

VIABILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO COMO
SUPLEMENTO ALIMENTICIO EN BOVINOS DE CEBA: ESTUDIO DE CASO EN LA
FINCA LA DANIELA (VILLAVICENCIO, META).



JUAN PABLO MONTOYA PINEDA
WILSON CAMILO LEURO CÓRDOBA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE AMNISTRACION DE EMPRESAS AGROPECUARIAS
VILLAVICENCIO

2026

VIABILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO COMO
SUPLEMENTO ALIMENTICIO EN BOVINOS DE CEBA: ESTUDIO DE CASO EN LA
FINCA LA DANIELA (VILLAVICENCIO, META).

JUAN PABLO MONTOYA PINEDA
WILSON CAMILO LEURO CÓRDOBA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Administrador De Empresas
Agropecuarias

Asesor
Mg. REINALDO ORTIZ BUITRAGO
Magister en Ordenamiento Ambiental del Territorio

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE AMNISTRACION DE EMPRESAS AGROPECUARIAS
VILLAVICENCIO

2026

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg. Reinaldo ORTÍZ BUITRAGO

Decano de la Facultad de Administración de Empresas Agropecuarias

Contenido

	Pág.
Resumen	9
Abstract.....	10
Glosario	11
Introducción.....	14
1. Planteamiento del problema	15
2. Justificación.....	17
3. Objetivos	18
3.1. Objetivo General:	18
3.2. Objetivos Específicos:.....	18
4. Marco teórico	19
4.1. Marco Referencial:	19
4.1.1 Contexto de la producción ganadera en sistemas tropicales.....	19
4.1.2 Forraje verde hidropónico: fundamentos técnicos	19
4.1.3 Composición nutricional y desempeño productivo.....	20
4.1.4 Eficiencia en el uso del agua y sostenibilidad ambiental.....	21
4.1.5 Viabilidad económica y adopción tecnológica	21
4.2. Antecedentes	23
4.2.1 Referentes internacionales	23
4.2.2 Referentes latinoamericanos	23
4.2.3 Referentes nacionales.....	24
4.2.4 Referentes locales	24
4.3. Marco Conceptual	25
4.3.1 Forraje Verde Hidropónico (FVH)	25
4.3.2 Hidroponía	25
4.3.3 Ganado bovino de engorde (ceba)	26
4.3.4 Nutrición animal	27
4.3.5 Sostenibilidad agrícola.....	27

4.4.	Marco Legal	28
4.4.1	Constitución Política de Colombia de 1991.....	28
4.4.2	Ley 99 de 1993.....	28
4.4.3	Ley 373 de 1997.....	29
4.4.4	Ley 1931 de 2018 y Ley 2169 de 2021.....	29
4.4.5	Normativa del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).....	29
5.	Metodología.....	30
5.1.	Enfoque de Investigación	30
5.2.	Tipo y Diseño del Estudio.....	30
5.3.	Área de Estudio	31
5.4.	Población y Muestra.....	32
5.5.	Distribución Experimental	33
5.5.1	Descripción del tratamiento experimental	33
5.5.2	Duración del estudio	33
5.5.3	Control de las condiciones de la evaluación	34
5.6.	Variables del Estudio	34
5.7.	Modelo de Análisis de Datos	35
5.7.1	Análisis estadístico descriptivo.....	35
5.7.2	Análisis estadístico inferencial	36
5.7.3	Análisis económico	36
6.	Resultados	38
6.1.	Caracterización inicial de los grupos experimentales	38
6.2.	Efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico sobre el desempeño productivo	39
6.2.1	Peso final de los bovinos.....	39
6.2.2	Ganancia diaria de peso	40
6.3.	Costos de implementación y operación del sistema de producción de forraje verde hidropónico	42
6.3.1	Costos de implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico	43
6.3.2	Costos de operación del sistema de producción de forraje verde hidropónico	43

6.3.3	Comparación de costos entre el sistema tradicional y el sistema con forraje verde hidropónico.....	44
6.4.	Viabilidad económica de la implementación del forraje verde hidropónico	46
6.4.1	Ingreso bruto generado por la suplementación con FVH	46
6.4.2	Margen bruto.....	47
6.4.3	Utilidad neta.....	48
6.4.4	Rentabilidad	48
	Indicador.....	48
	Valor	48
	Rentabilidad.....	48
	27,3 %.....	48
6.4.5	Punto de equilibrio.....	49
6.5.	Síntesis de Resultados	49
7.	Discusión	52
7.1.	El efecto del forraje verde hidropónico sobre el desempeño productivo	52
7.2.	Implicaciones económicas de la implementación del forraje verde hidropónico	53
7.3.	Aporte del forraje verde hidropónico a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos	54
7.4.	Limitaciones del estudio y perspectivas de investigación.....	55
8.	Conclusiones	56
9.	Recomendaciones.....	58
10.	Referencias bibliográficas.....	60
Anexos		65

