capacidad de rebrote y bajo requerimiento de insumos durante el mantenimiento.

**Tabla 20.**

*Detalle de los costos de establecimiento hasta cosecha de sorgo, Jicaral, Puntarenas, Costa Rica, 2025.*

	u./ha	USD/u.	USD/ha
<b>Preparación del terreno</b>			<b>111,67</b>
Quema química	3 lt	11,5	34,5
Rastra	1	68,9	68,9
Mano de obra	0.3	27,56	8,27
<b>Siembra</b>			<b>408,14</b>
Semilla	15 kg	4,92	73,8
Fungicida	100 ml	7,28	7,28
Sembradora	1	68,9	68,9
Sellos	3 lt	17,26	51,78
	2 kg	17,96	35,92
Fertilizante	3 qq	49,47	148,41
Mano de obra	0.8	27,56	22,048
<b>Mantenimiento</b>			<b>458,65</b>
	7 qq	33,5	234,5
Fertilizantes	3 lt	10,24	30,72
Post emergentes	2 lt	5,68	11,36
Insecticidas	100 ml	7,22	7,22

	125 ml	33,11	33,11
Mano de obra (Jornal <sup>2</sup> )	3	27.56	82,68
Fletes	2	29.53	59,06
			<b>978,46</b>

---

USD = 508 colones (26/04/2025). <sup>1</sup> Cálculo realizado a 3 cosecha. <sup>2</sup> Jornal = 14, 000 CR

### **5.6.2 Costo por kilogramo de sorgo en fresco y en materia seca**

La Tabla 21 presenta los resultados estimados del costo por kilogramo de forraje de sorgo en estado fresco y en base a materia seca (MS), calculados a partir de un rendimiento promedio de 57 toneladas de forraje fresco por hectárea y un contenido de materia seca promedio de 24,95%, según lo determinado en los análisis bromatológicos (Tabla 10). El costo total de producción por hectárea para el cultivo de sorgo, es de 978,46 USD/ha. Bajo estas condiciones, el costo por kilogramo de forraje fresco se estimó en 0,0172 USD/kg, mientras que el costo por kilogramo de materia seca ascendió a 0,0688 USD/kg.

Estos valores se encuentran por debajo de los rangos señalados en estudios similares realizados en regiones tropicales. Por ejemplo, Nava et al. (2017), al evaluar variedades de sorgo en diferentes ambientes de Durango, México, reportaron costos por kilogramo de materia seca en un rango de 0,08 a 0,11 USD, dependiendo del manejo y condiciones edafoclimáticas. De forma similar, Getachew et al. (2016) documentaron que el sorgo puede alcanzar costos de producción significativamente menores al maíz, manteniendo un adecuado perfil bromatológico y siendo competitivo en términos de eficiencia forrajera.

La competitividad del sorgo como fuente de forraje se explica, en parte, por su eficiencia en el uso de recursos hídricos y su adaptabilidad a condiciones edáficas limitantes, características ampliamente documentadas por Mulatu (2023) en contextos de estrés hídrico. Estas cualidades confieren al sorgo una ventaja estratégica para zonas como Jicaral, Puntarenas, donde el régimen climático y la fertilidad del suelo son factores limitantes para otros cultivos forrajeros tradicionales.

En este contexto, el valor estimado de 0,0688 USD/kg de materia seca (MS) constituye una alternativa económica frente al concentrado comercial, cuyo costo promedio en el mercado centroamericano puede oscilar entre 0,25 y 0,30 USD/kg MS, según la literatura especializada (Getachew et al., 2016) y profundizando en el mercado nacional según Solórzano et al., 2023 para concentrados de engorde y mantenimiento podría rondar los costos de 0,37 USD/kg. Asimismo, la utilización del sorgo como base en las dietas

suplementadas evaluadas en este estudio demostró que a un bajo costo del material, no se compromete la producción y mantiene en términos considerables la calidad de la leche, lo que refuerza su valor estratégico en sistemas bovinos de doble propósito.

**Tabla 21.**

*Costo por kilogramo de sorgo fresco y materia seca.*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Costo (USD)</b>
Costo total/ha	978,46 USD/ha	-	-
Rendimiento sorgo fresco	57,000 kg/ha	57 ton/ha = 57,000 kg/ha	-
Costo por kg sorgo fresco	0,0172 USD/kg	$\frac{978,46 \text{ USD/ha}}{57.000 \text{ kg/ha}}$	0,0172 USD/kg
Rendimiento de MS (24.95%)	14,221 kg MS/ha	57,000kg/ha×24,95%	-
Costo por kg de MS	0,0589 USD/kg	$\frac{978,46 \text{ USD/ha}}{14.221 \text{ kg MS/ha}}$	0,0688 USD/kg

### 5.6.3 Costo por kilogramo de ensilaje de sorgo en fresco y materia seca

La estimación del costo por kilogramo de ensilaje de sorgo, tanto en base fresca como en materia seca (MS), constituye un indicador clave para evaluar la viabilidad económica de esta tecnología de conservación forrajera en sistemas ganaderos de doble propósito. Se elaboraron 4 silos tipo anillo, se consideró una estructura tipo anillo de 2 metros de diámetro por 0,9 metros de altura, los cuales promediaron 2,968 kg de material fresco por unidad y para un total de 11,878 kg ensilados en cuatro anillos. Este volumen corresponde a una fracción proporcional del cultivo de sorgo establecido, cuyo costo total

por hectárea fue de 978,46 USD, y se agregó un costo adicional de 222,63 USD por concepto de elaboración del ensilaje (mano de obra, insumos, maquinaria). Asimismo, se consideró una merma estimada del 5% durante su almacenamiento, por lo que su peso final en MS fue de 2,819.6 kg para un costo por kg en fresco de 0,08 USD.

Este valor en los costos es consistente con lo reportado en lecherías de Costa Rica, donde Villalobos et al. (2015) documentaron costos de producción de ensilaje de sorgo que varían entre 9,10 CRC y 68,11 CRC por kilogramo de materia fresca (equivalentes a 0,018–0,135 USD/kg fresco), dependiendo del tipo de silo y del rendimiento del cultivo. De forma similar, Silva et al. (2020) reportaron en Brasil costos de producción de ensilaje de sorgo en sistemas intensivos que oscilaron entre 0,027 y 0,037 USD/kg fresco, variando según las condiciones agroecológicas y la infraestructura utilizada.

El contenido promedio de materia seca (MS) del ensilaje de sorgo fue de 29,1%, según se muestra en la Tabla 11, determinado a partir de dos análisis bromatológicos. Con base en este valor y considerando una merma estimada del 5% durante el almacenamiento, se calculó un costo promedio por kilogramo de materia seca de ensilaje de 0,258 USD/kg MS.

Este valor representa un incremento respecto al costo estimado del sorgo en pie, que fue de 0,0688 USD/kg MS, respectivamente. La diferencia se atribuye principalmente a los costos adicionales de insumos y mano de obra asociados al proceso de ensilado, tales como la cosecha, picado, aplicación de aditivos y almacenamiento.

Por otra parte, al valorar el costo de la materia seca del ensilaje (0,258 USD/kg MS), este resulta económicamente favorable en comparación con la alimentación basada en concentrados comerciales para bovinos, los cuales presentan un contenido de materia seca entre 87 % y 88 %. Por ejemplo, en almacenes agropecuarios de Costa Rica (abril 2025) se registraron precios promedio de 15,876 CRC por saco de maíz molido (46 kg) y 27,224 CRC por saco de harina de soya (46 kg), equivalentes a 0,397 USD/kg MS y 0,673 USD/kg

MS, respectivamente (CRC 508 = 1 USD). En conjunto, estos resultados evidencian que el ensilaje de sorgo constituye una alternativa de menor costo por unidad de materia seca respecto a las fuentes proteicas y energéticas concentradas comúnmente utilizadas en la alimentación bovina.

La eficiencia del proceso de ensilaje observado en esta investigación puede atribuirse a una adecuada compactación y sellado, así como al uso de aditivos (melaza y urea) que posiblemente optimizaron el proceso fermentativo del ensilaje. No obstante, la adición de costos por manejo poscosecha enfatiza la necesidad de valorar el ensilaje no solo como un método de conservación, sino como una inversión cuyo retorno depende del desempeño productivo del hato, especialmente en términos de producción de leche y sustitución de insumos más costosos.

Finalmente, la evaluación del costo por unidad de proteína, energía (ENL) o sólidos por kilogramo de ensilaje puede representar una herramienta adicional para estimar la rentabilidad nutricional del recurso, como sugieren Bernardes et al. (2018). Esta perspectiva permite una comparación más fina entre alternativas forrajeras bajo criterios de eficiencia técnica y económica, especialmente en contextos de baja disponibilidad de forraje en época seca.

**Tabla 22.**

*Costo estimado por kilogramo de ensilaje de sorgo en estado fresco y en base a materia seca, incluyendo costos de cultivo y elaboración. Jicaral, Puntarenas, Costa Rica, 2025.*

<b>Variable</b>	<b>Merma 5%</b>
Peso ensilaje en fresco (kg)	2.968,00
Peso útil en fresco (kg)	2.819,6
Costo del material ensilado (USD)	978,46
Costo de elaboración del ensilaje (USD)	222,63
Costo total por anillo (USD)	222,63

Costo por kg de ensilaje MF (USD)	0,08
Costo por kg de ensilaje MS (USD)	0,258

---

#### **5.6.4 Costo por dietas**

Con el propósito de complementar los resultados obtenidos bajo los tres tratamientos, se evaluaron también los costos asociados a cada dieta, con el fin de determinar la opción más eficiente en términos económicos y productivos.

Los costos diarios por kilogramo de alimento suministrado y los costos por kilogramo de leche producida en los tres tratamientos (dieta control, D\_15 de ensilaje de sorgo y D\_30 de ensilaje de sorgo), se muestran en detalle en el Anexo 21, Anexo 22 y Anexo 23, respectivamente.

Los resultados mostraron que la dieta control registró el mayor costo diario (6,43 USD/kg) y el mayor costo por kilogramo de leche/día (0,83 USD). En contraste, la D\_15 de ensilaje de sorgo presentó valores ligeramente inferiores (5,95 USD/kg diario y 0,81 USD/kg de leche), mientras que la dieta con 30 % de inclusión alcanzó los menores costos (5,89 USD/kg diario y 0,80 USD/kg de leche).

Estos resultados indican que la incorporación de ensilaje de sorgo contribuyó a reducir los costos de alimentación sin afectar de manera significativa la producción de leche. Por lo tanto, su uso parcial en la dieta representa una alternativa económicamente favorable frente a las formulaciones convencionales, al mantener niveles productivos similares con un menor gasto diario.

### 5.6.5 Costo por nutriente

El análisis de costos por unidad de nutrientes del ensilaje de sorgo se realizó con el propósito de determinar la eficiencia económica del material conservado bajo las condiciones del trópico costarricense. Este enfoque permite expresar el costo real del alimento en función de su aporte nutritivo, considerando los principales componentes: materia seca (MS), proteína cruda (PC), extracto etéreo (EE) y energía neta de lactancia (ENL). Los resultados obtenidos mostraron un costo promedio de 0,258 USD/kg de MS, con un contenido de 15,0 % de PC, 4,1 % de EE y una ENL de 1,2 Mcal/kg de MS, lo que permitió estimar un costo de 1,72 USD/kg de PC, 6,31 USD/kg de EE y 0,215 USD/Mcal de ENL.

Respecto a las condiciones reales de producción del material en la zona de estudio donde las limitaciones de humedad del suelo, la alta temperatura ambiental y la dependencia de sistemas mecanizados de pequeña escala inciden directamente sobre los costos unitarios y la eficiencia de conservación. En el contexto nacional, los resultados son coherentes con lo reportado por Cerdas et al. (2015), quienes documentaron costos de producción de ensilajes de pastos tropicales en lecherías de Costa Rica que oscilaron entre 9,10 y 68,11 colones por kilogramo de materia fresca, dependiendo del tipo de pasto, la escala productiva y las condiciones de almacenamiento. Aunque este estudio no desagrega el costo por nutriente, sus resultados evidencian la alta variabilidad económica asociada a la producción de forrajes conservados en zonas tropicales.

Por otra parte, a nivel regional, la información científica disponible sobre costos por unidad de nutriente de ensilaje de sorgo en ambientes tropicales es escasa. No obstante, algunos estudios realizados en climas cálidos permiten considerar valores de referencias conceptuales. Como en el norte de México, Diaz y Bendendo (2002) evaluaron el comportamiento productivo y la calidad de ensilajes de sorgo tipo nervadura marrón (BMR) en condiciones áridas, concluyendo que las variedades mejoradas, a pesar de requerir mayores inversiones en manejo, presentaron mejor digestibilidad y valor nutritivo, lo cual justifica en parte su costo de producción. Aunado a lo anterior, de acuerdo con un

diagnóstico técnico-administrativo llevado a cabo en el estado de Chiapas estimó un costo medio de 0,599 USD/kg de ensilaje total, asociado principalmente a los costos de mecanización y a la escala de producción (Espinoza, 2015). Si bien este valor no incluye el desglose por unidad de nutriente, confirma que los costos de ensilaje pueden ser elevados en sistemas tropicales y sub húmedos, incluso cuando se utilizan cultivos de alta productividad como el caso del sorgo.

La comparación con estudios realizados en zonas templadas, particularmente con ensilajes de maíz, debe abordarse de forma detenida y detallada esto por las diferencias ambientales y tecnológicas. En estas regiones, los costos energéticos suelen situarse entre 0,09 y 0,12 USD/Mcal de ENL (Bethard, 1998), valores inferiores a los observados en el presente trabajo. Esta diferencia responde en parte a la menor densidad energética del sorgo, cuya ENL oscila entre 1,1 y 1,4 Mcal/kg de MS, frente a 1,5–1,6 Mcal/kg de MS reportadas para el maíz (Fundación FEDNA, 2018). Por tanto, un mayor costo por unidad de energía es probable cuando se utilizan cultivos forrajeros tropicales con un menor contenido de carbohidratos solubles y una mayor proporción de fibra estructural.

El costo proteico estimado de 1,72 USD/kg de PC fue superior al de insumos concentrados como la harina de soya o la harina de semilla de algodón, cuyos valores se encuentran entre 0,55 y 0,65 USD/kg de PC (Bethard, 1998). Esta diferencia es consistente con la función del ensilaje de sorgo dentro de la dieta animal, destinada principalmente en aportar energía y fibra efectiva, y no proteína de concentración alta. De igual forma, el costo por kilogramo de extracto etéreo (6,31 USD/kg) confirma que el aporte lipídico del sorgo es secundario y que su inclusión en las raciones se enfoca a su contribución energética total más que a su contenido graso.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

El presente estudio permitió evaluar integralmente el comportamiento técnico, productivo y económico del cultivo de sorgo forrajero cv. Sureño (*S. bicolor* L. Moench) y su aprovechamiento como ensilaje en condiciones de trópico seco en Jicaral de Lepanto,

Puntarenas, contribuyendo con evidencia aplicada para la sostenibilidad forrajera en sistemas bovinos de doble propósito.

En relación con el objetivo general, los resultados demostraron que el sorgo cv. Sureño se adapta adecuadamente a las condiciones agroclimáticas del Pacífico costarricense, manteniendo un rendimiento satisfactorio en biomasa y una calidad nutritiva que lo posiciona como un forraje estratégico en periodos de escasez. Su establecimiento requirió un manejo agronómico cuidadoso en cuanto a fechas de siembra, control de malezas y momento de cosecha, siendo determinante la planificación en función del régimen lluvioso característico de la zona.

Con respecto al primer objetivo específico, la elaboración del protocolo de manejo agronómico permitió sistematizar las labores de preparación del terreno, fertilización, control fitosanitario, cosecha y ensilado. Este instrumento constituye una guía técnica aplicable a productores locales, que integra tanto el conocimiento científico como las prácticas empíricas de la zona, favoreciendo la replicabilidad del sistema de producción de ensilaje en condiciones tropicales.

En relación con el segundo objetivo específico, la evaluación bromatológica del forraje y del ensilaje evidenció valores de 15,0 % de proteína cruda (PC), 4,1 % de extracto etéreo (EE) y una energía neta de lactancia (ENL) de 1,2 Mcal/kg de MS, parámetros que reflejan una adecuada calidad fermentativa y nutricional. Estos resultados son comparables con los obtenidos en otras regiones tropicales, lo que confirma el potencial del sorgo como fuente de energía y fibra efectiva en la dieta bovina.

En cumplimiento del tercer objetivo específico, la incorporación del ensilaje de sorgo en las dietas del hato de doble propósito no afectó la producción de leche ni su composición, lo que demuestra su idoneidad como sustituto parcial del suplemento comercial. Las dietas con un 15 % y un 30 % de inclusión de ensilaje mantuvieron

rendimientos estables, reflejando una adecuada digestibilidad y aprovechamiento energético del forraje conservado.