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Distribución experimental y tratamientos aplicados.....	33
Tabla 2 Operacionalización de las variables de estudio	34
Tabla 3 Características generales del ensayo	38
Tabla 4 Caracterización inicial de los animales.....	39
Tabla 5 Desempeño productivo comparativo	40
Tabla 6 Ganancia de peso obtenida durante el período experimental.....	41
Tabla 7 Peso promedio de los bovinos al inicio y al final del período experimental	41
Tabla 8 Incremento productivo obtenido mediante la suplementación con forraje verde hidropónico	42
Tabla 9 Inversión en el sistema hidropónico	43
Tabla 10 Costos de operación para la producción de forraje verde hidropónico.....	44
Tabla 11 Estructura comparativa de costos por tratamientos	45
Tabla 12 Costos totales	45
Tabla 13 Ingreso bruto generado por la suplementación con FVH	47
Tabla 14 Margen bruto del sistema suplementado con FVH.....	47
Tabla 15 Utilidad neta del sistema de producción de FVH	48
Tabla 16 Rentabilidad del grupo experimental (FVH)	48
Tabla 17 Punto de equilibrio del sistema de producción de FVH	49

Lista de Anexos

Anexo 1 Montaje del sistema de producción de forraje verde hidropónico.	65
Anexo 2 Semillas listas para la muestra.	65
Anexo 3 Desarrollo inicial del cultivo.	66
Anexo 4 Desarrollo vegetativo del maíz en el sistema.	66
Anexo 5 Revisión de calidad y estado de la semilla.	67
Anexo 6 Inspección del crecimiento y uniformidad de los tapetes de FVH.....	67
Anexo 7 Monitoreo del desarrollo, humedad y calidad de los tapetes de FVH.....	68
Anexo 8 Tapetes del forraje verde completamente desarrollados dentro de la Finca La Daniela	68
Anexo 9 Forraje de maíz en etapa final, suministrado en canecas para el consumo del ganado..	69
Anexo 10 Recolección de la materia vegetal destinada al consumo final	69
Anexo 11 Observación del consumo eficiente del forraje debido a su alta palatabilidad	70

Resumen

La ganadería bovina en regiones tropicales enfrenta importantes desafíos derivados de la variabilidad climática, la disminución en la disponibilidad y calidad de las pasturas y el incremento de los costos de alimentación, factores que afectan el desempeño productivo y la rentabilidad de los sistemas de producción. En este contexto, el forraje verde hidropónico (FVH) constituye una alternativa tecnológica que puede complementar la alimentación del ganado durante los períodos de escasez forrajera. El objetivo de esta investigación fue determinar la viabilidad económica del uso del FVH como suplemento alimenticio en un sistema de ganado bovino de ceba en la Finca La Daniela, ubicada en la vereda Pompeya del municipio de Villavicencio, Meta. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo-comparativo y un diseño experimental. Se evaluaron veinte bovinos de ceba distribuidos aleatoriamente en dos grupos de diez animales: un grupo control alimentado mediante el sistema tradicional de pastoreo y un grupo experimental suplementado diariamente con 15 kg de forraje verde hidropónico durante un período de 90 días. Se analizaron indicadores productivos, como la ganancia diaria de peso y el peso final, así como indicadores económicos relacionados con los costos de implementación, costos de operación, margen bruto, utilidad neta, rentabilidad y punto de equilibrio. Los resultados evidenciaron que el grupo suplementado alcanzó una ganancia diaria de peso de 1,26 kg frente a 0,86 kg del grupo control, lo que representó un incremento del 46,5 % y un aumento promedio de 36 kg por animal al finalizar el período experimental. Desde el punto de vista económico, la implementación del sistema de producción de FVH requirió una inversión total de \$2.970.000, generó un margen bruto de \$1.260.000, una utilidad neta de \$810.000 y una rentabilidad del 27,3 %, superando el punto de equilibrio establecido para el proyecto. Se concluye que el forraje verde hidropónico constituye una alternativa técnica y económicamente viable para complementar la alimentación de bovinos de ceba en condiciones similares a las evaluadas, al mejorar el desempeño productivo de los animales y generar beneficios económicos que contribuyen a fortalecer la sostenibilidad de los sistemas ganaderos tropicales.

Palabras clave: Forraje Verde Hidropónico, Bovinos De Ceba, Suplementación Alimenticia, Viabilidad Económica, Ganancia De Peso, Ganadería Tropical.

Abstract

Beef cattle production in tropical regions faces significant challenges associated with climate variability, declining pasture availability and quality, and increasing feeding costs, all of which negatively affect productive performance and farm profitability. In this context, hydroponic green fodder (HGF) has emerged as a technological alternative to supplement cattle diets during periods of forage scarcity. The objective of this study was to evaluate the economic feasibility of using hydroponic green fodder as a dietary supplement in a beef cattle production system at La Daniela Farm, located in Pompeya district, Villavicencio, Meta, Colombia. The research followed a quantitative approach with a descriptive-comparative scope and an experimental design. Twenty beef cattle were randomly assigned to two groups of ten animals each: a control group fed under the conventional grazing system and an experimental group supplemented daily with 15 kg of hydroponic green fodder for 90 days. Productive indicators, including average daily weight gain and final body weight, were evaluated together with economic indicators such as implementation costs, operating costs, gross margin, net profit, profitability, and break-even point. The results showed that the supplemented group achieved an average daily weight gain of 1.26 kg, compared with 0.86 kg in the control group, representing a 46.5% increase. Statistical analysis revealed significant differences between treatments ($p < 0.05$). From an economic perspective, the implementation of the hydroponic green fodder system required a total investment of COP \$2,970,000, generating a gross margin of COP \$1,260,000, a net profit of COP \$810,000, and a profitability of 27.3%, exceeding the break-even point established for the project. It is concluded that hydroponic green fodder represents a technically feasible and economically viable alternative for supplementing beef cattle diets under conditions similar to those evaluated in this study. Its implementation improves productive performance, increases profitability, and contributes to the sustainability and resilience of tropical livestock production systems facing climate variability.