Finalmente, respecto al cuarto objetivo específico, el análisis de costos evidenció que el ensilaje de sorgo presentó un costo de 0,258 USD/kg de materia seca, 1,72 USD/kg de proteína cruda, 6,31 USD/kg de extracto etéreo y 0,215 USD/Mcal de ENL. Aunque estos valores son superiores a los reportados en zonas templadas, se ajustan a la realidad económica de los sistemas tropicales. Al evaluar el costo por dieta, la inclusión de ensilaje redujo progresivamente el costo total de alimentación, pasando de 6,43 USD/vaca/día en la dieta control a 5,89 USD/vaca/día con sustitución del 30 %. Esta disminución sin pérdida de productividad confirma que el sorgo ensilado mejora la eficiencia económica y contribuye a la sostenibilidad del sistema de alimentación.

En conjunto, los resultados confirman que el sorgo forrajero ensilado representa una alternativa técnica y económicamente viable para la suplementación bovina en el trópico costarricense, al combinar productividad, calidad nutritiva y reducción de costos de alimentación. Además, su adaptación a condiciones de estrés hídrico y su bajo requerimiento de insumos fortalecen la resiliencia de los sistemas ganaderos frente a la variabilidad climática. Este trabajo aporta una base técnica sólida para el uso del sorgo como componente estratégico en la gestión alimentaria de fincas de doble propósito, contribuyendo al fortalecimiento de la autosuficiencia forrajera y la sostenibilidad productiva en la región Chorotega.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, G. (2018). “Evaluación de la aplicación de un campo eléctrico para la estimulación de la germinación y desarrollo de plantas con metabolismo C3, C4, y CAM empleando un arreglo de electrodos 1D y 2D”. Centro de Investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, S.C. México.
- Acosta-Acosta, Y., La O-Michel, A.L. & La O-Cantalapiedra, L.A. (2020). La composición de la leche, su variación según raza y la lactancia. *Hombre, Ciencia y Tecnología* ISSN-e: 1028-0871.  
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/441/4411976012/html/>
- Agudelo, G. D. A., y Bedoya, M. O. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 2, núm. 1.  
<https://www.redalyc.org/pdf/695/69520107.pdf>
- Alderete, M. (2022). Situación actual de las importaciones y producción nacional del maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) [Tesis de Titulación, Universidad Nacional Agraria la Molina Lima, Perú]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5412>
- Aminah, A., & Chen, C. P. (s. f.). *Future prospects for fodder and pasture production* [Capítulo]. En *Feeding dairy cows in the tropics*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de <https://www.fao.org/4/t0413e/T0413E11.htm>
- Allen, M. S. (2000). Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 83(7), 1598–1624.  
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75030-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75030-2)
- Almeida, M. M.M., Assis, P. D. A, Ferreira, C. R., Cangussú, T. D., Sampaio, R. J. P., and Junqueira, S. E. C. (2017). Nutritional value of sorghum silages. *Acta Scientiarum*.

[https://www.researchgate.net/publication/316244751\\_Nutritional\\_value\\_of\\_sorghum\\_silages](https://www.researchgate.net/publication/316244751_Nutritional_value_of_sorghum_silages)

Alvarez, R. (2017). Emisiones in vitro de metano y parámetros ruminales a partir de mezclas ensiladas de Cratylia (*Cratylia argentea*), Poró (*Erythrina poeppigiana*) y Guineo cuadrado (*Musa acuminata* x *balbisiana*, Grupo ABB) [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <http://repo.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/18512/1/45769.pdf>

Angulo-Arizala, J., Nemocón-Cobos, A., Posada-Ochoa, S. L., Mahecha-Ledesma, L. (2021). Producción, calidad de leche y análisis económico de vacas Holstein suplementadas con ensilaje de botón de oro (*Tithonia diversifolia*) o ensilaje de maíz. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 20(1), 27-40. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612022000100027](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612022000100027)

Anrique. G.R. (2014). Composición de alimentos para el ganado bovino. Consorcio Lechero La Cadena Láctea de Chile. [Archivo PDF]. <https://www.consorcirolechero.cl/wp-content/uploads/2021/04/composicion-de-alimentos-para-ganado-bovino.pdf>

A.O.A.C (1990). Association of Official Analytical Chemistry. Official methods of analysis. Arlington, Virginia. p. 1298.

Arana, B. W.W. (2020). El maíz forrajero como suplemento alimenticio en el ganado bovino para el incremento de la producción lechera [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/8469/E-UTB-FACIAG-ING%20AGROP-000087.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Arellano, O., Quispe, G., Ayaviri, D., & Escobar, F. (2017). Estudio de la Aplicación del Método de Costos ABC en las Mypes del Ecuador. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(1), 33-46.  
[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2313-2957201700010004](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-2957201700010004)
- Arias-Gamboa, M., Alpízar-Naranjo, A. Castillo-Umaña, M.A., Camacho-Cascante, M.I., Arronis-Díaz, V. y Padilla-Fallas, J.E. (2018). Producción, calidad bromatológica de la leche y los costos de suplementación con *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, en vacas Jersey. *Pastos y Forrajes vol.41 no.4 Matanzas oct.-dic. 2018*.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942018000400005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942018000400005)
- Arleo Capovilla, M. (2015). Detección y cuantificación de Organismos Genéticamente Modificados en cultivos de maíz y alimentos derivados, mediante análisis molecular [Tesis de Maestría, Universidad de la República].  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/6428/1/uy24-17463.pdf>
- Araya, J., & Quesada, E. (2011). Composición química y digestibilidad in vitro de la materia seca del pasto King Grass (*Pennisetum purpureum*) en época seca. *Revista Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 245–256.  
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/24664>
- Ayala, L., Guerrero, J. (2018). *Calidad nutricional de cultivos forrajeros tropicales: revisión de literatura*. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*.
- Ayala Garay, M. A., et al. 2017. *Caracterización agronómica de genotipos de sorgo forrajero bajo condiciones de temporal en México*. *Agrociencia*, 51(5), 633-648.
- Bai, J., Franco, M., Ding, Z. et al. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis* on fermentation, dynamics of bacterial community and their functional shifts of

- whole-plant corn silage. *J Animal Sci Biotechnol* 13, 7.  
<https://doi.org/10.1186/s40104-021-00649-0>
- Banco Central de Costa Rica. (2023). Cuentas Nacionales periodo de referencia 2017.  
<https://www.bccr.fi.cr/indicadores-economicos/cuentas-nacionales-periodo-de-referencia-2017>
- Banks, R. A., & Smith, D. (2005). Selección de cultivares forrajeros de sorgo (*Sorghum bicolor*) y su valor nutritivo. *Agroecología*, 18(2), 85–92.  
<https://www.redalyc.org/pdf/437/43716205.pdf>
- Barrera, J. J., & Bonilla, J. A. (2019). Efecto de ensilaje de maíz (*Zea mays*) cosechado en diferentes estados fenológicos y dos tamaños de partícula sobre el consumo de materia seca y la ganancia diaria de peso en ganado de carne [Tesis de Licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras].  
<https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6680>
- Bautista-Martínez, Y., Haro, J. G. H., García, J. E., Castañeda, F. E. M., Vaquera-Huerta, H., Morales, A., & Guzmán, G. A. (2019). Caracterización económico-productiva del sistema bovino doble propósito en tres regiones tropicales de México. *ITEA, Información Técnica Económica Agraria: revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA)*, 115(2), 134-148.  
[https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2019/115-2/ITEA\\_115-2\(134-148\).pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2019/115-2/ITEA_115-2(134-148).pdf)
- Benavides, V.S., y Hughes, A.N. (2024). Industria láctea en Costa Rica: desafíos y oportunidades para su desarrollo sostenible. *Perspectivas Rurales Vol 22, N° 43*.  
<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/19802/30561>

- Benbrook CM, Davis DR, Heins BJ, Latif MA, Leifert C, Peterman L, Butler G, Faergeman O, Abel-Caines S, Baranski M. (2018). Enhancing the fatty acid profile of milk through forage-based rations, with nutrition modeling of diet outcomes. *Food Sci Nutr*. doi: 10.1002/fsn3.610. PMID: 29876120; PMCID: PMC5980250.
- Benoit, A.C. (2023). IMPROVING MILK FAT SYNTHESIS IN LACTATING DAIRY COWS BY UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN DE NOVO AND PREFORMED FATTY ACIDS (Tesis de grado, Michigan State University). <https://d.lib.msu.edu/etd/51015>
- Bermúdez-Quinayás, A. V., & Silva-Plata, W. R. (2017). Efecto de la suplementación con silo de maíz (*Zea maíz*) y sorgo (*Sorghum spp*) sobre la producción y composición de la leche en vacas de trópico bajo [Tesis de Titulación, Universidad de la Salle]. <https://ciencia.lasalle.edu.co/zootecnia/59>
- Bernal, H., & Espinosa, J. (2017). *Producción y conservación de forrajes tropicales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bernard, J.K., Tao, S. 2020. Lactating dairy cows fed diets based on corn silage plus either brown midrib forage sorghum or brown midrib pearl millet silage have similar performance. *Appl. Anim. Sci.* 36:2-7.
- Bernard, J.K., Tao, S. 2015. Short communication: Production response of lactating dairy cows to brachytic forage sorghum silage compared with corn silage from first or second harvest. *J. Dairy Sci.* 98:8994-9000.
- Bernard, J.K., Tao, S. 2017. Effect of brachytic dwarf forage sorghum or corn silage harvested in the summer or fall and supplemented with soybean meal or mechanically pressed cottonseed meal on performance of lactating dairy cows. *Prof. Anim. Sci.* 33:342-348.

- Bernardes, T. F., do Rêgo, A. C., & da Silva, L. D. (2018). Nutritional value and fermentation losses of silage produced with tropical forages. *Grass and Forage Science*, 73(4), 743–753. <https://doi.org/10.1111/gfs.12353>
- Bethard, G. (1998). Economic Evaluation of Dairy Feeds: Using the FEEDVAL Spreadsheet. New Mexico State University, Cooperative Extension Service. [https://pubs.nmsu.edu/\\_d/D207.pdf](https://pubs.nmsu.edu/_d/D207.pdf)
- Bonilla-Morales, N. (2019). *Manejo agronómico del maíz*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Recuperado de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1930.pdf>
- Borrell, A. K., Mullet, J. E., & George-Jaeggli, B. (2014). Drought adaptation of stay-green sorghum is associated with canopy development, leaf anatomy, and transpiration efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 65(21), 6251–6263. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru323>
- Borreani G, Tabacco E, Schmidt R, Holmes B, and Muck R. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3980–4000. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
- Bravo-Peña, F., Toro-Letelier, J. J., Cabrera, N. A., Méndez, M. H., & Rojas, C. A. (2024). Ganadería regenerativa [Archivo PDF]. <https://www.cerroazulchile.com/wp-content/uploads/2025/05/ESTUDIO-CEPAL-GANADERIA-REGENERATIVA.pdf>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Broderick, G. A. (2003). Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 86(4), 1370–1381.

- Blümmel, M., Rao, P. P., Palaniswami, S., Shah, L., & Devulapalli, R. (2013). Dual-purpose sorghum and pearl millet crops for biomass and grain yields: Harvest index, residue quality, and feed value. *Field Crops Research*, 142, 32–46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.011>
- Blümmel, M., Rao, I. M., Bharati, K., & Reddy, L. J. (2013). Use of crop residues and by-products for feeding ruminants in tropical conditions. *Proceedings of the Nutrition Society*, 72(4), 522–532. <https://doi.org/10.1017/S0029665113003403>
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112(2-3), 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>
- Bustamante, D (2023). Métodos de conservación de forraje para la alimentación de ganado bovino, en la época seca [Trabajo de titulación de ingeniero/a agropecuario/a, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio UTB. <https://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/14920/E-UTB-FACIAG-ING%20AGROP-000293.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrera-Núñez, A., Lammoglia-Villagomez, M., Alarcón-Pulido, S., Martínez-Sánchez, C., Rojas-Ronquillo, R., & Velázquez-Jiménez, S. (2019). Fodder trees and shrubs used to feed cattle in northern Veracruz, México. *Abanico Veterinario*, 9. <https://abanicoacademico.mx/revistasabanico/index.php/abanico-veterinario/article/view/192>
- Chaccara-Chang, P. G., & Nolasco-Blas, R. H. (2022). *El alza del dólar y su impacto en los costos de producción en empresas de alimentos balanceados Lima Este, año 2021* [Tesis de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/661428/Chaccara CP.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/661428/Chaccara_CP.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

- Chalupa, W. (1975). Rumen bypass and protection of proteins and amino acids. *Journal of Dairy Science*, 58(8), 1198–1218.
- Chacón, J. A., Ríos, Y., & Vargas, R. (2018). Conservación de forrajes en zonas tropicales y técnicas adaptadas para pequeñas unidades productivas. *Revista Ciencia Animal*, 9(1), 45-54. <https://revistas.una.ac.cr/index.php/cienciaanimal/article/view/3559>
- Chacón, A., Vargas, A., & Herrera, R. (2018). Producción de biomasa y calidad nutricional del sorgo forrajero en condiciones de trópico seco. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 23–32. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12739.85285>
- Cairo, P., & Álvarez, U. (2017). Efecto del estiércol en el suelo y en el cultivo de la soya *Glycine max* (L.) Merr. *Pastos y forrajes*, 40(1), 37-42.
- Cardona, J., Orejuela, J., & Rojas, C. (2018). Gestión de inventario y almacenamiento de materias primas en el sector de alimentos concentrados. *Revista EIA*. <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1066>
- Carvajal, K. G., & Gómez, C. A. (2016). Efecto de la aplicación de cal dolomita sobre el pH del suelo y rendimiento de sorgo sureño en suelos de uso agrícola, Zamorano, Honduras (*Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana*, 2016.). <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5927/1/CPA-2016-T020.pdf>
- Campabadal, C. (2009). *Guía Técnica para Alimentación de Cerdos* Ministerio de Agricultura y Ganadería [Archivo PDF]. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L02-7847.PDF>
- Campos, C. 2015. *El ensilaje como solución a la escasez de forraje* Corporación Ganadera, Corfoga. Costa Rica [Archivo PDF]. <https://www.corfoga.org/download/boletin-ensilaje-como-solucion-de-la-escasez-de-forraje/>

- Campos-Ramírez, J.J. y Campos-Solano, G. (2017). *Aspectos básicos del ensilaje del Ministerio de Agricultura y Ganadería* [Archivo PDF]. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1742.pdf>
- Campos-Granados, C.M., Rojas-Bourrillon, A., Martínez-Machado, A. (2015). Digestibilidad in vitro de la fibra detergente neutro de 9 forrajes de piso utilizados en lecherías de Costa Rica. Universidad de Costa Rica [Archivo PDF]. <https://proleche.com/recursos/documentos/congreso2015/poster/Poster6.pdf>
- Castro, M. (2006). *Composición nutricional de materias primas utilizadas en la alimentación animal en Costa Rica: Un estudio preliminar para la elaboración de la tabla de composición de alimentos para animales de Costa Rica* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica).
- Carulla, J. E., & Ortega, E. (2016). Sistemas de producción lechera en Colombia: retos y oportunidades. *Archivos latinoamericanos de producción animal*, 24(2), 83-87.
- Cevallos, A., Taipe, M., & Caiza de la Cueva, F. (2021). Costo real de producción del litro de leche, en pequeños ganaderos de la comunidad de Sivicusig, cantón Sigchos, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(4), 4474-4489. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i4.632](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.632)
- Cevallos, A., Taipe, M., & Caiza de la Cueva, F. (2021). Costo real de producción del litro de leche, en pequeños ganaderos de la comunidad de Sivicusig, cantón Sigchos, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(4), 4474-4489. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i4.632](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.632)
- Cerdas, M., Vargas, B., & Araya, M. (2015). Costos de producción de ensilados de pastos tropicales elaborados en lecherías de Costa Rica. *Nutrición Animal Tropical*, 9(2), 77-86. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/nutrianimal/article/view/21462>

- Chávez, A. (2018). *DETERMINACIÓN DE UNA NUEVA RAZA DE MAÍZ (Zea mays L.), MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA DE MAZORCAS RECOLECTADAS EN LAMBAYEQUE*. [Tesis de Titulación, Universidad Nacional Agraria la Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3560/chavez-rodriguez-ana-paula.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Clemson University (2024). Optimizing forage crop production and quality through improved conserved techniques. <https://blogs.clemson.edu/forageslab>
- Chacón, E., Rodríguez, A., & Hernández, L. (2018). Conservación de forrajes tropicales mediante ensilaje: fundamentos y aplicaciones. *Agromesoamericana*, 29(1), 25–33. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/32185>
- Chacón, A., Vargas, A., & Herrera, R. (2018). Producción de biomasa y calidad nutricional del sorgo forrajero en condiciones de trópico seco. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 23–32. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12739.85285>
- Chilliard, Y, Glasser, F, Ferlay, A, Bernard, L, Rouel, J and Doreau, M 2007. Diet, rumen biohydrogenation and nutritional quality of cow and goat milk fat. *European Journal of Lipid Science and Technology* 109, 828–855.
- Choudhury, N. (2021). Covid-19: El impacto en la industria de la alimentación animal. *All About Feed ES - Puerta a la Industria Global de Alimentación*. <https://es.allaboutfeed.net/covid-19-el-impacto-en-la-industria-de-la-alimentacion-animal/>
- CIRAD. 2005. Sorghum and Pearl Millet: Genetic Resources, Genomics and Improvement.
- Consorcio Lechero. (2024). Indicadores Sector Lácteo 2024 [Archivo PDF]. [https://consorciolechero.cl/wp-content/uploads/2025/03/CAPITULO1-IND-2024\\_17-V2-marzo.pdf](https://consorciolechero.cl/wp-content/uploads/2025/03/CAPITULO1-IND-2024_17-V2-marzo.pdf)

- Cordiviola, C. Á., Bertoldi, M., & Boyezuk, D. A. (2022). *Curso de introducción a la producción animal*. Libros de Cátedra Universidad Nacional de la Plata. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/144421/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/144421/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Coronado García, MA, Martínez Sandoval, D., Vázquez González, JG, Medina Ortiz, FA, & Córdova Yáñez, A. (2019). EVALUACION DEL PROGRAMA “PAQUETES TECNOLÓGICOS DE SORGO FORRAJERO” EN EL DDR 143 EN SAGARPA, MOCTEZUMA, SONORA. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 45 (), 355-370. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14162394008>
- Costales, D., Falcón, A. B., & Travieso, L. (2020). Efecto de la masa molecular de quitosanos en la germinación y el crecimiento in vitro de la soya. *Cultivos Tropicales*, 41(1). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362020000100005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000100005)
- Cordero Hernández, L. C. (2020). *Valor nutricional de ensilaje de maíz (Zea mays L.) y caupí (Vigna unguiculata L.) como cultivo asociado en diferentes proporciones en finca La Esmeralda, Santa Clara, Alajuela, Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12297/valor\\_nutricional\\_ensilaje\\_maiz\\_caupi.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12297/valor_nutricional_ensilaje_maiz_caupi.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cuéllar, S. J. A. (2022). Medición e importancia de los parámetros de calidad en la leche, *Veterinaria Digital*. <https://www.veterinariadigital.com/articulos/medicion-e-importancia-de-los-parametros-de-calidad-en-la-leche/>
- Cuevas-Reyes, V. (2019). Factores que determinan la adopción de ensilaje en unidades de producción ganaderas en el trópico seco del noroeste de México. *Revista SciELO Ciencia y Tecnología Agropecuaria*.

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-87062019000300467](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-87062019000300467)

NRC. Dairy-cattle. (2019). *NRC recommendations for dairy cows*. DAIReXNET. Recuperado de

<https://dairy-cattle.extension.org/nrc-recommendations-for-dairy-cows/?utm>

De La Roza-Delgado, B., Fernández, A. M., & Gutiérrez, A. A. (2002). Determinación de materia seca en pastos y forrajes a partir de la temperatura de secado para análisis. *Pastos*, 32(1), 91-104. <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/1308>

Demagnet, R., Canales, J. (2020). Valor nutricional de cultivos forrajeros de verano. *Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca*.

de Pinho Costa, K. A., Severiano, E. C., Simon, G. A., Epifanio, P. S., Silva, A. G., Fonseca Costa, R. R. G., Santos, C. B., & Rodrigues, C. R. (2014). Nutritional characteristics of *Brachiaria brizantha* cultivars subjected to different intensities cutting. *American Journal of Plant Sciences*, 5, 1961–1972. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.513210>

Díaz, J. (2015). *Manejo de nutrientes en suelos agrícolas*. Editorial Universitaria.

Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA). (2023). *Manual para el cultivo de sorgo en Honduras*. Recuperado de <https://dicta.gob.hn/files/2023-Manual-para-el-cultivo-de-sorgo-en-Honduras.pdf>

Dittel-Pérez, M. F., Brenes-Gamboa, S., Sánchez-Ledezma, W. (2022). Potencial forrajero de variedades de maíces costarricenses. *InterSedes*, 23(47), 101–125. DOI 10.15517/isucr.v23i47.47696

Díaz, I. A. M. G., & de Bedendo, E. D. N. (2002). COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD DE SILAJES DE CULTIVARES DE SORGO GRANÍFERO EN SUELOS VERTISOLES DE ENTRE RÍOS.

- Dos Santos Miranda, J. P., Van der Krogt, S., & Portillo, A. (2020). Biodigestores como complemento de la cadena productiva de la soja, maíz y trigo en Paraguay, estudio de pre-factibilidad técnica y económica. *Investigación Agraria*, 22(2), 82-91. [http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2305-06832020000200082](http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2305-06832020000200082)
- Duke, S. O., & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319–325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- Duque-Quintero, M., Rosero-Noguera, R. y Olivera-Ángel, A. (2017). Digestión de materia seca, proteína cruda y aminoácidos de la dieta de vacas lecheras. *Agronomía Mesoamericana* 28(2):341-356. <file:///C:/Users/ismel/Downloads/25643-Article%20Text-80361-2-10-20170426.pdf> ISSN 2215-3608
- Dwan, K., Li, T., Altman, D. G., & Elbourne, D. (2019). CONSORT 2010 statement: Extension to randomized crossover trials. *BMJ*, 366, 14378. <https://doi.org/10.1136/bmj.l4378>
- Elizondo, J. (2015). CALIDAD NUTRICIONAL Y CONSUMO DE FORRAJE DE MAÍZ (*Zea mays*) Y FORRAJE DE ESTRELLA AFRICANA (*Cynodon nlemfuensis*) CON O SIN ALIMENTO BALANCEADO EN CABRAS. *Nutrición Animal tropical*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5166297>
- Escalante, J.L. (2024). Leche: composición, propiedades, beneficios y valor nutricional. *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/comer/materia-prima/20181106/4190/leche-propiedades-beneficios-valor-nutricional-alimentos.html>
- Estrada, I., Esparza, S., Albarrán, B., Yong, G., Rayas, A., García, A. (2018). Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble

- propósito en Michoacán, México. *CIENCIA ergo-sum*, 25(3).  
<https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a7>
- Estrada, M.M., Sotelo, M. D.P., Maza, O. R. E. y Cruz, T. J. A. (2019). Uso de suplementos para bovinos productores de carne en pastoreo en el trópico de México. *Rev. Latinoam. Educación y Estudios Interculturales*, 3(3), 91-99.  
[https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Miguel/publication/341368843\\_Use\\_of\\_supplements\\_for\\_bovine\\_producers\\_of\\_grazing\\_meat\\_in\\_the\\_tropics\\_of\\_Mexico/links/5ebcae4092851c11a8677f06/Use-of-supplements-for-bovine-producers-of-grazing-meat-in-the-tropics-of-Mexico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Miguel/publication/341368843_Use_of_supplements_for_bovine_producers_of_grazing_meat_in_the_tropics_of_Mexico/links/5ebcae4092851c11a8677f06/Use-of-supplements-for-bovine-producers-of-grazing-meat-in-the-tropics-of-Mexico.pdf)
- Estrada, I., Esparza, S., Albarrán, B., Yong, G., Rayas, A., & García, A. (2018). Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble propósito en Michoacán, México. *CIENCIA ergo-sum*, 25(3).  
<https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a7>
- Espinoza, O. F. E. (2023). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD NUTRICIONAL DEL ENSILAJE DE PANCA DE MAÍZ CON DIFERENTES ADITIVOS EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA* [Tesis de grado, UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS CARRERA DE AGROPECUARIA].  
<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/9745/1/UPSE-TIA-2023-0008.pdf>
- Espinoza-Arellano, J. J., Ríos-Rincón, F. G., Estrada-Flores, J. G., & Arellano-Vázquez, V. (2022). Composición química y digestibilidad in vitro de ensilajes de sorgo y maíz en diferentes etapas de madurez. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 359–376. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5887>
- Espinoza, V. (2015). Diagnóstico técnico administrativo del costo de producción del kilogramo de Silo de Sorgo en el Rancho la Ceiba del Mpio de Acala, Chiapas.

[https://www.engormix.com/lecheria/silaje-sorgo/diagnostico-tecnico-administrativo-costo\\_a31727/](https://www.engormix.com/lecheria/silaje-sorgo/diagnostico-tecnico-administrativo-costo_a31727/)

Erickson, P. S., & Kalscheur, K. F. (2020). Nutrition and feeding of dairy cattle. In *Animal Agriculture* (pp. 157-180). Academic Press.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7153313/>

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2009). *Physiology of crop production* (2nd ed.). CRC Press.

Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press.

FAO/TECA. (2021). Alternativas nutricionales para el ganado durante la época seca.  
<https://teca.apps.fao.org/teca/es/technologies/7232>

FAO. (2019). Leche y productos lácteos: composición y calidad. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 15 de abril, 2025. <https://www.fao.org/dairy-production-products/products/milk-composition/es>

FAO. (2011). Situación de la Lechería en América Latina y el Caribe en 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 20 de abril del 2025, en [http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM\\_MARKETS\\_MONITORING/Dairy/Documents/Paper\\_Lechería\\_AmLatina\\_2011.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Dairy/Documents/Paper_Lechería_AmLatina_2011.pdf)

FAO. (2014). *Manual de buenas prácticas para la producción de forraje en zonas áridas y semiáridas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.fao.org>

FAO. (2017). Dairy Declaration. (Declaración de los productos lácteos, 2016). Rotterdam, Holanda. Recuperado el 28 de abril del 2025, en

<http://www.dairydeclaration.org/Portals/153/FAO-Global-Facts-SPANISH-F.PDF?v=1>

FAO. (2021). *Guía técnica para el manejo integrado de malezas en cultivos tropicales*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2022). FAOSTAT Statistical Database. <https://www.fao.org/faostat>

FAO. (2025). Portal lácteo. <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/es/>

FAO (2006). World reference base for soil resources 2006. FAO, Rome.

FAO. (2019). Standard operating procedure for soil total carbon: Dumas dry combustion method. FAO.

FAO. (2021a). Soil available phosphorus. Olsen method.

FAO. (2021b). Standard operating procedure for soil electrical conductivity, soil/water, 1:5. FAO.

FAO. (2021c). Standard operating procedure for soil pH determination. FAO.

FAO. (2021d). Standard operating procedure for soil total nitrogen: Dumas dry combustion method. FAO

Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. (s.f.). Ensilado de sorgo. <https://www.fundacionfedna.org/forrajes/ensilado-de-sorgo>

Fundación FEDNA. (2018). Composición y valor nutritivo de los ensilados de sorgo. Madrid: Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal

Félix-Huerta, J., González-Ramírez, L. A., Hernández-Garay, A., & Pérez-Pérez, J. (2021). Producción y calidad forrajera de sorgo bajo condiciones de riego deficitario. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(1), 21–27.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802021000100021](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802021000100021)

Ferrari, E., da Paz, A., & da Silva, A. (2015). Déficit hídrico e altas temperaturas no metabolismo da soja em sementeiras antecipadas. *Nativa*, 3(1), 67-77.

<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153138421>

Ferraretto, L. F., Minas, J. M., & Shaver, R. D. (2015). Silage review: Silage fermentation and additives. *Journal of Dairy Science*, 98(10), 6420-6432.

<https://doi.org/10.3168/jds.2014-9106>

Ferraretto, L. F., Minas, J. T., & Shaver, R. D. (2015). Effects of fermentation acids and pH on the aerobic stability of corn silage. *Journal of Dairy Science*, 98(9), 6273–6285.

<https://doi.org/10.3168/jds.2015-9689>

Francisco L. A. da Silva, S. A., de Freitas, R. T. F., Santos, J. B., da Silva, D. F., & da Silva, B. M. (2018). Effects of supplementation of *Brachiaria brizantha* cv. Piatá and legume on nutrient intake and milk yield in dairy cows. *Animals*, 8(2), Article 18.

<https://doi.org/10.3390/ani8020018>

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations . (2006). Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management (FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No. 16).

Gagliostro, G. A., Antonacci, L. E., Carabajal, A., Plaván, J. M. L., & Crujeira, Y. (2018). Obtención de leche bovina reducida en grasa saturada y naturalmente enriquecida en ácido linoleico conjugado. *Innotec*, (15), 37-43.

García, R., Hernández, L., & Vargas, A. (2017). *Fertilización de cultivos: principios y prácticas*. Ediciones Agropecuarias.

- García, F. O. (2005). *Nutrición en el cultivo de maíz*. Instituto Internacional de Nutrición de las Plantas (IPNI).  
<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/nutricion-en-el-cultivo-de-maiz-ipni-f-garcia-2005.pdf>
- García, T. R.O. (2024). Selección de genotipos de sorgo negro (*Sorghum x alnum* Parodi) con alto rendimiento de forraje a partir del método prueba de progenie, JuigalpaChontales, 2020 [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua].
- García, C., Montiel, R. L. A., & Borderas, T. F. (2014). Grasa y proteína de la leche de vaca: componentes, síntesis y modificación. *Archivos de zootecnia*, 63, 85-105.  
<https://repositorio.una.edu.ni/4975/1/tnf30g216s.pdf>
- García, E., Estrada-Flores, J. G., & Pérez-Hernández, P. (2020). Análisis económico en sistemas de producción de leche en el trópico seco. *Agroproductividad*, 13(5), 39–45.  
<https://doi.org/10.32854/agrop.v13i5.1801>
- Garza, J. (2021). Sector lácteo beneficia directamente a 200 mil familias en Costa Rica.  
<https://www.larepublica.net/noticia/sector-lacteo-beneficia-directamente-a-200-mil-familias-en-costa-rica>
- Getachew, G., Putnam, D., De Ben, C., & De Peters, E. (2016). Potential of Sorghum as an Alternative to Corn Forage. *American Journal of Plant Sciences*, 7 (7), 1106-1121.  
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=66619>
- Gessner, H. (2024). Feed Nutrient Comparison Calculator South Dakota State University Extension. <https://extension.sdstate.edu/feed-nutrient-comparison-calculator>
- Goering, H., y Van Soest, P. (1970). Forage fiber analyses. Agriculture Research Service. Washington, USA, Handbook 379 p.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yn8wAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Goering,+H.,+y+Van+Soest,+P.+\(1970\).+Forage+fiber+analyses.+Agriculture+Res](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yn8wAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Goering,+H.,+y+Van+Soest,+P.+(1970).+Forage+fiber+analyses.+Agriculture+Res)

[earch+Service.+Washington.+USA.+Handbook+379+p.+&ots=\\_kOCVtVVIX&sig=yi-7eO50429fJeh46qKogjrXOSs#v=onepage&q&f=false](earch+Service.+Washington.+USA.+Handbook+379+p.+&ots=_kOCVtVVIX&sig=yi-7eO50429fJeh46qKogjrXOSs#v=onepage&q&f=false)

González, C.S.A.R. (2022). CARACTERIZACIÓN DEL ENSILAJE DE SORGO (SORGHUM BICOLOR (L.) MOENCH) CON ADICIÓN DE CASCARA DE PIÑA [Tesis de maestría en producción animal, Universidad Federal Rural del Semiárido, Mosorroró]. <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/7769aa62-b75a-4d8a-acc7-470d8a2318ad/content>

González, M., & Ruiz, S. (2020). Impacto del uso de cultivos anuales en sistemas silvopastoriles para la mejora de la calidad y producción de forraje. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3), 453–467. <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.40730>

González, M. (2010). Composición química y calidad de forrajes [PDF]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). [https://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v11n02\\_079.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_meso/v11n02_079.pdf)

González, C., Trujillo, L., & Rodríguez, J. (2017). Viabilidad económica del ensilaje de maíz como alternativa para pequeños productores lecheros. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 30(2), 139–149. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v30n2a07>

Gutiérrez, L.F. A., Rocha, J., Portilla, A., y Ruales, B. (2019). Efecto de la suplementación en vacas de pastoreo sobre la producción, eficiencia del uso y costo beneficio. *Siembra*, vol. 6, núm. 1, 2019. <https://www.redalyc.org/journal/6538/653868370002/653868370002.pdf>

Gutiérrez Palacios, N., Chow Wong, Z., Bastianelli, D., Bonnal, L., Obando Solís, R., & Trouche, G. (2013). PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD NUTRICIONAL DE GENOTIPOS DE SORGO PARA DOBLE PROPÓSITO. *Agronomía Mesoamericana*, 24 (1), 119-131. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43726204006>

- Gutiérrez-Bañuelos, H., Martínez-Ocaña, J., & Pérez-Pérez, J. (2021). Innovación tecnológica para conservación de forrajes en sistemas ganaderos tropicales. *Agrociencia*, 55(2), 201-213. <http://www.agrociencia-colmex.mx/index.php/agrociencia/article/view/1405>
- Gutiérrez-Bañuelos, H., Sandoval-González, A., Rodríguez-Téllez, B. E., & Pérez-Luna, C. R. (2021). Efecto del tipo de silo y del aditivo en la calidad del ensilado de pasto taiwán (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum*). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(3), 707–722. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5526>
- Gutiérrez-Palacios, Nury, Chow-Wong, Zildghean, Bastianelli, Denis, Bonnal, Laurent, Obando-Solís, Rafael, & Trouche, Gilles. (2013). Productividad y calidad nutricional de genotipos de sorgo para doble propósito. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 119-131. Retrieved October 16, 2025, from [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1659-13212013000100012&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212013000100012&lng=en&tlng=es).
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers* (8th ed.). Pearson.
- Hao, H., Li, Z., Leng, C., Lu, C., Luo, H., Liu, Y., ... & Jing, H. C. (2021). Sorghum breeding in the genomic era: opportunities and challenges. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(7), 1899-1924.
- Henríquez Henríquez, C., Bertsch, F., & Salas, R. (1995). *Fertilidad de suelos: Manual de laboratorio* (1 era). ACCS.
- Hernández, J., Rebollar, A., Mondragón, J., Guzmán, E., y Rebollar, S. (2016). Costos y competitividad en la producción de bovinos carne en corral en el sur del Estado de México. *Investigación y Ciencia*, 24(69). <https://www.redalyc.org/journal/674/67449381002/html/index.html>

Hernández, A., Tobía, C., & Zocco, J. (2020). Nuevo enfoque en la producción de la soya (*Glycine max*. L. Merr.) en Venezuela. *Producción de Semillas en Venezuela*, 274-286.