Keywords: Hydroponic Green Fodder; Beef Cattle; Dietary Supplementation; Economic Feasibility; Weight Gain; Tropical Livestock Production.

Glosario

Análisis de viabilidad económica. Se trata de una evaluación que se realiza antes de iniciar un proyecto para determinar si vale la pena desarrollarlo. En este análisis se tienen en cuenta los gastos necesarios, las ganancias que podrían generarse y el tiempo requerido para recuperar el dinero invertido.

Bovinos de engorde. Está relacionado con los animales destinados a la producción de carne cuya fase final de crecimiento se enfoca en la maximización de deposición de tejido muscular mediante estrategias nutricionales específicas y control de desempeño productivo. En sistemas de ceba, el objetivo principal es optimizar la ganancia de peso y la eficiencia alimenticia antes del sacrificio (Kebede et al., 2023).

Conversión Alimenticia. La conversión alimenticia es un parámetro técnico que se utiliza para evaluar la eficiencia con la que un animal transforma el alimento consumido en aumento de peso corporal. Este indicador se obtiene al relacionar la cantidad de alimento ingerido con el peso vivo ganado en un periodo determinado. Cuando el valor de este índice es más bajo, significa que el animal necesita menos alimento para ganar peso, lo cual refleja un mejor aprovechamiento del recurso alimenticio dentro del sistema productivo (Silva et al., 2022).

Costos de Producción. Se entiende como el conjunto de gastos que se deben cubrir para que la actividad ganadera pueda mantenerse en funcionamiento. Entre ellos se consideran la alimentación de los animales, el pago de la mano de obra, el mantenimiento de las instalaciones, la compra de insumos y otros costos que surgen durante el proceso productivo. Revisar estos gastos permite tener una idea más clara de si el sistema es económicamente viable y puede sostenerse en el tiempo (Costa et al., 2022).

Dieta Suplementada. Es la alimentación basada en forraje a la que se agregan nutrientes extra para mejorar el rendimiento de los animales o compensar deficiencias en el pasto disponible. Este enfoque se utiliza mucho en sistemas de engorde, donde se busca que los animales aprovechen mejor los alimentos y aumenten su crecimiento de manera más eficiente (Kebede et al., 2023).

Diseño Experimental. Es la manera de organizar un experimento para distribuir los tratamientos y las unidades de estudio de forma clara y ordenada. Esto permite ver cómo cada

variable afecta a los resultados bajo condiciones controladas, asegurando que los análisis sean más confiables y comprensibles.

Ensayo comparativo. Estudio experimental en el que se contrastan dos o más tratamientos productivos con el fin de establecer diferencias significativas en variables de desempeño biológico o económico (Silva et al., 2022).

Forraje. Material vegetal utilizado en la alimentación de rumiantes, caracterizado por su aporte de fibra estructural, energía y proteína, pudiendo suministrarse fresco, conservado o deshidratado (FAO, 2022).

Forraje verde Hidropónico (FVH). Sistema de producción vegetal basado en la germinación controlada de semillas sin uso de suelo, en ambientes con humedad y temperatura reguladas, destinado a la alimentación animal como suplemento fresco de alta digestibilidad (Elmulthum et al., 2023).

Ganancia diaria de Peso. Incremento promedio del peso corporal de un animal en un intervalo determinado, expresado en kilogramos por día, utilizando como principal indicador de desempeño en sistemas de ceba (Kebede et al., 2023).

Grupo control. Son las unidades del experimento que no reciben el tratamiento que se está probando. Sirven como referencia para comparar y entender los cambios que se producen en los grupos que sí reciben la intervención (Montgomery, 2021).

Grupo experimental. Son las unidades que reciben el tratamiento o intervención que se quiere evaluar, de manera que sus resultados puedan compararse con los del grupo control.

Hidroponía. Es un método de cultivo en el que las plantas crecen sin suelo, usando soluciones nutritivas o sustratos inertes, bajo condiciones controladas. Esta técnica permite aprovechar mejor el agua y los nutrientes disponibles (Elmulthum et al., 2023).

Inversión inicial. Se refiere al dinero necesario para poner en marcha un sistema productivo, incluyendo la infraestructura, los equipos y las adaptaciones técnicas requeridas para que funcione correctamente (Costa et al., 2022).

Manejo Nutricional. Es el conjunto de decisiones y prácticas que se aplican para elaborar y administrar dietas que cubran las necesidades energéticas y proteicas de los animales, con el objetivo de mantener su salud y mejorar su rendimiento productivo (Kebede et al., 2023).

Materia Seca. Fracción del alimento que permanece tras eliminar el contenido de agua, utilizada como base comparativa para estimar el valor nutricional real de la ración (Silca et al., 2022).

Punto de Equilibrio. Es el momento en que los ingresos de un proyecto alcanzan a cubrir todos sus costos, sin generar ni pérdidas ni ganancias. Este concepto ayuda a saber si una actividad productiva puede mantenerse económicamente (Costa et al., 2022).

Retorno de la inversión (ROI). Mide la ganancia que se obtiene en relación con el dinero invertido, y se utiliza para entender si un proyecto agropecuario o productivo está generando el rendimiento esperado (Costa et al., 2022).

Sistema tradicional de alimentación. Es un enfoque en el que los animales se alimentan principalmente de pasto, recibiendo solo una pequeña cantidad de suplementos minerales cuando es necesario. Este tipo de alimentación es típico de los sistemas ganaderos convencionales en regiones tropicales.

Sistema intensivo de producción. Esquema productivo que incrementa el control sobre variables nutricionales, sanitarias y tecnológicas con el fin de maximizar rendimiento por unidad de área (FAO,2022).

Suplementación estratégica. Consiste en aportar nutrientes adicionales de forma planificada en determinados momentos del ciclo productivo, especialmente cuando las necesidades del animal aumentan o cuando el alimento disponible no es suficiente. Con esta práctica se busca mejorar el rendimiento y el aprovechamiento de la dieta (Kebede et al., 2023).

Tapete de forraje. Es una capa compacta formada por plántulas germinadas que se producen en bandejas mediante sistemas hidropónicos. Este conjunto se ofrece completo a los animales como un suplemento fresco dentro de su alimentación.

Viabilidad técnica. Evaluación de la factibilidad operativa y tecnológica de implementar un sistema productivo bajo condiciones reales.

Introducción

La ganadería bovina constituye una de las principales actividades económicas del sector agropecuario colombiano y desempeña un papel fundamental en el desarrollo rural. En el departamento del Meta, los sistemas de producción bovina dependen principalmente de las pasturas naturales, cuya disponibilidad y calidad se ven afectadas por la variabilidad climática, los períodos prolongados de sequía y la degradación de los suelos. Estas condiciones limitan el desempeño productivo del ganado, incrementan los costos de alimentación y afectan la rentabilidad de las explotaciones pecuarias (Herrero et al., 2021). Ante esta problemática, el forraje verde hidropónico (FVH) ha surgido como una alternativa tecnológica para complementar la alimentación del ganado, debido a que permite producir biomasa vegetal en ambientes controlados, optimizando el uso del agua y reduciendo la dependencia de las condiciones climáticas (Elghandour et al., 2022). Diversos estudios han demostrado que su incorporación en la dieta de bovinos puede mejorar indicadores productivos como la ganancia diaria de peso y la eficiencia alimenticia (Naik et al., 2023). Sin embargo, la adopción de esta tecnología no debe sustentarse únicamente en sus beneficios productivos, sino también en la capacidad de generar beneficios económicos que justifiquen la inversión requerida para su implementación (Morales et al., 2021).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo analizar la viabilidad económica de la implementación del forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio en un sistema de producción de ganado bovino de ceba en la Finca La Daniela, ubicada en la vereda Pompeya del municipio de Villavicencio, Meta. Para ello, se desarrolló un estudio con enfoque cuantitativo y diseño experimental comparativo, mediante el cual se evaluó el desempeño productivo de los animales suplementados con FVH y se realizó un análisis de los costos de implementación, operación y rentabilidad del sistema, con el propósito de establecer su conveniencia económica bajo condiciones reales de producción. Los resultados obtenidos aportan información técnica y económica para la toma de decisiones relacionadas con la adopción de tecnologías de alimentación en sistemas ganaderos tropicales. Asimismo, constituyen un referente para productores y profesionales del sector agropecuario interesados en implementar estrategias que contribuyan a mejorar la competitividad y sostenibilidad económica de las explotaciones bovinas.

1. Planteamiento del problema

La ganadería bovina constituye una de las principales actividades productivas del departamento del Meta y representa una fuente importante de ingresos para los productores rurales. Sin embargo, los sistemas de producción bovina de ceba enfrentan importantes desafíos asociados a la disponibilidad y calidad de las pasturas, especialmente durante los períodos de sequía, cuando la disminución de la oferta forrajera afecta el desempeño productivo del ganado y genera incrementos en los costos de alimentación. Esta situación reduce la eficiencia de los sistemas productivos y limita la rentabilidad de las explotaciones pecuarias, particularmente en aquellas que dependen del pastoreo tradicional como principal fuente de alimentación (Herrero et al., 2021).

Frente a esta problemática, los productores han incorporado diferentes estrategias de suplementación alimenticia con el propósito de mantener la productividad del ganado durante las épocas críticas. Entre estas alternativas, el forraje verde hidropónico (FVH) ha adquirido un creciente interés debido a que permite producir biomasa vegetal en ambientes controlados, con menor dependencia de las condiciones climáticas y un uso más eficiente de recursos como el agua y el espacio (Elghandour et al., 2022). Diversas investigaciones han demostrado que su utilización puede contribuir a mejorar indicadores productivos como la ganancia diaria de peso y la eficiencia alimenticia en bovinos de ceba (Naik et al., 2023).