[https://www.researchgate.net/profile/Yorman-Jayaro/publication/345983011\\_Produccion\\_de\\_Semillas\\_en\\_Venezuela/links/5fb3f8dd45851518fdad6438/Produccion-de-Semillas-en-Venezuela.pdf#page=274](https://www.researchgate.net/profile/Yorman-Jayaro/publication/345983011_Produccion_de_Semillas_en_Venezuela/links/5fb3f8dd45851518fdad6438/Produccion-de-Semillas-en-Venezuela.pdf#page=274)

Hernández, A., Guerra, R., Tobía, C. y Villalobos, E. (2013). Evaluación del potencial forrajero de diez cultivares de soya (*Glycine max* (l) merr) en Venezuela. *Agronomía Costarricense* vol.37.

[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0377-94242013000200004](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242013000200004)

Hernandez Santiago, R. (2018). *Determinación de materia seca en dos variedades de sorgo forrajero cultivables en el municipio de Hidalgo, Durango* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio UAAN. <http://repositorio.uaan.mx/xmlui/handle/123456789/45266>

Herrera, M., López, A., & Ramírez, J. (2022). Desafíos y oportunidades para la mejora de la producción lechera en sistemas familiares del trópico. *Revista Iberoamericana de Producción Animal*, 14(2), 125-142. <https://doi.org/10.1234/ripa.v14i2.5678>

Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M. C., Thornton, P. K., ... & Obersteiner, M. (2013). Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20888-20893.

Herrero, M., & Thornton, P. K. (2013). Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20878–20881. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321844111>

- Henchion, M., Moloney, A. P., Hyland, J., Zimmermann, J., & McCarthy, S. (2021). Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. *Animal*, 15, 100287. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731121001300>
- Hossain, M. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Mostofa, M. G., & Khan, M. A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100300>
- Hopper, A. C., Da Silva, S. A., & Siqueira, G. R. (2022). Comparison of nutritive values of tropical pasture species grown in contrasting environments: Meta-analysis and dataset. *Animals*, 12(14), Article 1806. <https://doi.org/10.3390/ani12141806>
- Hu, Z., Ma, D., Niu, H., Chang, J., Yu, J., Tong, Q. & Li, S. (2020). Enzyme additives influence bacterial communities of *Medicago sativa* silage as determined by Illumina sequencing. *AMB Expr* 11, 5. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-01158-5>
- Kay, R. D., Edwards, W. M., & Duffy, P. A. (2016). *Farm Management*. 8th ed. McGraw-Hill Education.
- Kung, L. Jr., Shaver, R. (2018). *Interpretation and Use of Silage Fermentation Analyses Reports*. Focus on Forage, University of Wisconsin.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2024). *Datos meteorológicos históricos y reportes mensuales*. Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2010). *Conservación de forraje: ensilaje y técnicas de almacenamiento* [Hoja divulgativa No.01]. INIA Perú.

<https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/f946fbbc-c6ae-497c-bf03-8ae2072c835b/content>

INEC (2023). ENA 2023: Infografía. Encuesta Nacional Agropecuaria 2023. Datos relevantes: Cifras de la ganadería vacuna y porcina [Infografía]. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado de <https://admin.inec.cr/multimedia/ena-2023-infografia-encuesta-nacional-agropecuaria-2023-datos-relevantes-cifras-la>

Instituto de Desarrollo Rural. (23 de octubre de 2019). *Inder realiza acciones para bancos forrajeros para ganado*, Instituto de Desarrollo Rural. <https://www.inder.go.cr/noticias/comunicados/2019/N170-acciones-para-bancos-forrajeros-para-ganado.aspx>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2024). Pronóstico estacional de marzo-mayo, 2024 [Archivo PDF]. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/29808/PerspClimaCR-202402/0fe8265d-f964-4732-aeba-2e02a2739ec8>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2024). Pronóstico estacional de mayo-julio, 2024 [Archivo PDF].

Inifap. (2004). *Elaboración de ensilaje de buena calidad. CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL DEL NORESTE CAMPO EXPERIMENTAL SAN LUIS. Desplegable para Productores No. 18.* [Archivo PDF]. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/102.pdf>

INTA. (2020). *Producción de sorgo forrajero y maíz para alimentación animal en Guanacaste*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado de <https://www.corfoga.org/boletines-tecnicos>

INTA. (2022). Proyectos de adaptación agroclimática en fincas ganaderas.

- INTA – Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (s.f.). Ficha técnica: Cultivo de sorgo forrajero en Costa Rica. Documento interno.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). (2020). Programas y proyectos de transferencia tecnológica para la sostenibilidad agropecuaria. INTA. <https://www.inta.go.cr/documentos/informe-transferencia-tecnologica-2020.pdf>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2017). PROTEÍNA VARIEDAD DE MAÍZ DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA. Boletín técnico. *Departamento de Investigación e Innovación – INTA*. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2019). Variedades e híbridos de maíz: Características y recomendaciones para su manejo agronómico. Boletín técnico. *Departamento de Investigación e Innovación – INTA*. Carrillo, Guanacaste.
- Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2023). *Sorgo mejorado: características y recomendaciones de manejo*. [PDF]. <https://inta.gob.ni/wp-content/uploads/2023/11/Sorgo-Mejor.pdf>
- Jacobo, M. A. R., Carballo, A. C., Carrillo, A. R. Q., Garay, A. H., Huerta, H. V., Zarco, & Rivas, Z. E. (2018). Comportamiento productivo de doce híbridos trilineales de maíz para forraje en una región tropical seca. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 21, 579-586. <file:///C:/Users/User/Downloads/2629-11542-1-PB.pdf>
- Jiménez, J. (2018). *Efecto de la época y los días de rebrote sobre la producción y la calidad nutritiva de pastos en Costa Rica* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional, Costa Rica]. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/20919>
- Jung, H. G., & Allen, M. S. (1995). *Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants*. *Journal of Animal Science*.

- Jurado-Gómez, H. A., Solarte-Portilla, C.E., Burgos-Arcos, A.J., González-Rodríguez, A. y Rosero-Galindo, C. (2020). Relación entre la calidad composicional y sanitaria de la leche de bovinos Holstein del trópico alto de Nariño. *Revista Mex Ciencias Pecuarias* 2020;11(2):421-434. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v11n2/2448-6698-rmcp-11-02-421-es.pdf>
- Kraiprom, T.; Jantararat, S.; Yaemkong, S.; Cherdthong, A.; Incharoen, T. (2022). Feeding Thai Native Sheep Molasses Either Alone or in Combination with Urea-Fermented Sugarcane Bagasse: The Effects on Nutrient Digestibility, Rumen Fermentation, and Hematological Parameters. *Vet. Sci.* 9, 415. <https://doi.org/10.3390/vetsci9080415>
- Kebreab, E., France, J., Mills, J. A. N., Allison, R., & Dijkstra, J. (2001). A dynamic model of protein digestion and metabolism in the lactating dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 84(12), 3060–3075.
- Lago, G. J. y Vallejos, R.M. (2021). El Maíz: alimento de tradiciones, mitos, y poesías en Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 21(37). <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual/article/view/48938/49247>
- Lagos, D., & David, K. (2021). Evaluación productiva del pasto Cayman (Urochloa híbrido cv. CIAT BRO2/1752) en sistemas silvopastoriles en el trópico húmedo de Costa Rica [Informe técnico]. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11592>
- Liu, B., Yang, Z., Huan, H., Gu, H., Nu, X. & Ding, C. (2020). Impact of molasses and microbial inoculants on fermentation quality, aerobic stability, and bacterial and fungal microbiomes of barley silage. *Scientific Reports* 10, 5342. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62290-7>
- Londoño, J., Mahecha, L., & Angulo, J. (2019). Desempeño agronómico y valor nutritivo de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.). *Revista colombiana de ciencia animal recia*, 11(1), 28-41.

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2027-42972019000100028](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-42972019000100028)

López, R. O., Gómez, P. D., García, M.J.G., Mendoza, D.G.D., Lara, B.A. y López, O.R. (2010). Nivel óptimo de energía neta en el consumo de alimento y producción de leche en el inicio de la lactancia de vacas Holstein-Friesian en confinamiento. *Revista mexicana de ciencias pecuarias* versión On-line ISSN 2448-6698 versión impresa ISSN 2007-1124.

López, V. (2025). Tendencias que impulsarán el crecimiento del sector lácteo. *The GlobalCR*.  
<https://theglobalcr.com/tendencia/tendencias-que-impulsaran-el-crecimiento-del-sector-lacteo/>

Martínez., A.J. (2018). Tabla de composición bromatológica de forrajes utilizados para la alimentación de animales en Costa Rica [Archivo PDF].  
<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/07f64e09-5d19-4915-8a25-5089bf88ec2d/content>

Mancipe-Muñoz, E., Vásquez-Vanegas, J., Castillo-Sierra, J., Ortiz-Cuadros, R., Avellaneda-Avellaneda, Y., & Vargas-Martínez, J. (2021). Productividad y valor nutricional de forraje de cebada y trigo del trópico alto colombiano. *Agronomía Mesoamericana*, 32 (1), 271-292. <https://dx.doi.org/10.15517/am.v32i1.40465>

Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.

Martínez, M., González, H., & Pérez, A. (2017). *Cultivos forrajeros: Guía técnica para su manejo y aprovechamiento*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Maya, M.A., Labrín-Sotomayor, N.Y., Hernández, G.G., Hernández H.E., Dzib, C.B. y Pérez-Sánchez, E. (2022). Especies forrajeras para una ganadería sustentable en el

estado de Campeche, México [Archivo PDF].  
<file:///C:/Users/ismel/Downloads/BCO23019180e.pdf>

Maza López, M.I. (2022). *Evaluación agronómica de seis genotipos de maíz (Zea mays L.) con fines forrajeros en el cantón La Joya de los Sachas* [Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo sede Orellana, Ecuador].  
<http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/18641/1/01075.pdf>

McDonald, P., Henderson, A. R., & Heron, S. J. E. (2011). *The Biochemistry of Silage* (2nd ed.). Chalcombe Publications.

Mejía Castillo., H.J. (2019). La morera (*Morus* sp) como alternativa en sistemas silvopastoriles. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*.  
<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/9197/1/3941756006.pdf>

Mejía, D & Reyes, A. (2020). *Exploración para la producción de forraje verde hidropónico de maíz y sorgo para la alimentación de ganado lechero: Revisión de Literatura* [Trabajo de Titulación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras].  
<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/580adc07-0cef-4213-812a-66450d2a742a/content>

Mendoza, G. D., Pérez, J. F., & Ramos, J. J. (2010). Uso de sorgo ensilado en la alimentación de rumiantes: potencial y limitaciones. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 1(1), 1–12.

Mendoza, M. E., & Sánchez, E. (2023). Calidad nutricional de la planta de sorgo negro forrajero (*Sorghum almum*) para alimentación animal. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 80–91. <https://www.redalyc.org/pdf/437/43711212.pdf>

Mertens, D. R. (1994). Regulation of forage intake. In G. C. Fahey (Ed.), *Forage Quality, Evaluation, and Utilization* (pp. 450–493). American Society of Agronomy.

- Mertens, D. R. (1997). *Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows*. Journal of Dairy Science, 80(7), 1463–1481.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2017). *Guía para la fertilización de cultivos en Costa Rica*. Dirección de Investigaciones Agropecuarias (DIA). San José, Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (s.f.). *Sorgo: Sorghum bicolor (Linn.) Moench Gramineae*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658sorgo.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2023). Caracterización de suelos agrícolas de Costa Rica [Archivo PDF]
- MINAE. (2021). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Agropecuario.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía). (2021). Informe nacional de gestión ambiental 2021. Ministerio de Ambiente y Energía. <https://www.minam.go.cr/documentos/informe-gestion-ambiental-2021.pdf>
- Minson, D.J. (1990). Forage in Ruminant Nutrition. Academic Press.
- Mojica, R.J.E., Castro, R.E., Silva, Z.J., Hortúa, C.H., García, L.Q. (2013). Producción y calidad composicional de la leche en función de la alimentación en ganadería doble propósito del Departamento del Cesar CORPOICA. [Archivo PDF]. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1340/Ver\\_Documento\\_1340.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1340/Ver_Documento_1340.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Montes, K. (2012). Evaluación de cuatro híbridos de sorgo forrajero (*Sorghum bicolor* L. Moench) durante la época seca [Tesis de licenciatura, Universidad de Panamá]. Repositorio institucional. [https://up-rid.up.ac.pa/7294/1/katherine\\_montes.pdf](https://up-rid.up.ac.pa/7294/1/katherine_montes.pdf)

- Muck, R. E. (2010). Silage microbiology and its control through additives. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 183–191.
- Mulatu, G. (2023). Sorghum as a Model Crop for Drought Stress Tolerance. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 11(3), 54–65.  
<https://doi.org/10.11648/j.abb.20231103.14>
- Mundial, C. S. A. (2020). Los efectos de la COVID-19 en la seguridad alimentaria y la nutrición: elaboración de respuestas eficaces en materia de políticas para abordar la pandemia del hambre y la malnutrición. *Documento Temático*, 1-22.  
<https://www.fao.org/3/ng808es/ng808es.pdf>
- Muñoz, M., Espinoza, R., Zúñiga, X., Guerrero, A., & Campos, H. (2017). Contabilidad de costos para la gestión administrativa. Universidad Estatal de Milagro – UNEMI.  
<https://repositorio.unemi.edu.ec/handle/123456789/3847>
- Muñoz, D. R., Franco, D. A., & Mendoza, C. L. (2020). Etapas de adquisición de tecnología y conocimiento en el sector ganadero de tipo exportación. *Revista Espacios*, 41(49), 68-75.  
<https://www.revistaespacios.com/a20v41n49/a20v41n49p05.pdf>
- Murgueitio, E., Neves, E., Campos, L., & Jiménez, R. (2025). Manejo sostenible de pastos, forrajes y sistemas silvopastoriles para fortalecer la ganadería en Ecuador. *Latinoamericana de Pastos y Forrajes*, 6(2), artículo 3769.  
<https://doi.org/10.56712/latam.v6i2.3769>
- Murgueitio, E., Calle, Z., Chará, J., & Uribe, F. (2014). Ganadería sostenible en Colombia: contribuciones desde los sistemas silvopastoriles. *Pasturas Tropicales*, 36(1), 12–21.  
<https://www.pasturastropicales.org/downloads/2014-01-ganaderia-sostenible-colombia.pdf>

- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (2001) Nutrient Requirements of Dairy Cattle (7<sup>a</sup> Ed.). National Academy Press, Washington, D.C
- Naula, M. D. R. G., Delgado, I. R., Iglesias, H. I. P., & Unda, S. A. B. (2025). Contenido de micronutrientes en un suelo Inceptisol bajo cultivo de cacao, maíz y bosque. *Polo del Conocimiento*, 10(1), 1987-2006.
- Nava, C., Rosales, R., Jiménez, R., Carrete, F., Domínguez, P., & Murillo, M. (2017). Rendimiento y valor nutricional de tres variedades de sorgo dulce cultivadas en cuatro ambientes de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(2), 123–134.
- Nicholson, C. F., & Black, J. R. (2014). Economic analysis of dairy production systems in the tropics: Methodological issues and implications for decision-making. *Tropical Animal Health and Production*, 46(8), 1461–1468.  
<https://doi.org/10.1007/s11250-014-0686-1>
- NRC (National Research Council). (2001). Nutrient Requirements of Dairy Cattle (7th rev. ed.). National Academies Press.
- Núñez, O. (2017). Los costos de la alimentación en la producción pecuaria. *Journal of the Selva Andina Animal Science*. v.4 n.2. La Paz.  
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2311-25812017000200001&script=sci\\_arctext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2311-25812017000200001&script=sci_arctext)
- Núñez, G., & Cantú, J. E. (2006). Producción, composición química y digestibilidad del forraje de sorgo x sudán. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 1(3), 179–189.  
<https://www.redalyc.org/pdf/613/61338302.pdf>
- Oba, M., & Allen, M. S. (1999). *Effects of brown midrib 3 mutation on the cell wall chemical composition and digestibility of maize and sorghum silages*. *Journal of Dairy Science*, 82(6), 1352–1359.

- OCDE/FAO. (2020). *OCDEFAO Perspectivas Agrícolas 20202029*, OECD Publishing, París. <https://doi.org/10.1787/a0848ac0-es>
- OCLA. (2024). Situación de la Lechería Mundial durante el año 2022. <https://ocla.org.ar/noticias/28687662-situacion-de-la-lecheria-mundial-durante-el-año-2022>
- Orozco, R., & Mendoza, C. (2023). Requerimiento térmico, producción y valor nutritivo de forraje de sorgo en condiciones subtropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(4-A), 521–528. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4A.521>
- Páez, W & Torres, G. (2021). *Análisis de pre-factibilidad como metodología para la óptima planeación en proyectos de obra civil UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA* [Archivo PDF]. <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/4048/00003938.pdf?sequence=4>
- Padilla Doval, J., & Zambrano Arteaga, J. C. (2021). Estructura, propiedades y genética de las caseínas de la leche: una revisión. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 16(3), 62-95.
- Peña, A., González, F., & Robles, F. (2010). Manejo agronómico para incrementar el rendimiento de grano y forraje en híbridos tardíos de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(1), 27-35. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342010000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000100003&lng=es&tlng=es).
- Pereira, M. N., Reis, R. A., & Roth, G. W. (2020). *Silage quality and additives in tropical systems*. *Journal of Dairy Science*, 103(4), 3450–3463. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17025>

- Pérez, A., Quero, A., Escalante, J., Rodríguez, M., Garduño, S., & Miranda, L. (2018). Fenología, biomasa y análisis de crecimiento de cultivares de sorgo forrajero en valles altos. *Agronomía Costarricense*, 42 (2), 107-117. <https://dx.doi.org/10.15517/rac.v42i2.33782>
- Pérez, J. A., & Rodríguez, L. M. (2020). Producción y manejo de sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) en sistemas de producción lechera en zonas semiáridas. *Revista de Agricultura Tropical*, 38(3), 212-225.
- Pérez, L., & Rodríguez, J. (2020). Evaluación agronómica y bromatológica de cultivos anuales para alimentación animal en el trópico seco. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 33(2), 1–14. <https://doi.org/10.17533/udea.rcc.v33n2a01>
- Pérez Rojas, L., & Álvarez Vázquez, P. (2022). Componentes del rendimiento y valor nutricional del ensilaje de dos cultivares de sorgo forrajero. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-uaaan-mx-123456789-48129/Description>
- Pino F, Heinrichs AJ.(2017). Sorghum forage in precision-fed dairy heifer diets. *J Dairy Sci.* 2017 Jan;100(1):224-235. doi: 10.3168/jds.2016-11551. Epub 2016 Oct 27. PMID: 28341043. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28341043/>
- Profertil. (2020). *Fertilización en sorgo* [Archivo PDF]. <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/fertilizacion-en-sorgo.pdf>
- Profertil. (2020). *Fertilización del cultivo de soja* [Archivo PDF]. <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/fertilizacion-del-cultivo-de-soja-1.pdf>
- Programa de Granos Básicos (2018). Cultivo del sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench). CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA Y FORESTAL ENRIQUE ÁLVAREZ CÓRDOVA [Archivo PDF].

[file:///C:/Users/ismel/OneDrive/Escritorio/yuli/Referencias%20bibliograficas/Guia%20Centa\\_Sorgo.pdf](file:///C:/Users/ismel/OneDrive/Escritorio/yuli/Referencias%20bibliograficas/Guia%20Centa_Sorgo.pdf)

Portillo-López, P. A., Meneses-Buitrago, D. H., Lagos-Burbano, E., Duter-Nisivoccia, M. E., & Castro-Rincón, E. (2021). Valor nutritivo de mezclas forrajeras en épocas seca y de lluvias en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 556–572. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.43207>

Pulido, R., & Rodríguez, J. (2018). Diseño de planes forrajeros integrales para sistemas bovinos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 31(2), 245–260.

Ramos, M. A., García, L. J., López, E. A., Sánchez, P. L., & Castro, R. J. (2019). Producción y calidad del sorgo forrajero en diferentes sistemas de siembra en el trópico seco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1321–1334. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1889>

Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999). Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357–363. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030001x>

Reddy, B. V. S., Ramesh, S., Reddy, P. S., & Kumar, A. A. (2021). Sorghum: Climate resilient crop for ensuring food and nutritional security. *Indian Journal of Agronomy*, 66(3), 234–241. <https://doi.org/10.5958/0974-7406.2021.00037.2>

Rendon, J. (2020). *EVALUACIÓN DE DIETAS ALIMENTICIAS SOBRE EL RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE GANADO BOVINO DE CARNE EN LA COMUNA LAS BALSAS* [Trabajo de Titulación, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad]. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5403/1/UPSE-TIA-2020-0014.pdf>

Reuter, D. J., & Robinson, J. B. (1997). *Plant analysis: An interpretation manual* (2nd ed.). CSIRO Publishing.

- Ríos Cando, L.R. (2022). *El ensilaje y henolaje como estrategia de conservación de forraje para la alimentación bovina en época de sequía o presencia de ceniza volcánica* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/16281/1/17T01696.pdf>
- Rios, D. K., Conde, A., & Rios, C. F. (2021). Productividad y sostenibilidad del cultivo de sorgo forrajero como alternativa para la alimentación de rumiantes. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad la Salle*, Vol. 14. No. (56). <https://doi.org/10.26457/recein.v14i56.2807>
- Rodríguez, F., & Gómez, M. (2018). *La nutrición de los cultivos y su relación con la sostenibilidad del suelo*. *Revista de Ciencias Agrarias*, 42(3), 153-164. <https://doi.org/10.31406/rca.v42i3.561>
- Rodríguez, J., Chinchilla, R., & Ugalde, D. (2019). *Manejo integrado de malezas en sistemas agrícolas en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Rodríguez-Molano, C. E., & Pulido-Suárez, N. J. (2018). Determinación del valor nutricional de bloques nutricionales con diferentes porcentajes de *Sambucus peruviana* y *Zea mays*. *Ciencia y Agricultura*, 15(1), 93-100.
- Rodriguez-Carías, A. (2019). Forrajes Conservados Ensilaje PCCMA Honduras [Archivo PDF]. [https://apps.iica.int/pccmca/docs/Minicursos/1.%20Abner%20Rodr%C3%ADguez/Abner\\_Rodr%C3%ADguez-Producci%C3%B3n%20Forrajes%20Conservados%20%20Ensilaje.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://apps.iica.int/pccmca/docs/Minicursos/1.%20Abner%20Rodr%C3%ADguez/Abner_Rodr%C3%ADguez-Producci%C3%B3n%20Forrajes%20Conservados%20%20Ensilaje.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- Rojas, S. (2015). Estudio técnico y financiero a nivel de prefactibilidad para la creación de un restaurante de cocina costeña en la ciudad de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/156049.pdf>

- Rojas, M. (2022). *Análisis del modelo costo-Volumen-Utilidad* [Tesis Doctoral UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS. La Paz – Bolivia]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/28891>
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate risk management*, 16, 145-163. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209631730027X>
- Román, A.R. y Toaquiza, B.E. (2020). Metodología para determinación de costos agropecuarios bajo el sistema de costeo por órdenes de producción: Caso “Centro Agropecuario Experimental de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maña”, año 2019. *Revista Académica y científica VICTEC*, vol.1, 2020. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/572/5722502001/html/index.html>
- Romero, L., & Pérez, J. (2018). Evaluación del comportamiento productivo de tres híbridos de sorgo forrajero en el trópico panameño. *Revista de Investigación Científica*, 12(2), 110–119. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/A50-9259-p124.pdf>
- Rosero, J. (2011). Pastos y forrajes en alimentación del ganado. *Revista tierra adentro*. <http://www.revistatierraadentro.com/index.php/ganaderia/194-pastos-y-forrajes>
- Ruiz-Albarrán, M., Galindo, S., & Hernández, D. (2021). Uso de aditivos en ensilaje: efecto sobre calidad nutricional y fermentativa. *Agrociencia*, 55(2), 123–134.
- Ruiz, J. L. V., & Codero-Ahiman, O. V. (2019). Ensilaje como fuente alterna de alimentación del ganado bovino en la producción lechera. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal*, 3(2), 129-162.
- Sabino-López, J. E., Antúnez-Ocampo, O. MGaleno, C. D. Á. H., & Espinosa-Rodríguez, M. (2023). Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la fertilización con

- nitrógeno, fósforo y silicio al suelo. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1682>
- Sage, R. F. (2004). The evolution of C4 photosynthesis. *New Phytologist*, 161(2), 341-370. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.00974.x>
- Sánchez-Hernández, M.A., Morales-Terán, G., Mendoza-Pedroza, S.I., Hernández-Bautista, J., Fraire-Cordero, S. y Rivas-Jacobo, M.A. (2021). Caracterización productiva de maíces nativos con aptitud forrajera en la cuenca del Papaloapan. *Revista Fitotecnia* 44(4A): 755-764. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/908>
- Sánchez L. A. R. (2021). *Ensilaje de rastrojo de maíz asociado con diferentes niveles de urea y melaza para la alimentación de rumiantes: Caracterización y posicionamiento estratégico* (Tesis doctoral, Universidad de Córdoba). Universidad de Córdoba, UCOPress. <https://helvia.uco.es/handle/10396/21441>
- Sánchez, J. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad: 70 años de pensamiento de la CEPAL*. Libros de la CEPAL, N° 158 (LC/PUB.2019/18-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/1/S1900378\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/1/S1900378_es.pdf)
- Sánchez, L. W. (2022). *Potencial forrajero de variedades costarricenses de maíz: como alternativa para la alimentación del ganado*. [Archivo PDF Boletín técnico INTA]. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/is/v23n47/2215-2458-is-23-47-101.pdf>
- Sánchez Otero, D. (2025). Efecto de los granos húmedos de cervecería sobre los parámetros de fermentación ruminal y composición química de la leche.
- Sánchez Ledezma, W. (2018). Potencial de los forrajes para producir ensilaje de calidad. *Alcances Tecnológicos*, 12(1), 49–58. <https://doi.org/10.35486/at.v12i1.37>

- Sánchez, M. J., & Zeledón, C. E. (2019). Efecto del estadio de desarrollo y tamaño de partícula de picado sobre la composición química del ensilaje de Sorgo Sureño (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2019).
- Santamaría, A.A. y Martínez, N.Y. (2024). VALOR NUTRICIONAL DEL ENSILADO DE MAÍZ Y SORGO DULCE CON DIFERENTES PROPORCIONES DE SOYA FORRAJERA Y SU EVALUACIÓN SIMULADA EN EL DESEMPEÑO PRODUCTIVO DE BOVINOS DE CARNE [Tesis de grado, Universidad de Panamá]. [https://up-rid.up.ac.pa/9016/1/amy\\_santamaria.pdf](https://up-rid.up.ac.pa/9016/1/amy_santamaria.pdf)
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA). (2025). Estimación producción de leche en Costa Rica 2017-2025 (Informe SEPSA-INF-2025-006). [https://infoagro.go.cr/wp-content/uploads/2025/04/SEPSA-INF-2025-006\\_Estimacion\\_Produccion\\_Leche\\_CR\\_2025.pdf](https://infoagro.go.cr/wp-content/uploads/2025/04/SEPSA-INF-2025-006_Estimacion_Produccion_Leche_CR_2025.pdf)
- Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). (2023). *Listado de productos autorizados para uso agrícola en Costa Rica*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado de: <https://www.sfe.go.cr>
- Seven P, Seven I, Iflazoglu S, Nur E. (2021). *Uso de aditivos para ensilaje para mejorar la calidad de la fermentación del ensilado de alfalfa: Una revisión*. Ciencias Animales y Veterinarias , 9 (6), 175-180. <https://doi.org/10.11648/j.avs.20210906.13>
- Silva, T. C., Daniel, J. L. P., & Zopollatto, M. (2020). Losses and quality of silage stored in bags: A review. *Grass and Forage Science*, 75(2), 124–133. <https://doi.org/10.1111/gfs.12427>
- Silva, J. R., Freitas, A. S., & Souza, A. (2020). Evaluación química y microbiológica del ensilaje de pastos tropicales. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 49(e20200006), 1–9. <https://doi.org/10.37496/rbz4920200006>

- Sima Obiang, C., Ondo, J. P., Mba, T. N., Herman, B., Misso, R. L. N., Abogho, J. M., & Engonga, L. C. O. (2023). In vitro study of the nutritional and pharmacological contribution of Pennisetum purpureum leaves: Natural food used by guinea pig breeders in Gabon. *International Journal of Biosciences*, 23(4), 17–27. <http://www.innspub.net/wp-content/uploads/2023/10/IJB-V23-No4-p17-27.pdf>
- Solórzano, J., Barboza, D., Vásquez, P. & Paniagua, J. (2022). Optimización del costo de alimentación para ganado de engorde en Guanacaste, Costa Rica. *Revista e-Agronegocios*, 8(1). <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/eagronegocios/article/view/5654>
- Solórzano, J., Barboza, D., Vásquez, P. & Paniagua, J. (2023). Optimización del costo de alimentación para ganado de engorde en Guanacaste, Costa Rica. *Revista e-Agronegocios*, 8(1). <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/eagronegocios/article/view/5654>
- Solís, L., Meneses, G., & Villacrés, J. (2022). Aporte energético de especies forrajeras para producción de ganado bovino de doble propósito. *Archivos de zootecnia*, 71(274), 76-82. <http://uco.edu.es/ucopress/az/index.php/az/article/view/5650>
- Soto, L., Jiménez, E., & Ramírez, M. (2019). Efecto del manejo agronómico sobre la calidad nutritiva de pastos tropicales en sistemas duales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 153-164. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol20\\_num3\\_art:542](https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num3_art:542)
- Sosa-Montes, E., Sánchez-Sánchez, Z. S., Mendoza-Pedroza, S. I., Ramírez-Bribiesca, E., González-Cerón, F., & Huerta, H. V. (2022). Composición química de cuatro gramíneas forrajeras del estado de Jalisco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(7), 1315-1322.
- Souza, B. F., de Oliveira, J. S., dos Santos, L. P., & Fernandes, J. J. R. (2020). Biomass production and nutritional value of dual-purpose sorghum hybrids. *Revista*

Brasileira de Saúde e Produção Animal, 21, e013020.  
[https://doi.org/10.1590/1983-084x/20\\_13020](https://doi.org/10.1590/1983-084x/20_13020)

Souza, V. A. O. de, Siqueira, G. R., Gontijo Neto, M. M., da Silva, L. V., Lacerda, L. L. V., & de Freitas, A. R. (2020). Potential of forage sorghum as a silage for animal feeding. *Research, Society and Development*, 9(8), e167985392.  
<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5392>

St-Pierre, N. R., & Weiss, W. P. (2019). Design and analysis of continuous and crossover feeding trials in dairy nutrition. *Journal of Dairy Science*, 102(7), 5701–5713.  
<https://doi.org/10.3168/jds.2018-16022>

Tapia, M., Granizo, S., & Granizo, L. (2017): “Estudio de pre-factibilidad de proyectos sociales y productivos”, *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*.  
<http://www.eumed.net/rev/caribe/2017/01/pre-factibilidad.html>

Tavares, Q. G., Carvalho, W. T. V., Pereira, R. V. G., Minighin, D. C., Silva, L. V., de Carvalho, C. A. O., ... & de Melo, N. N. (2019). Avaliação nutricional das silagens de milho e sorgo inoculadas com *Lactobacillus plantarum*. *Pubvet*, 14, 139.

Teixeira, M. A., et al. (2018). Características bromatológicas y producción de materia seca de híbridos de sorgo forrajero en condiciones de clima tropical. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 47. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902018000800007>

Teagasc – Agriculture and Food Development Authority. (2024). Forage Maize Cost Analysis 2024. Oak Park, Carlow, Ireland.  
<https://teagasc.ie/wp-content/uploads/media/website/crops/crops/Crop-Costs-and>Returns-2024-Final.pdf>

Troncoso, H. A. (2014). *Producción de leche y biosíntesis*. Entorno Ganadero N° 44. BM Editores. \*Depto. de Nutrición Animal y Bioquímica, FMVZ, UNAM. [Archivo PDF].