No obstante, la adopción del forraje verde hidropónico en las explotaciones ganaderas continúa siendo limitada. Aunque existe evidencia sobre sus beneficios productivos, la decisión de implementar esta tecnología implica realizar inversiones en infraestructura, equipos, insumos y mano de obra, cuyos beneficios económicos pueden variar de acuerdo con las condiciones particulares de cada sistema de producción. En consecuencia, el mejor desempeño productivo de los animales no garantiza, por sí solo, que la tecnología sea económicamente viable para el productor (Morales et al., 2021).

En este sentido, uno de los principales vacíos de conocimiento se relaciona con la escasa disponibilidad de estudios que integren la evaluación técnica y económica del forraje verde hidropónico bajo condiciones reales de producción. La mayoría de las investigaciones reportan resultados obtenidos en condiciones experimentales o se concentran en variables nutricionales y productivas, mientras que son limitados los estudios orientados a determinar si los beneficios

alcanzados compensan los costos de implementación y operación del sistema, permitiendo mejorar la rentabilidad de las explotaciones ganaderas.

Esta situación cobra especial importancia en el departamento del Meta, donde predominan sistemas tradicionales de alimentación y donde la incorporación de nuevas tecnologías representa una decisión de inversión que debe sustentarse en criterios técnicos y económicos. En la Finca La Daniela, ubicada en la vereda Pompeya del municipio de Villavicencio, la producción de ganado bovino de ceba depende principalmente del pastoreo convencional, situación que hace necesario evaluar alternativas que permitan mejorar la productividad sin comprometer la sostenibilidad económica del sistema productivo.

Por lo anterior, resulta pertinente desarrollar una investigación que permita analizar, de manera integral, el efecto productivo de la suplementación con forraje verde hidropónico y su incidencia sobre los costos de producción y la rentabilidad del sistema, generando información objetiva que facilite la toma de decisiones por parte de los productores ganaderos frente a la implementación de esta tecnología. Con base en este contexto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es económicamente viable la implementación del forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio en un sistema de producción de ganado bovino de ceba en la Finca La Daniela, ubicada en la vereda Pompeya del municipio de Villavicencio, Meta?

2. Justificación

La alimentación representa uno de los componentes de mayor incidencia sobre los costos de producción en los sistemas de ganado bovino de ceba. En el departamento del Meta, la dependencia del pastoreo tradicional y la variabilidad climática afectan la disponibilidad y calidad del forraje durante diferentes épocas del año, situación que repercute en el desempeño productivo de los animales y en la rentabilidad de las explotaciones ganaderas. En este contexto, resulta necesario evaluar alternativas tecnológicas que contribuyan a mejorar la eficiencia productiva sin incrementar significativamente los costos de producción.

El forraje verde hidropónico (FVH) se presenta como una alternativa con potencial para complementar la alimentación bovina, debido a que permite producir biomasa vegetal en condiciones controladas y reducir la dependencia de los factores climáticos. Aunque diferentes investigaciones han demostrado sus beneficios sobre variables productivas como la ganancia de peso y la eficiencia alimenticia (Naik et al., 2023), aún existe limitada información sobre su viabilidad económica bajo condiciones reales de producción en sistemas ganaderos del departamento del Meta.

La importancia de esta investigación radica en que integra el análisis técnico y económico de la implementación del forraje verde hidropónico en una unidad productiva representativa de la región. Los resultados permitirán establecer si los beneficios obtenidos justifican la inversión requerida, aportando información objetiva para la toma de decisiones relacionadas con la adopción de esta tecnología en explotaciones ganaderas con características similares.

Asimismo, el estudio constituye un aporte para el programa de Administración de Empresas Agropecuarias, al aplicar herramientas de análisis económico para evaluar la conveniencia de incorporar una innovación tecnológica en un sistema de producción bovina. De esta manera, los resultados podrán servir como referente para productores, profesionales e investigadores interesados en fortalecer la competitividad y sostenibilidad económica de la ganadería tropical.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General:

Analizar la viabilidad económica de la implementación del forraje verde hidropónico (FVH) como suplemento alimenticio en un sistema de producción de ganado bovino de ceba en la Finca La Daniela, ubicada en la vereda Pompeya del municipio de Villavicencio, Meta.

3.2. Objetivos Específicos:

- Establecer el efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico sobre el desempeño productivo del ganado bovino de ceba, mediante el análisis de indicadores como la ganancia diaria de peso, el peso final y la eficiencia alimenticia.
- Determinar los costos de implementación y operación del sistema de producción de forraje verde hidropónico, comparándolos con los costos del sistema tradicional de alimentación utilizado en la Finca La Daniela.
- Evaluar la viabilidad económica de la implementación del forraje verde hidropónico mediante el análisis de indicadores financieros y económicos que permitan establecer su conveniencia como alternativa tecnológica para el sistema de producción bovina.