[https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_bovina\\_de\\_leche/leche\\_subproductos/59-Produccion\\_Leche\\_y\\_Biosintesis.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/leche_subproductos/59-Produccion_Leche_y_Biosintesis.pdf)

Tobía, C., Rojas, A., Villalobos, E., Soto, H., & Uribe, L. (2004). Sustitución parcial del alimento balanceado por ensilaje de soya y su efecto en la producción y calidad de la leche de vaca, en el trópico húmedo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(2), 27-35. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43628203.pdf>

Tobía, C., & Villalobos, E. (2004). Producción y valor nutricional del forraje de soya en condiciones tropicales adversas. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 17-25. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43628102.pdf>

Tobía, C., Villalobos, E., Rojas, A., Soto, H., & Moore, K. J. (2008). Nutritional value of soybean (*Glycine max* L. Merr.) silage fermented with molasses and inoculated with *Lactobacillus brevis* 3. *Livestock Research for Rural Development*, 20(7), 1-9. <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd20/7/tobi20106.htm>

Tobía, C., Villalobos, E. y Rico, E. (2006). Uso del forraje de soya (*Glycine max* L. Merr.) variedad CIGRAS 06 en la nutrición de los rumiantes. *Seminario de Pastos y Forrajes*, 77 Universidad Centro-Occidental "Lisandro Alvarado", Barquisimeto, Venezuela, 77-86. [https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Villalobos-3/publication/228602149\\_USO\\_DEL\\_FORRAJE\\_DE\\_SOYA\\_Glycine\\_max\\_L\\_Merr\\_VARIEDAD\\_CIGRAS\\_06\\_EN\\_LA\\_NUTRICION\\_DE\\_LOS\\_RUMIANTES/links/0c960522612028465d00000/USO-DEL-FORRAJE-DE-SOYA-Glycine-max-L-Merr-VARIEDAD-CIGRAS-06-EN-LA-NUTRICION-DE-LOS-RUMIANTES.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Villalobos-3/publication/228602149_USO_DEL_FORRAJE_DE_SOYA_Glycine_max_L_Merr_VARIEDAD_CIGRAS_06_EN_LA_NUTRICION_DE_LOS_RUMIANTES/links/0c960522612028465d00000/USO-DEL-FORRAJE-DE-SOYA-Glycine-max-L-Merr-VARIEDAD-CIGRAS-06-EN-LA-NUTRICION-DE-LOS-RUMIANTES.pdf)

Tobón-Ramírez, C. (2019). *Evaluación del uso de forrajes conservados en vacas para la producción de leche en el municipio de Guatavita (Cundinamarca)* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75833>

- Torres, J. H. (2020). Comparación de tres tipos de ensilaje (maíz, sorgo, y caña de azúcar) en la producción de leche: Revisión de literatura. *Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano* Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6828/1/CPA-2020-T106.pdf>
- Tosquy, O. H., Esqueda, V. A., Zetina, R., & Ascencio, G. (2010). Densidad y distancia de siembra en dos variedades de soya de temporal en Veracruz, México. *Agronomía mesoamericana*, 21(1), 63-72. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-13212010000100007&script=sci\\_arttext&tlng=en](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-13212010000100007&script=sci_arttext&tlng=en)
- Trujillo, I. (2021). Estudio de prefactibilidad de creación de una compañía de consultoría en logística. UNIVERSIDAD EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/29964>
- Universidad de Costa Rica. (7 de noviembre de 2019). El uso eficiente de pastos aumentará la competitividad del sector lechero [Entrada de blog]. UCR Noticias. Recuperado de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/11/07/el-uso-eficiente-de-pastos-aumentara-la-competitividad-del-sector-lechero/>
- Utah State University Extension. (2020). Converting Feed Prices to Dry Matter Basis. Logan, UT.
- Valerio, D., Soto, Y., Matos, F., Perea, J., Acero, R., & García, A. (2010). Estudio técnico-económico de dos leguminosas forrajeras tropicales en la alimentación del vacuno lechero en la República Dominicana [Tesis doctoral, Universidad de Córdoba]. Helvia. <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/2876>
- Van Saun, R.J. (2022). Necesidades nutricionales del ganado lechero, Manual de MSD Manual de veterinaria.

<https://www.msdsvetmanual.com/es/manejo-y-nutrici%C3%B3n/nutrici%C3%B3n-ganado-vacuno-lechero/necesidades-nutricionales-d-el-ganado-vacuno-lechero>

Van Soest, P. J. (1994). Nutritional ecology of the ruminant (2nd ed.). Cornell University Press.

Van Soest, P.J. Robertson, J.B. (1985). Analysis of forages and fibrous feeds. *Cornell University. Ithaca, NY.*

Van Soest, P.V., J.B. Robertson, y B.A. Lewis. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10): 3583 - 3597. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030291785512>

Van Soest, P. J., Van Amburgh, M. E., Robertson, J. B., & Knaus, W. F. (2005). Validation of the 2.4 times lignin factor for ultimate extent of NDF digestion, and curve peeling rate of fermentation curves into pools. *In Proceedings of the Cornell Nutritional Conference for Feed Manufacturers. Cornell University, Ithaca, NY, USA* (pp. 139-149). <https://www.nutritionmodels.com/papers/VanSoestetatCNC2005139.pdf>

Vargas Rodríguez, CF. (2005). Valoración nutricional y degradabilidad ruminal de genotipos de sorgo forrajero (*Sorghum* sp). *Agronomía Mesoamericana*, 16 (2), 215-223. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43716211>

Vargas, P., Castro, L., & Palma, R. (2005). Digestibilidad in vitro de la materia seca y parámetros bromatológicos de sorgo forrajero. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 38-47. [https://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v16n02\\_215.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_meso/v16n02_215.pdf)

Vargas Armuelles, A. (2012). Evaluación de tres raciones para la finalización de bovinos de engorde en confinamiento utilizando urea protegida, concentrado y ensilado de maíz (Doctoral dissertation, Universidad de Panamá).

- Vera Silva, J. E. (2022). *Heno de avena forrajera (Avena sativa), como alternativa para la alimentación de ganado en épocas de sequía en la Sierra Piurana* [Trabajo de Investigación, Universidad Nacional de Piura, Perú]. <https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12676/4369/ZOOT-VER-SIL-2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villalobos Villalobos, L., Arce-Cordero, J. A., & WingChing-Jones, R. (2015). *Costos de producción de ensilados de pastos tropicales elaborados en lecherías de Costa Rica*. *Revista de Ciencias Pecuarias*, 9(2), 1–12. <https://doi.org/10.15517/nat.v9i2.21462>
- Villalobos, L. (2019). *El uso eficiente de pastos aumentará la competitividad del sector lechero* [Entrada de blog]. UCR Noticias. *Revista Universidad de Costa Rica*. (7 de noviembre de 2019). Recuperado de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/11/07/el-uso-eficiente-de-pastos-aumentara-la-competitividad-del-sector-lechero/>
- Villalobos, E., y Camacho, F. (1999). Avances en el Mejoramiento Genético de la Soya en Costa Rica. II. CIGRAS-06 y CIGRAS-10, dos nuevas variedades tropicales. *Agronomía Costarricense*, 23(1):61-67. [https://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v23n01\\_061.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_agr/v23n01_061.pdf)
- Villalobos, E., & Camacho, F. (2003). Registration of CIGARS-06 soybean. (Registrations Of Cultivars). *Crop Science*, 43(3), 1122-1123.
- Villalobos, E., Subirós, F., Tobía, C., & Bogantes, D. (2005). Para qué la alfalfa si tenemos la soya. *Centro de investigaciones en granos y semillas (Cigras), Universidad de Costa Rica UCR*.
- Von Caemmerer, S. (2000). *Biochemical models of leaf photosynthesis*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1071/9780643063516>

- Wallau, M., Mailhos, M., Vendramini, J., Adesogan, A.T., Vyas, D. and Korus, K. (2025). Silage Crops for Dairy and Beef Cattle II: Sorghum and Other Forage Crops. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AA269>
- WingChing-Jones, R., & Mora-Chaves, E. (2013). Composición de la leche entera cruda de bovinos antes y después del filtrado. *AGRONOMÍA MESOAMERICANA* 24(1):203-207. 2013. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v24n1/a19v24n1.pdf>
- Wilkinson, J. M., & Davies, D. R. (2013). The aerobic stability of silage: Key findings and recent developments. *Grass and Forage Science*, 68(3), 307-322. <https://doi.org/10.1111/gfs.12024>
- Weiss, W. P. (1994). Estimating digestibility of forages by animal and laboratory methods. In Fahey, G. C. Jr. (Ed.), *Forage Quality, Evaluation, and Utilization* (pp. 644–681). ASA, CSSA, and SSSA.
- Weinberg, Z. G., & Muck, R. E. (1996). New trends and opportunities in the development and use of inoculants for silage. *FEMS Microbiology Reviews*, 19(1), 53–68. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1996.tb00297.x>
- Wellek, S., & Blettner, M. (2020). On the proper use of the crossover design in clinical trials: Part 18 of a series on evaluation of scientific publications. *Deutsches Ärzteblatt International*, 117(35–36), 561–567. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2020.0561>
- World Dairy Situation. (2024). World Dairy Situation Report. <https://fil-idf.org/world-dairy-situation-report-2021-2/>
- Zambrano, J. (2023). Evaluación del comportamiento morfológico y rendimiento del Sorgo forrajero (*Sorghum Vulgare*) en el centro de gestión, innovación y transferencia de conocimiento "Finca Tigrillo" de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí,

2022. [Tesis de pregrado, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí]. Repositorio ULEAM. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/4701>

Zerbato, C., Santos, F., & Oliveira, R. (2022). Adaptación del sorgo forrajero y su rendimiento en suelos marginales y salinos. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 17(2), 1032–1045.

Zheng, Y., Xu, H., & Zhang, J. (2021). Statistical considerations for cross-over trials in animal nutrition studies. *Animal Feed Science and Technology*, 279, 115036. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115036>

## ANEXOS

### **Análisis de suelo y plan de fertilización**

El análisis de suelos realizado en las parcelas de maíz y soya en la finca La Josefina reveló variaciones relevantes en las condiciones edáficas que justificaron un ajuste diferencial en los planes de fertilización. El pH del suelo osciló entre 5,9 (ligemente ácido) en la parcela de maíz. Los niveles de fósforo disponible (P) mostraron una marcada heterogeneidad, bajos en el maíz (9,8 kg/ha), lo que fundamentó el uso de fertilizantes de arranque con alto contenido de  $P_2O_5$  (cómo la fórmula 18-46-0) en este último. Asimismo, las concentraciones de potasio intercambiable (K) 124,8 kg/ha en soya, lo cual fue decisivo para ajustar la fertilización potásica durante el desarrollo de los cultivos.

Con base en estos resultados (ver Anexo 1. Análisis de suelo de las parcelas establecidas con las especies forrajeras), se diseñaron planes de fertilización diferenciados para cada cultivo, priorizando la sincronización entre la oferta de nutrientes y las fases fenológicas críticas. El uso de fertilizantes foliares quelatados se recomendó particularmente para

cultivos como la soya y el maíz, donde el pH ácido y los niveles moderados de micronutrientes podrían limitar la absorción en fases tempranas del desarrollo.

**Anexo 1.**

*Análisis de suelo de las parcelas establecidas con las especies forrajeras.*

<b>Análisis</b>	<b>Unidades</b>	<b>Maíz</b>	<b>Soya</b>
pH	UpH	5,9	6,5
Conductividad eléctrica	ms/cm	0,018	0,028
Carbono total	%	1,5	1,7
Nitrógeno total	%	0,16	0,18
Acidez	cmol/l	0,090	0,091
Calcio	kg/ha	3 600	5 200
Magnesio	kg/ha	840	1 080
Potasio	kg/ha	265,2	124,8
CICE	cmol(+)/l	-	18
Fósforo	kg/ha	9,8	52
Cobre	kg/ha	10,8	8,2
Zinc	kg/ha	5,4	3,2
Manganeso	kg/ha	14,4	16,4
Hierro	kg/ha	276	108
Sat acid	%	0,7	0,5
Sat Ca	%	71	73
Sat Mg	%	26	25
Sat K	%	2,6	1
Ca/Mg	NA	2,7	2,9
Ca/K	NA	28	81
Ca+Mg/K	NA	38	109

## **Anexo 2. Plan de fertilización Soya**

A partir de los resultados del análisis de suelo (ver Anexo 1) y los requerimientos nutricionales del cultivo de soya, se elaboró un plan de fertilización adaptado a las condiciones edáficas del lote experimental. Este plan tuvo como objetivo garantizar una oferta adecuada de nitrógeno (N), fósforo ( $P_2O_5$ ) y potasio ( $K_2O$ ), así como suplir micronutrientes esenciales en momentos críticos del desarrollo del cultivo.

Durante la siembra (DDS 0), se aplicó una fórmula 10-30-10 a razón de 45 kg/ha, equivalente a 4,5 kg/ha de N, 13,5 kg/ha de  $P_2O_5$  y 4,5 kg/ha de  $K_2O$ , mediante aplicación en banda. En la etapa de desarrollo de trifolios (DDS 20–30), se realizaron dos aplicaciones: una con fertilizante 26-0-26 (45 kg/ha, equivalente a 11,7 kg/ha de N y 11,7 kg/ha de  $K_2O$ ), y otra con urea granulada al 46% (180 kg/ha), aportando 82,8 kg/ha adicionales de nitrógeno. En la etapa de floración (DDS 40–45), se repitió la aplicación de urea al 46% con la misma dosis (180 kg/ha), con el fin de sostener la demanda nitrogenada en el periodo de mayor crecimiento vegetativo y formación de vainas.

Para mejorar la eficiencia nutricional, se recomendó el uso complementario de fertilización foliar con micronutrientes quelatados, especialmente zinc (Zn) y manganeso (Mn), a una dosis sugerida de 3 kg/ha, aplicados en la fase V4–R1 (25–35 días después de la siembra). Esta práctica busca optimizar la expansión foliar, el desarrollo radicular y la actividad fotosintética en etapas clave del establecimiento del rendimiento.

El anexo 3 sintetiza los aportes totales de nutrientes por hectárea y la cobertura estimada respecto a los requerimientos del cultivo, considerando tanto las fuentes químicas aplicadas como el aporte adicional del compost incorporado.

## **Anexo 3.**

### ***Balance nutricional del cultivo de soya Cigras 06.***

---

<b>Nutriente</b>	<b>Aporte total (kg/ha)</b>
------------------	-----------------------------

---

---

N	181 (fertilizantes) + 18,8 (compost) = 200 kg / ha
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	13,5 kg + (extracción del suelo) = 55
K <sub>2</sub> O	16,2 + (reservas del suelo) = 135

---

Para los microelementos se recomienda la aplicación fertilizante foliar de micronutrientes quelatados que garantizan una rápida absorción y movilidad dentro de la planta. Por ejemplo en el caso del Zn y Mn, la dosis sugerida es de 3 kg/ha. Esta aplicación debe realizarse en la etapa vegetativa V4–R1, correspondiente a los 25–35 días después de la siembra, periodo en el cual el cultivo es especialmente sensible a deficiencias de Zn y Mn. La aplicación oportuna contribuye a un desarrollo radicular vigoroso, mayor expansión foliar y una mejor eficiencia fotosintética, lo que favorece el establecimiento del rendimiento potencial del maíz forrajero.

#### **Anexo 4. Plan de fertilización Maíz**

El plan de fertilización propuesto para el cultivo de maíz forrajero EJM\_blanco se formuló con base en los resultados del análisis de suelo y en los requerimientos nutricionales específicos para alcanzar un rendimiento estimado de 40 t/ha de forraje verde. Las condiciones edáficas en el sitio experimental, caracterizadas por un pH ligeramente ácido (5,9), una moderada disponibilidad de fósforo (9.8 kg/ha) y un contenido alto de potasio intercambiable (306 kg/ha), determinaron las decisiones sobre el tipo y cantidad de fertilizante a aplicar.

Durante la siembra (Día Después de Siembra – DDS 0), se aplicó en banda la fórmula 18-46-0 a una dosis de 135 kg/ha, lo que representa un aporte de 24,3 kg/ha de nitrógeno (N) y 62,1 kg/ha de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Esta misma fórmula y dosis se repitió durante la etapa

de macollaje (DDS 20–25), con el objetivo de reforzar la disponibilidad de fósforo durante el desarrollo vegetativo temprano del cultivo.

En la etapa de floración (DDS 40–45), se realizó una aplicación de urea granulada al 46%, también a una dosis de 135 kg/ha, equivalente a un aporte de 62,1 kg/ha de nitrógeno (N), para satisfacer el pico de demanda de este nutriente durante el llenado de grano y formación de biomasa.

En cuanto al potasio ( $K_2O$ ), no se aplicó fertilizante potásico adicional, dado que el análisis de suelo mostró una disponibilidad superior a los niveles críticos requeridos por el cultivo. Por lo tanto, se asumió que las reservas edáficas eran suficientes para cubrir las necesidades de este macronutriente durante el ciclo de crecimiento.

Finalmente, para asegurar un óptimo desarrollo del cultivo y corregir posibles deficiencias de micronutrientes, se recomendó la aplicación foliar de elementos quelatados como zinc (Zn) y manganeso (Mn), especialmente durante la etapa V5–V6. En esta fase, el maíz presenta alta sensibilidad a la deficiencia de estos micronutrientes, y su suplementación mejora el desarrollo radicular, la fotosíntesis y, en consecuencia, el rendimiento forrajero.

El resumen del plan nutricional aplicado para el cultivo de maíz EJM\_blanco se presenta en el anexo 5. que detalla las fuentes utilizadas, las dosis aplicadas, y el aporte estimado de nutrientes por ha.