4. Marco teórico

4.1. Marco Referencial:

4.1.1 Contexto de la producción ganadera en sistemas tropicales

La producción bovina en regiones tropicales enfrenta desafíos estructurales asociados a la estacionalidad forrajera, la degradación de pasturas y la variabilidad climática. En sistemas extensivos, característicos de la Orinoquía colombiana, la disponibilidad y calidad del alimento dependen en gran medida de las condiciones ambientales, lo que genera fluctuaciones en la productividad animal. Investigaciones recientes han señalado que la intensificación sostenible de la ganadería requiere innovaciones en la alimentación que permitan reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático y mejorar la eficiencia del sistema productivo (Mottet et al., 2021).

Además, la creciente presión sobre los recursos naturales, especialmente el suelo y el agua, obliga a buscar formas más eficientes de producir forraje. Según la FAO (2022), el futuro de la ganadería sostenible dependerá de adoptar tecnologías que aprovechen mejor los insumos y reduzcan el impacto ambiental, sin que esto afecte la rentabilidad de las fincas.

4.1.2 Forraje verde hidropónico: fundamentos técnicos

El forraje verde hidropónico (FVH) es un sistema de cultivo de plantas que utiliza principalmente semillas de cereales y, en algunos casos, de leguminosas, sin necesidad de suelo y bajo condiciones controladas. Se produce en bandejas o módulos donde se regula la humedad, la luz y la temperatura, lo que permite obtener forraje fresco en menos de dos semanas. Gracias a esto, se pueden hacer varios ciclos de producción seguidos, asegurando un suministro constante de alimento para los animales.

Diversos autores han señalado que uno de los principales atributos del FVH es la estabilidad en la calidad del producto obtenido, al reducir la exposición directa a eventos climáticos extremos (Pastorelli et al., 2023). A ello se suma la posibilidad de ajustar parámetros de manejo que influyen en el valor nutricional final del forraje. Según lo expuesto por Elghandour et al. (2022), la producción en ambientes controlados facilita una mayor

previsibilidad en la composición del alimento, lo cual puede contribuir a formular dietas más homogéneas dentro de los sistemas ganaderos.

El rendimiento del forraje verde hidropónico (FVH) depende de cómo se maneje. La elección de la semilla, la cantidad de semillas sembradas, el momento de la cosecha y cómo se controla el riego afectan tanto la cantidad como la calidad del forraje. Yahyaei et al. (2024) señalan que cambios en el tiempo de germinación pueden alterar la proteína, la fibra y los minerales del forraje, afectando su valor nutricional. Por eso, el éxito del FVH no depende solo de la infraestructura, sino también de que el manejo técnico sea adecuado.

4.1.3 Composición nutricional y desempeño productivo

El interés por el forraje verde hidropónico no se limita a su facilidad de producción, sino también a su perfil nutricional y a los posibles efectos sobre el desempeño animal. Investigaciones recientes han señalado que, cuando se incorpora como complemento en dietas de rumiantes, puede favorecer la digestibilidad global de la ración y contribuir a mejorar la eficiencia en la utilización del alimento. En este sentido, se ha observado que su inclusión estratégica puede reflejarse en mejores indicadores de conversión alimenticia y, en algunos casos, en incrementos en la ganancia de peso (Terefe, 2022).

El forraje verde hidropónico (FVH) contiene bastante proteína y algunos compuestos que se forman durante la germinación y que pueden favorecer la digestión y el aprovechamiento de nutrientes en los animales (Naik et al., 2023). Esto explica por qué cada vez se usa más en sistemas donde el pasto natural es de calidad variable o escasa en ciertas épocas.

Sin embargo, no se puede usar de cualquier forma. Los FVH cuentan con menor materia seca que los forrajes tradicionales, ya que su aporte nutricional debe evaluarse de manera minuciosa (Sneath & McIntosh, 2022). Incluido de forma incorrecta, puede causar declives en los procesos alimentarios. Es importante en ese sentido utilizarlo como un suplemento que complementa el pasto tradicional, y no en su totalidad.

Dentro de los sistemas de ceba hablar de estabilidad en la calidad del alimento, puede interpretarse como incrementos más uniformes en la ganancia diaria de peso, reduciendo las pérdidas asociadas a periodos de escasez (Pastorelli et al., 2023). Tales tópicos, se hacen

relevantes en fincas como lo es el caso de La Daniela, porque su productividad depende del equilibrio entre alimentación, manejo y costos operativos.

4.1.4 Eficiencia en el uso del agua y sostenibilidad ambiental

La eficiencia hídrica es un aspecto importante en los sistemas de FVH. Estudios relevantes manifiestan que los sistemas hidropónicos reducen de forma significativa el consumo del agua en contraste con cultivos forrajeros convencionales, gracias a la reutilización y control del riego (Jini et al., 2022).

Gracias a los sistemas de riego, es posible controlar la producción de forraje hidropónico y aprovechar mejor el agua, sobre todo en zonas que se afectan por los cambios de temporada. Además, tal como lo manifiestan Szekely y Jijakli (2022), este tipo de producción disminuye la necesidad de traer alimento de otras regiones y dependencia de insumos externos, favoreciendo a la ganadería y al impacto sobre el medio ambiente.