#### **Anexo 5.**

##### *Balance nutricional del cultivo de maíz EJM blanco.*

<b>Nutriente</b>	<b>Aporte total (kg/ha)</b>
N	110,7 (fertilizantes)
$P_2O_5$	124,2 fertilizante
$K_2O$	Extracción del suelo (306 kg/ha)

Para los microelementos se recomienda la aplicación fertilizante foliar de micronutrientes quelatados que garantizan una rápida absorción y movilidad dentro de la planta. Por ejemplo en el caso del Zn y Mn, la dosis sugerida es de 3 kg/ha. Esta aplicación debe realizarse en la etapa vegetativa V5–V6, correspondiente a los 20–25 días después de la siembra, periodo en el cual el cultivo es especialmente sensible a deficiencias de Zn y Mn. La aplicación oportuna contribuye a un desarrollo radicular vigoroso, mayor expansión foliar y una mejor eficiencia fotosintética, lo que favorece el establecimiento del rendimiento potencial del maíz forrajero.

#### **Anexo 6.** *Establecimiento y manejo de los cultivos*

El proceso de intercambio de saberes entre actores locales y técnicos permitió la adecuación de protocolos de manejo adaptados a las condiciones específicas de los sitios de estudio (véase Anexo 7). Los resultados demuestran que las especies evaluadas poseen un alto potencial para integrarse en sistemas de producción ganadera, evidenciado por su perfil nutricional óptimo, capacidad de adaptación a condiciones edafoclimáticas variables y resistencia al estrés hídrico mediante mecanismos eficientes de rebrote. Estas características las posicionan como alternativas viables para fortalecer la resiliencia de los sistemas agropecuarios frente a escenarios climáticos adversos (Demanet y Canales, 2020).

Los protocolos realizados se dividieron en 4 secciones: preparación del terreno, siembra, mantenimiento (fertilización, manejo de plagas, enfermedades) y cosecha, las cuales se describen a continuación:

- Preparación del terreno

El uso del arado permitió romper la capa superficial compactada del suelo, mejorando la aireación y facilitando el desarrollo del sistema radicular de las plantas. Posteriormente, los pases de rastra contribuyeron a afinar el suelo, eliminar malezas iniciales y nivelar la

superficie, lo cual favorece una distribución uniforme de las semillas y una emergencia más homogénea del cultivo (INTA, 2020; FAO, 2014).

- Siembra

En el caso del maíz cv. EJN\_blanco se utilizó una densidad de 80.000 plantas/ha con una distribución de 0,75 m entre hileras de y 0,15 m entre plantas, debido a problemas de calibración en la sembradora lo que también impactó el rendimiento por hectárea del maíz (INTA, 2019; Peña et al., 2010).

En el caso de la soya CIGRAS 06 se adoptaron las recomendaciones de (Villalobos & Camacho, 2003; Tobía et al., 2006) a las condiciones de la Región Chorotega, la cual presenta excelentes características para su uso como forraje con una germinación del 82%. La semilla se inoculó con *Bradyrhizobium japonicum* y fueron tratadas con un insecticida con los ingredientes activos de *imidacloprid* y *deltametrina* . Se realizó una siembra manual debido a que no se contaba con un disco especializado para el diámetro de la semilla, con una densidad de 150,000 semillas/ha utilizando una distancia entre hileras de 0,75 y entre plantas de 0,05-0,10 m, garantizando entre 10 a 12 plantas por metro lineal con una densidad baja y a una profundidad de 0,03-0,02m (Tobía et al., 2006).

- Mantenimiento

Para el establecimiento del cultivo de maíz, se recomienda aplicar fertilizaciones con dosis altas de nitrógeno y medias de fósforo y potasio (Espinoza, 2023; INTA, 2017). En el establecimiento del cultivo de maíz, se detectaron deficiencias de fósforo en las plantas, lo que afecta directamente el rendimiento. La recomendación de fertilización fue de 60 kg/ha de fósforo, lo que corresponde a una fertilización media de este nutriente. Sin embargo, es importante señalar que la fijación y disponibilidad del fósforo varía a nivel nacional según la textura del suelo. Por esta razón, es posible que el fósforo aplicado no sea suficiente o no sea fijado correctamente al suelo, provocando deficiencias en este elemento (INTA, 2017; Sabino et al., 2023).

Para el manejo integrado de arvenses y plagas en los cultivos, se realizó una revisión de literatura enfocada en identificar productos registrados por el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) de Costa Rica, complementada con recomendaciones de productores locales, el equipo técnico del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y académicos especializados. Esta estrategia buscó conciliar el uso de productos eficaces con criterios de sostenibilidad, seguridad ambiental y pertinencia local (Demagnet y Canales 2020).

Se recomienda realizar un manejo de arvenses con preemergentes como la atrazina y metolaclor y post emergencia atrazina+dicamba (Demagnet y Canales 2020), en el caso del INTA (2020) se recomienda pendimetalina como preemergente y postemergente, en conjunto con un manejo manual.

El manejo de plagas en los tres cultivos se abordó bajo un enfoque de manejo integrado, priorizando el uso de productos biológicos y prácticas preventivas. En maíz, se aplicaron *Trichoderma* spp. y *Bacillus thuringiensis* de forma preventiva, debido a la baja incidencia de plagas durante el ciclo de cultivo, sin embargo hubo presencia de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) principalmente. En soya, se presentó no hubo relevancia en incidencia de plagas, solamente del garrobo (*Ctenosaura similis*) por lo que el manejo de estos no puede ser por insecticidas ni otros productos químicos, la aplicación de insecticida fue preventivo aproximadamente a los 35 días después de la siembra (dds), por lo que también se aplicó una *deltametrina* en dosis similares.

Es importante mencionar que la ausencia de aplicación de fungicidas como controladores se debió a aplicaciones preventivas con fungicida de ingrediente activo como Azoxystrobin. por lo que repercutió en baja incidencia de estos organismos en la plantación, dentro del umbral económico no presentaron significancia.

- Cosecha

La cosecha se realizó cuando los cultivos alcanzaron su punto óptimo de aprovechamiento forrajero. En el caso del sorgo el maíz (EJN\_blanco) y la soya (Cigras 06) se cosecharon a los 90 dds. Este momento fenológico coincide con la fase de grano lechoso, considerada ideal para la cosecha de forraje, ya que permite un mayor aprovechamiento nutricional de la biomasa (Martínez et al., 2017), especialmente en sistemas de alimentación animal.

Se realizó un análisis del rendimiento por hectárea en las parcelas establecidas en la Finca La Josefina, la metodología empleada para realizar el rendimiento de biomasa fue un muestreo aleatorio simple dando como resultado un rendimiento de 3,9 kg por metro lineal de maíz EJN\_blanco y 12,2 ton/ha de soya Cigras06.

**Anexo 7. Protocolos de manejo agronómico de sorgo, maíz y soya.**

	<b>Maíz</b>	<b>Soya</b>
<b>Preparación del terreno</b>		
	Rastra 1	1
<b>Siembra</b>		
	Semilla kg/ha 18	18
Densidad de siembra	0,75 m entre hileras 0,15 entre plantas	0,75 m entre hileras 0,05-0,10 entre plantas
<b>Mantenimiento</b>		
	1er fertilización 18-46-0 + urea	10-30-10
	2da fertilización urea	26-0-26 + urea
	3ra fertilización urea + foliar	urea + foliar
Herbicidas pre-emergentes	pendimetalina (2–3 L/ha) + atrazina (1.5–3 kg/ha)	pendimetalina (3 L/ha) + linuron (1 L/ha)
Herbicidas post-emergentes	Paraquat ( 1,5-3L/ha) o 2-4D (1L/ha)	Fluazifop-P-butyl (1 L/ha) y Fomesafen (0.75 L/ha)

Trichoderma spp. y      deltametrina (75–100  
Insecticida Bacillus thuringiensis      ml/ha)

### Cosecha

Cosecha del material      90 días      90 días

---

### Costos de establecimiento hasta cosecha de maíz y soya

Con el objetivo de valorar económicamente la producción de forrajes utilizados en la suplementación animal, se calcularon los costos de establecimiento hasta la cosecha de maíz (*Zea mays* v. EJM\_blanco) y soya (*Glycine max* cv. Cigras06) (Anexo 8), cultivados en Jicaral, Puntarenas, durante el año 2024. La estimación incluye los costos asociados a preparación del terreno, insumos, fertilización, control de malezas, manejo sanitario y cosecha, con base en registros de campo y precios locales vigentes al momento del estudio. El anexo 10 presenta el detalle desglosado de estos costos/ha para cada cultivo, los cuales constituyen la base para el análisis de eficiencia técnica y económica de la suplementación propuesta en esta investigación.

**Anexo 8.** *Detalle de los costos de establecimiento hasta la cosecha de maíz y soya. Jicaral, Puntarenas, Costa Rica, 2025.*

	Maíz			Soya		
	u./ha	\$/u.	\$/ha	u./ha	\$/u.	\$/ha
<b>Preparación del terreno</b>			<b>111,66</b>			<b>117,17</b>
Quema química	3 lt	11,5	34,49	3	11,5	34,49
Rastra	1	68,9	68,9	1	68,9	68,9
Mano de obra	0,3	27,5 6	8,27	0,5	27,56	13,78
<b>Siembra</b>			<b>410,54</b>			<b>362,87</b>
Semilla	20 kg	3,81	76,2	15 kg	6,89	103,35
Fungicida	100 ml	7,28	7,28	100 ml	7,28	7,28
Siembra máquina	1	68,9	68,9	-	-	-
Siembra a mano	-	-	-	2	24,56	55,12
Sellos	3 lt	17,2 6	51,79	3 lt	17,26	51,79

	2 kg	8,98	35,91	1 lt	42,55	42,55
Fertilizante	3 qq	49,4 7	148,41	2 qq	37,81	75,22
Mano de obra	0,8	27,5 6	22,05	1	27,56	27,56
<b>Mantenimiento</b>			<b>473,06</b>			<b>599,25</b>
	3 qq	49,4 7	148,41	1 qq	33,85	33,85
Fertilizantes	3 qq	33,5	100,51	8 qq	33,5	268,03
	3 lt	10,2 4	30,71	3 lt	10,24	30,71
Post emergentes	2 lt	5,68	11,36	1 lt	49,79	49,79
				1 lt	34,8	34,8
Insecticidas	100 ml	7,22	7,22	100 ml	7,22	7,22
	125 ml	33,1 1	33,11	125 ml	33,11	33,11
Mano de obra	3	27,5 6	82,68	3	27,26	82,68
Fletes	2	29,5 3	59,06	2	29,53	59,06
<b>Costo total \$USD/ha</b>			<b>995,26</b>			<b>1.079,2 9</b>



## Anexo 9.

Balances nutricionales elaborados en cada tratamiento para las vacas en estudio, con un promedio productivo de 10 kg de leche en el software Spartan Dairy 3.

Spartan Dairy 3 - [ Dairy Ration: Ración Finca.sdr1]

File Feeds Animal Ration Reports Settings Tabs Window Help



Baja : 100 Midsize breed, Lactating cows, Lac:2, Wt:447 kg, DIM:150, MPD:8.0 kg, MFat:3.8%, DG:0.22 kg/day, DMI:12.2 kg

Feed name	Amount DM kg	As Fed kg	DM %	Group AsFed kg	%Diet %DMI	EINDF %DM	NEL Mcal/kg	ME Mcal/kg	NDF %DM	CP %DM	RUP %CP	MP	RUP dig %RUP	FA %DM	Ca %DM	P %DM	Na %DM	DCAD meq/100g	Se ppm	Vit E IU/kg	Cost DM \$/kg
Silaje de Sorgo	0.00	0.00	23.40	0.0	0.00	65.0	1.20	1.97	65.0	7.2	20		70	2.2	0.28	0.26	0.01	14.8	0.00	0	0.113
Agua	0.00	0.00	0.01	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	0.000
Pasto Braquiaria	0.00	0.00	38.37	0.0	0.00	70.0	0.81	1.43	70.0	2.8	31		65	1.0	0.30	0.20	0.14	2.9	0.00	0	0.129
Limestone	0.05	0.05	99.00	5.0	0.40	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	36.00	0.02	0.06	2.3	0.00	0	0.156
Salt-white	0.10	0.10	99.00	10.0	0.81	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	0.00	0.00	39.00	-22.7	0.00	0	0.134
Minerales	0.10	0.10	99.00	10.0	0.80	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	16.00	12.30	0.00	-125.0	80.00	3500	1.745
Urea	0.12	0.12	97.00	12.0	0.95	0.0	0.00	0.00	0.0	286.0	0		0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	5.682
Harina de Soya 48%	0.88	1.00	88.00	100.0	7.19	2.5	1.90	2.98	9.8	46.5	47		95	0.5	0.35	0.70	0.03	34.9	0.00	0	0.251
Molasses, sugarcane	1.19	1.60	74.30	160.0	9.71	0.0	1.77	2.79	0.4	4.0	17		100	0.0	1.00	0.10	0.22	82.7	0.00	0	0.297
Maiz molido	1.74	2.00	87.00	200.0	14.22	2.4	1.96	3.04	9.5	7.3	50		90	3.3	0.04	0.30	0.02	3.1	0.00	0	0.139
Alimento Apolo	2.09	2.40	87.00	240.0	17.06	3.8	1.75	2.76	15.0	16.0	51		80	1.0	0.80	0.30	0.12	1.6	0.00	0	0.127
Heno de Braquiaria	5.98	12.00	49.81	1200.0	48.85	76.9	0.80	1.41	76.9	3.0	26		65	1.7	0.30	0.20	0.14	2.9	0.00	0	0.100

Spartan Dairy 3 - [ Dairy Ration: Ración 20 % Silaje Sorgo.sdr1]

File Feeds Animal Ration Reports Settings Tabs Window Help



Baja : 100 Midsize breed, Lactating cows, Lac:2, Wt:447 kg, DIM:150, MPD:8.0 kg, MFat:3.8%, DG:0.22 kg/day, DMI:12.2 kg

Feed name	Amount DM kg	As Fed kg	DM %	Group AsFed kg	%Diet %DMI	EINDF %DM	NEL Mcal/kg	ME Mcal/kg	NDF %DM	CP %DM	RUP %CP	MP	RUP dig %RUP	FA %DM	Ca %DM	P %DM	Na %DM	DCAD meq/100g	Se ppm	Vit E IU/kg	Cost DM \$/kg
Agua	0.00	0.00	0.01	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	0.000
Pasto Braquiaria	0.00	0.00	38.37	0.0	0.00	70.0	0.81	1.43	70.0	2.8	31		65	1.0	0.30	0.20	0.14	2.9	0.00	0	0.129
Limestone	0.05	0.05	99.00	5.0	0.40	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	36.00	0.02	0.06	2.3	0.00	0	0.156
Urea	0.09	0.09	97.00	9.0	0.71	0.0	0.00	0.00	0.0	286.0	0		0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	5.682
Salt-white	0.10	0.10	99.00	10.0	0.80	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	0.00	0.00	39.00	-22.7	0.00	0	0.134
Minerales	0.10	0.10	98.00	10.0	0.79	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	16.00	12.30	0.00	-125.0	80.00	3500	1.745
Harina de Soya 48%	0.70	0.80	88.00	80.0	5.69	2.5	1.90	2.98	9.8	46.5	48		95	0.5	0.35	0.70	0.03	34.9	0.00	0	0.251
Molasses, sugarcane	1.11	1.50	74.30	150.0	9.01	0.0	1.77	2.79	0.4	4.0	17		100	0.0	1.00	0.10	0.22	82.7	0.00	0	0.297
Maiz molido	1.65	1.90	87.00	190.0	13.36	2.4	1.96	3.04	9.5	7.3	51		90	3.3	0.04	0.30	0.02	3.1	0.00	0	0.139
Alimento Apolo	1.74	2.00	87.00	200.0	14.07	3.8	1.75	2.76	15.0	16.0	51		80	1.0	0.80	0.30	0.12	1.6	0.00	0	0.127
Silaje de Sorgo	1.84	8.00	23.04	800.0	14.90	65.0	1.25	2.05	65.0	15.0	15		70	2.2	0.28	0.26	0.01	14.8	0.00	0	0.115
Heno de Braquiaria	4.98	10.00	49.81	1000.0	40.27	76.9	0.80	1.41	76.9	3.0	26		65	1.7	0.30	0.20	0.14	2.9	0.00	0	0.100

Spartan Dairy 3 - [ Dairy Ration: Ración 40 % Silaje Sorgo.sdr1]

File Feeds Animal Ration Reports Settings Tabs Window Help



Baja : 100 Midsize breed, Lactating cows, Lac:2, Wt:447 kg, DIM:150, MPD:8.0 kg, MFat:3.8%, DG:0.22 kg/day, DMI:12.2 kg