4.1.5 Viabilidad económica y adopción tecnológica

El éxito en la adopción del forraje verde hidropónico trasciende sus beneficios técnicos, estando intrínsecamente ligado a su viabilidad económica a largo plazo. Investigaciones previas, como las de Morales et al. (2021), señalan que la rentabilidad de estos sistemas está condicionada por diversos factores interrelacionados. Entre estos, sobresale la magnitud de la producción, que permite economías de escala; los costos locales de los materiales e infraestructura necesarios para la instalación y operación del sistema; y la disminución en la dependencia de alimentos concentrados comerciales, tradicionalmente más costosos.

La puesta en marcha de un sistema de forraje verde hidropónico necesita de una inversión inicial dentro de la adquisición de insumos, procesos adaptativos y construcción de infraestructura. De igual forma, la inversión no tiene que ser vista como ese ente inalcanzable que sea determinante para la inviabilidad de la proyección. Desde el ámbito económico específico, hay que tener en cuenta los beneficios a obtenerse en el mediano y largo plazo, así, se revela que la inversión inicial reduce costos en torno a la alimentación animal llegando a un incremento para la productividad del ganado. En este caso es importante detallar cada punto en

específico, observando condiciones locales y expectativas que se presenten dentro de la producción para tomar una decisión informada sobre acoger este factor tecnológico como complemento.

Para el caso de la pequeña y mediana escala, la explotación cuenta con un desembolso inicial el cual puede percibirse como un limitante, debido a la rentabilidad, que repercute en la articulación ejecutada del sistema productivo existente. En este aspecto se habla de orientar esa reducción de déficit forrajero en los periodos críticos y no generar la sustitución total del esquema tradicional, su desempeño financiero resulta más favorable (Pastorelli et al., 2023).

En términos generales, este tipo de análisis actuando por sí solos no resuelve la incógnita de que el forraje hidropónico es realmente conveniente. En este tópico para implementarlo de forma exitosa, se requiere de evaluar la viabilidad económica dentro del terreno a utilizar, en fincas representativas. Llevar a cabo estos procesos investigativos, se debe considerar de manera puntual factores como la rentabilidad de la actividad. Entre estos, destaca la explotación agrícola, ya que una mayor superficie genera economías de escala, de igual forma requiere de implicaciones mayores en cuanto a costos de gestión.

En ese orden de ideas, es importante considerar la importancia de los costos locales, como lo es la mano de obra, insumos agrícolas, gestión logística, ya que pueden variar de manera significativa de una región a otra. Aquí es donde la eficiencia del manejo dentro de este sistema productivo cuenta con un rol determinante en torno a la rentabilidad generada. Manejar de forma correcta estos recursos, aplicar las técnicas agrícolas de forma correcta y optimizar lo relacionado a los costos y aumento de producción, favorece al proceso en términos generales.

Ya desde el punto de la condición del mercado, la fluctuación de precios dentro de los productos agrícolas y la demanda, dificultan los ingresos de los productores de forma directa. En este caso, hay que indagar estos factores determinantes y evaluar si la actividad económica es viable dentro del entorno a estudiar.

Dentro de la información recopilada, se confirma que los resultados en las evaluaciones de viabilidad económica, reflejan variaciones respecto a la región geográfica y aspectos prácticos de manejo implementados. Aspecto que fortalecen la necesidad de mayor precisión y claridad con base en los estudios que requiere cada lugar, tomar en cuenta características, condiciones y otros puntos acordes a cada zona. No es recomendable depender únicamente de la teoría, porque pueden ser factores distantes en la realidad local y llevar a conclusiones descontextualizadas.

4.2. Antecedentes

4.2.1 Referentes internacionales

A nivel internacional, las investigaciones sobre el forraje verde hidropónico (FVH) han demostrado su potencial como alternativa para complementar la alimentación de rumiantes, especialmente en regiones con limitaciones en la disponibilidad de forraje y alta variabilidad climática. Estudios de revisión realizados por Elghandour et al. (2022) evidencian que el FVH mejora la digestibilidad de las dietas, favorece el aprovechamiento de nutrientes y optimiza el uso del agua, consolidándose como una tecnología con beneficios productivos y ambientales.

De manera complementaria, Pastorelli et al. (2023) reportan que la incorporación del FVH en sistemas intensivos contribuye a mejorar la estabilidad de la producción animal y la eficiencia alimenticia, aunque destacan que su adopción depende de una adecuada planificación técnica y económica. En el mismo sentido, Naik et al. (2023) señalan que el éxito de esta tecnología está condicionado por un manejo adecuado del proceso de producción y por la evaluación de su rentabilidad bajo las condiciones específicas de cada explotación.

Por su parte, Sneath y McIntosh (2022) advierten que, debido a su bajo contenido de materia seca, el FVH debe utilizarse como suplemento y no como sustituto total del forraje convencional. Asimismo, Yahyaei et al. (2024) demostraron que variables como la calidad de la semilla, el tiempo de germinación y el manejo del cultivo influyen directamente sobre el rendimiento y la composición nutricional del forraje.