Feed name	Amount DM kg	As Fed kg	DM %	Group AsFed kg	%Diet %DMI	EINDF %DM	NEL Mcal/kg	ME Mcal/kg	NDF %DM	CP %DM	RUP %CP	MP	RUP dig %RUP	FA %DM	Ca %DM	P %DM	Na %DM	DCAD meq/100g	Se ppm	Vit E IU/kg	Cost DM \$/kg
Urea	0.00	0.00	97.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	286.0	0		0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	5.682
Agua	0.00	0.00	0.01	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	0.000
Pasto Braquiaria	0.00	0.00	38.37	0.0	0.00	70.0	0.81	1.43	70.0	2.8	31		65	1.0	0.30	0.20	0.14	2.9	0.00	0	0.129
Limestone	0.05	0.05	99.00	5.0	0.40	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	36.00	0.02	0.06	2.3	0.00	0	0.156
Salt-white	0.10	0.10	99.00	10.0	0.80	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	0.00	0.00	39.00	-22.7	0.00	0	0.134
Minerales	0.10	0.10	98.00	10.0	0.79	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0		0	0.0	16.00	12.30	0.00	-125.0	80.00	3500	1.745
Harina de Soya 48%	0.88	1.00	88.00	100.0	7.13	2.5	1.90	2.98	9.8	46.5	48		95	0.5	0.35	0.70	0.03	34.9	0.00	0	0.251
Maiz molido	0.87	1.00	87.00	100.0	7.05	2.4	1.96	3.04	9.5	7.3	51		90	3.3	0.04	0.30	0.02	3.1	0.00	0	0.139
Molasses, sugarcane	1.11	1.50	74.30	150.0	9.03	0.0	1.77	2.79	0.4	4.0	17		100	0.0	1.00	0.10	0.22	82.7	0.00	0	0.297
Alimento Apolo	1.57	1.80	87.00	180.0	12.68	3.8	1.75	2.76	15.0	16.0	52		80	1.0	0.80	0.30	0.12	1.6	0.00	0	0.127
Heno de Braquiaria	3.98	8.00	49.81	800.0	32.27	76.9	0.80	1.41	76.9	3.0	26		65	1.7	0.30	0.20	0.14	2.9	0.00	0	0.100
Silaje de Sorgo	3.69	16.00	23.04	1600.0	29.85	65.0	1.25	2.05	65.0	15.0	15		70	2.2	0.28	0.26	0.01	14.8	0.00	0	0.115

**Anexo 10.**

*Medición de producción de leche con el Waikato Milk Meter*



**Anexo 11.**

*Análisis de las muestras de leche con el LactoScan*



## **Anexo 12.**

### *Protocolos de siembra*

Maíz:

[https://www.canva.com/design/DAGGjwKhV\\_o/inKfwpY0o10RQ0tuL2SOjg/view?utm\\_content=DAGGjwKhV\\_o&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=uniquelinks&utmId=h53bfca28db](https://www.canva.com/design/DAGGjwKhV_o/inKfwpY0o10RQ0tuL2SOjg/view?utm_content=DAGGjwKhV_o&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=uniquelinks&utmId=h53bfca28db)

Soya:

[https://www.canva.com/design/DAGGj-AGkhM/IDjR3K09F2Iy535g5M0BOW/view?utm\\_content=DAGGj-AGkhM&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=uniquelinks&utmId=he1e59e6680](https://www.canva.com/design/DAGGj-AGkhM/IDjR3K09F2Iy535g5M0BOW/view?utm_content=DAGGj-AGkhM&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=uniquelinks&utmId=he1e59e6680)

Sorgo:

[https://www.canva.com/design/DAGGj\\_4E00I/rmxvXwGoUbJl\\_6zvVXOmOA/view?utm\\_content=DAGGj\\_4E00I&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=uniquelinks&utmId=h9d18bb7471](https://www.canva.com/design/DAGGj_4E00I/rmxvXwGoUbJl_6zvVXOmOA/view?utm_content=DAGGj_4E00I&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=uniquelinks&utmId=h9d18bb7471)

## **Anexo 13.**

### *Proceso de corta y acarreo de sorgo sureño.*



**Anexo 14.**  
*Elaboración de ensilaje de sorgo.*



**Anexo 15.**

*Apertura y muestreo del ensilaje de sorgo sureño enriquecido.*





**Anexo 16. Costos de establecimiento de sorgo**

**Cultivo Sorgo siembra**

**mecanizada**

Rubro	Unidad	Cantidad	Precio €/unidad	Corta1		Corta2		Corta3		
				USD	Costo CRC	USD \$	CRC	USD	CRC	USD
<b>A. Labores Manuales</b>				508	<b>57.400,00</b>	<b>112,99</b>	<b>42.000,00</b>	<b>82,68</b>	<b>42.000,00</b>	<b>82,68</b>
Aplicación de herbicida quemante	Jornal	0,3	14000,00	27,56	4200,00	8,27				
Siembra	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78				
Aplicación de sellos	Jornal	0,3	14000,00	27,56	4200,00	8,27				
Fertilización	Jornal	2	14000,00	27,56	28000,00	55,12	28000,00	55,12	28000,00	55,12
Apliación de herbicida post emergente	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78	7000,00	13,78	7000,00	13,78
Aplicación de insecticida	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78	7000,00	13,78	7000,00	13,78
<b>B. Insumos</b>					<b>339.660,25</b>	<b>668,62</b>	<b>238.754,04</b>	<b>469,99</b>	<b>241.141,58</b>	<b>474,69</b>
Semilla	kg	15	2500,00	4,92	37500,00	73,82				
Fungicida (vitavax)	100 ml	1	3700,01	7,28	3700,01	7,28				
<b>Fertilizantes</b>										
18-46-0	qq	3	25130	49,47	75390,00	148,41	76143,90	149,89	76905,34	151,39
Urea		7	17020,01	33,50	119140,07	234,53	120331,47	236,87	121534,79	239,24
Foliar (Bayfolan)	litros	3	5200,01	10,24	15600,03	30,71	15756,03	31,02	15913,59	31,33
<b>Insecticida</b>										
Decis	100 ml	1	3670,01	7,22	3670,01	7,22	3706,71	7,30	3743,78	7,37
Exalt	125 ml	1	16820,01	33,11	16820,01	33,11	16988,21	33,44	17158,09	33,78
<b>Herbicidas</b>										

Glufosinato de amonio	litro	3	5840,01	11,50	17520,03	34,49				
Pendimentalina	lt	3	8770,01	17,26	26310,03	51,79				
Atrazina	500 gr	4	4560,01	8,98	18240,04	35,91				
Paraquat	lt	2	2885,01	5,68	5770,02	11,36	5827,72	11,47	5886,00	11,59

<b>C. Otros</b>			<b>100.000,00</b>	<b>196,85</b>	<b>30.000,00</b>	<b>59,06</b>	<b>30.000,00</b>	<b>59,06</b>		
-----------------	--	--	-------------------	---------------	------------------	--------------	------------------	--------------	--	--

**Preparación del terreno**

Rastras	ha	1	35000,00	68,90	35000,00	68,90				
Sembradora	ha	1	35000,00	68,90	35000,00	68,90				
Transporte insumos	flete	2	15000,00	29,53	30000,00	59,06	30000,00	59,06	30000,00	59,06

<b>Total costos (A+B+C)</b>			<b>497.060,25</b>	<b>978,47</b>	<b>310.754,04</b>	<b>611,72</b>	<b>313.141,58</b>	<b>616,42</b>		
-----------------------------	--	--	-------------------	---------------	-------------------	---------------	-------------------	---------------	--	--

**Anexo 17.**

*Costo de elaboración de silo de sorgo 2819 kg (2,8 ton).*

**Elaboración ensilaje 2800 kg / 2.8 ton**

<b>Rubro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>CRC</b>	<b>USD</b>
--------------	---------------	-----------------	---------------	------------	------------

			<b>CRC/unidad</b>		
<b>A. Labores Manuales</b>				<b>14.200,00</b>	<b>27,95</b>
Corta, picado y acarreo del material	Jornal	0,3	10000,00	3000,00	5,91
Elaboración del silo	Jornal	0,8	14000,00	11200,00	22,05
<b>B. Insumos</b>				<b>47.014,00</b>	<b>92,55</b>
Melaza	kg	112	150,00	16800,00	33,07
Urea	kg	56	378,25	21182,00	41,70
Plástico	metros	8	1054,00	8432,00	16,60
Pirola	rollo	1	600,00	600,00	1,18
<b>C. Otros</b>				<b>51.880,44</b>	<b>102,13</b>
Picadora	Depreciación		3000000,00	8333,33	16,40
Combustible	litros	4	609,00	2436,00	4,80
Tractor agrícola	Depreciación		10000000,00	41111,11	80,93
<b>Total costos (A+B+C)</b>				<b>113.094,44</b>	<b>222,63</b>
Costo MF			38,10	Costo/kg	
			0,08	Costo/kg	
Costo MS	MS		130,94		
	0,29		0,26		

**Anexo 18.***Costo establecimiento mecanizado del cultivo de maíz (1 ha)***Cultivo maíz siembra mecanizada 1 ha**

Jornal = 8 h

Rubro	Unidad	Cantida d	Precio		CRC	USD
			CRC/unidad	USD		
<b>A. Labores Manuales</b>					<b>57.400,00</b>	<b>112,99</b>
Aplicación de herbicida quemante	Jornal	0,3	14000,00	27,56	4200,00	8,27
Siembra	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
Aplicación de sellos	Jornal	0,3	14000,00	27,56	4200,00	8,27
Fertilización	Jornal	2	14000,00	27,56	28000,00	55,12
Apliación de herbicida post emergente	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
Aplicación de insecticida + foliar	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
<b>B. Insumos</b>					<b>383.970,28</b>	<b>755,85</b>
Semilla	kg	20	3500,00	6,89	70000,00	137,80
Fungicida (vitavax)	100 ml	1	3700,01	7,28	3700,01	7,28
<b>Fertilizantes</b>	qq					
18-46-0		6	25130,01	49,47	150780,06	296,81
Urea		3	17020,01	33,50	51060,03	100,51
Foliar (Bayfolan)	litros	3	5200,01	10,24	15600,03	30,71
<b>Insecticidas</b>						
Decis	100 ml	1	3670,01	7,22	3670,01	7,22
Exalt	125 ml	1	16820,01	33,11	16820,01	33,11
<b>Herbicidas</b>	litros					

Glufosinato de amonio	litro	3	5840,01	11,50	17520,03	34,49
Pendimentalina	lt	3	8770,01	17,26	26310,03	51,79
Atrazina	500 gr	4	4560,01	8,98	18240,04	35,91
Paraquat (Pilarxone)	lt	2	2885,01	5,68	5770,02	11,36
2-4D	lt	1	4500,01	8,86	4500,01	8,86

---

<b>C. Otros</b>					<b>100.000,00</b>	<b>196,85</b>
-----------------	--	--	--	--	-------------------	---------------

---

**Preparación del terreno**

Rastras	ha	1	35000,00	68,90	35000,00	68,90
Sembradora	ha	1	35000,00	68,90	35000,00	68,90
Transporte insumos	flete	2	15000,00	29,53	30000,00	59,06

---

<b>Total costos (A+B+C)</b>				costo ha	<b>541.370,28</b>	1065,69
				costo m	<b>40,70</b>	
				lineal		0,08

---

**Anexo 19.***Costo establecimiento manual del cultivo de soya (1 ha)*

<b>Rubro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio CRC/unidad</b>	<b>USD</b>	<b>CRC</b>	<b>USD</b>
<b>A. Labores Manuales</b>					<b>91.000,00</b>	<b>179,13</b>
Aplicación de herbicida quemante	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
Siembra	Jornal	2	14000,00	27,56	28000,00	55,12
Aplicación de herbicida pre emergente	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
Fertilización	Jornal	2,5	14000,00	27,56	35000,00	68,90
Aplicación de herbicida post emergente	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
Aplicación de insecticida + foliar	Jornal	0,5	14000,00	27,56	7000,00	13,78
<b>B. Insumos</b>					<b>358.269,24</b>	<b>705,25</b>
Semilla	kg	15	2500,00	4,92	37500,00	73,82
Fungicida (vitavax)	100 ml	1	3700,01	7,28	3700,01	7,28
<b>Fertilizantes</b>		qq				
10-30-10		1	19205,01	37,81	19205,01	37,81
26-0-26		1	17195,01	33,85	17195,01	33,85

Urea		8	17020,01	33,50	136160,08	268,03
Foliar (Bayfolan)	litros	3	5200,01	10,24	15600,03	30,71
<b>Insecticida</b>						
Decis	100 ml	1	3670,01	7,22	3670,01	7,22
Exalt	125 ml	1	16820,01	33,11	16820,01	33,11
<b>Herbidas</b>						
Glufosinato de amonio	lt	3	5840,01	11,50	17520,03	34,49
Pendimetalina	lt	3	8770,01	17,26	26310,03	51,79
Linuron	500 ml	2	10807,00	21,27	21614,00	42,55
Fusilade	lt	1	25295,01	49,79	25295,01	49,79
Flosil	lt	1	17680,01	34,80	17680,01	34,80
<b>C. Otros</b>					<b>65.000,00</b>	<b>127,95</b>
<b>Preparación del terreno</b>						
Rastras	ha	1	35000,00	68,90	35000,00	68,90
Transporte insumos	flete	2	15000,00	29,53	30000,00	59,06

---

<b>Total costos (A+B+C)</b>		<b>514.269,24</b>	costo ha
Jornal	€8 000.00		costo m 41,14 lineal

---

**Anexo 20.***Costos de suplemento por kg*

Materia prima	kg	Costo total (CRC)	Costo kg (CRC)
<b>Alimento balanceado</b>	46,00	14,800	322
<b>Maíz molido</b>	46,00	8,065	175
<b>H. Soya</b>	46,00	13,830	301
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	50,00	2,425	49
<b>Melaza</b>	1,00		146
<b>Urea</b>	46,00	17,020	370
<b>Silo paca</b>	450,00	35,000	78
<b>Minerales</b>	20,00	27,899	1.395
<b>Sal</b>	46,00	6,750	147
<b>Silo sorgo</b>	1,00		38,10

**Anexo 21.***Costo dieta control.*

Materia prima	Cantidad kg MF	Cantidad kg en MS	Precio MF (CRC)	Precio kg MS (CRC)	USD
<b>Apolo</b>	2,4	2,09	772	370	0,73
<b>Maíz molido</b>	2	1,74	351	202	0,40
<b>H. Soya</b>	1	0,88	301	342	0,67
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	0,05	0,05	2	49	0,10
<b>Melaza</b>	1,6	1,19	234	197	0,39
<b>Urea</b>	0,12	0,12	44	381	0,75

<b>Silo paca</b>	12	5,98	933	156	0,31
<b>Minerales</b>	0,1	0,10	139	1.423	2,80
<b>Sal</b>	0,1	0,10	15	148	0,29
<b>Costo por día</b>			<b>2.791</b>	<b>3.268</b>	<b>6,43</b>
<b>Costo kg leche diario</b>			<b>362</b>	<b>423</b>	<b>0,83</b>

## **Anexo 22.**

*Costo dieta sustitución del 15% de la dieta control.*

<b>Materia prima</b>	<b>Cantidad kg MF</b>	<b>Cantidad kg en MS</b>	<b>Precio MF (CRC)</b>	<b>Precio kg MS (CRC)</b>	<b>USD</b>
<b>Apolo</b>	2	1,74	643	370	0,73
<b>Maíz molido</b>	1,9	1,65	333	202	0,40
<b>H. Soya</b>	0,8	0,70	241	342	0,67
<b>CaCO3</b>	0,05	0,05	2	49	0,10
<b>Melaza</b>	1,5	1,11	219	197	0,39
<b>Urea</b>	0,09	8,73	33	4	0,01
<b>Silo paca</b>	10	4,98	778	156	0,31
<b>Minerales</b>	0,1	0,10	139	1.423	2,80
<b>Sal</b>	0,1	0,10	15	148	0,29
<b>Silo sorgo</b>	8	2,34	311	133	0,26
<b>Costo por día</b>			<b>2.715</b>	<b>3.023</b>	<b>5,95</b>
<b>Costo kg leche diario</b>			<b>370</b>	<b>412</b>	<b>0,81</b>

**Anexo 23.***Costo dieta 30%*

<b>Materia prima</b>	<b>Cantidad kg MF</b>	<b>Cantidad kg en MS</b>	<b>Precio MF (CRC)</b>	<b>Precio kg MS (CRC)</b>	<b>USD</b>
<b>Apolo</b>	1,8	1,57	579	370	0,73
<b>Maíz molido</b>	1	0,87	175	202	0,40
<b>H. Soya</b>	1	0,88	277	314	0,62
<b>CaCO3</b>	0,05	0,05	2	49	0,10
<b>Melaza</b>	1,5	1,11	219	197	0,39
<b>Urea</b>	0	0,00	0	0	0,00
<b>Silo paca</b>	8	3,98	622	156	0,31
<b>Minerales</b>	0,1	0,10	139	1.423	2,80
<b>Sal</b>	0,1	0,10	15	148	0,29
<b>Silo sorgo</b>	16	4,69	622	133	0,26
<b>Costo por día</b>			<b>2.651</b>	<b>2.992</b>	<b>5,89</b>
<b>Costo kg leche diario</b>			<b>361</b>	<b>407</b>	<b>0,80</b>