4.2.2 Referentes latinoamericanos

En América Latina, las investigaciones han confirmado el potencial del forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio en diferentes sistemas pecuarios. Arias et al. (2019) y Castillo y Chavarría (2018) reportan mejoras en la digestibilidad, el contenido nutricional y la aceptación del alimento por parte de los animales, destacando además la viabilidad de esta tecnología en explotaciones de pequeña y mediana escala.

Otros estudios desarrollados en México, Perú y Costa Rica evidencian que el FVH contribuye a mantener la disponibilidad de alimento durante períodos de escasez, mejora la

eficiencia en el uso del agua y favorece el desempeño productivo de los animales cuando se utiliza como complemento de la alimentación convencional (Rivera et al., 2021; Quispe et al., 2022; León y Leiton, 2023). No obstante, los autores coinciden en que los resultados dependen de las condiciones de manejo y de las características particulares de cada sistema de producción.

4.2.3 Referentes nacionales

En Colombia, las investigaciones sobre el uso del forraje verde hidropónico se han orientado principalmente a evaluar su efecto sobre el desempeño productivo de bovinos en sistemas ganaderos de clima cálido. Rodríguez y Rincón (2021), así como Herrera y Parra (2022), reportan mejoras en la ganancia diaria de peso, la digestibilidad y la eficiencia alimenticia cuando el FVH es utilizado como suplemento en bovinos de carne.

Por otra parte, López y Martínez (2023) evidenciaron que los sistemas hidropónicos permiten optimizar el uso del agua y garantizar la producción de biomasa durante períodos de sequía, mientras que Ramírez, Castaño y Beltrán (2024) destacan que la rentabilidad de esta tecnología depende de factores como el tamaño de la explotación, la eficiencia en la operación y los costos de implementación. Finalmente, Torres y Calderón (2025) concluyen que el FVH constituye una alternativa tecnológica con potencial para fortalecer la competitividad de la ganadería colombiana, siempre que su adopción esté respaldada por análisis técnicos y económicos que orienten la toma de decisiones.

Estos antecedentes evidencian que, aunque existe información sobre los beneficios productivos del FVH, aún son limitados los estudios que analizan de manera integral su viabilidad económica en condiciones reales de producción, especialmente en el departamento del Meta.

4.2.4 Referentes locales

En la región de la Orinoquia colombiana, las investigaciones relacionadas con sistemas de alimentación bovina resaltan la importancia de implementar estrategias que reduzcan la dependencia de las pasturas estacionales y fortalezcan la sostenibilidad de los sistemas ganaderos. Estudios desarrollados por la Universidad de los Llanos y otros grupos de

investigación evidencian que la suplementación estratégica y la incorporación de tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia alimenticia constituyen alternativas para incrementar la productividad y la resiliencia de la ganadería frente a la variabilidad climática (Arango et al., 2020; Murgueitio et al., 2011; Delis Hechavarría et al., 2025).

4.3. Marco Conceptual

4.3.1 *Forraje Verde Hidropónico (FVH)*

El forraje verde hidropónico (FVH) corresponde a la biomasa vegetal producida a partir de la germinación de semillas en sistemas sin suelo, bajo condiciones controladas de humedad, temperatura y luminosidad. Su ciclo productivo es corto, generalmente entre 7 y 12 días, periodo en el cual se obtiene un tapete vegetal compuesto por raíz, tallo y hoja, que se suministra completo al animal.

Estudios recientes han descrito que el FVH presenta ventajas relacionadas con la producción constante durante todo el año y con la eficiencia en el uso del agua frente a sistemas forrajeros convencionales (Salo et al., 2022). Asimismo, investigaciones experimentales han demostrado que la germinación controlada puede incrementar la disponibilidad de nutrientes y mejorar la digestibilidad respecto al grano sin germinar (Islam, Chowdhury & Rahman, 2021). En esta investigación, el FVH se entiende como suplemento alimenticio estratégico, cuyo impacto será evaluado en términos de ganancia de peso y viabilidad económica en ganado de ceba.

4.3.2 *Hidroponía*

La hidroponía es una forma de cultivar plantas sin usar tierra. En lugar de eso, las plantas crecen en agua que contiene los nutrientes que necesitan. Este método permite cuidar mejor los factores como el pH y la cantidad de minerales, lo que ayuda a que todas las plantas crezcan de manera parecida y saludable.

Investigaciones recientes han destacado que los sistemas hidropónicos contribuyen a optimizar el uso de recursos hídricos y a reducir la incidencia de enfermedades asociadas al suelo

(Touliatos, Dodd & McAinsh, 2021). De igual manera, estudios sobre agricultura en ambientes controlados señalan que este tipo de producción disminuye la variabilidad climática sobre el rendimiento vegetal, ofreciendo mayor estabilidad productiva (Avgoustaki & Xydis, 2022). En el marco de esta investigación, la hidroponía constituye la base técnica que posibilita la producción continua de forraje verde hidropónico en la Finca La Daniela.

4.3.3 Ganado bovino de engorde (ceba)

Este se conforma por animales que funcionan para el usufructo de la carne como producción principal, debido a que manejo está orientado en la promoción de incrementos sostenidos en cuanto a su peso y sobre todo la implementación eficaz del alimento en un periodo determinado. En condiciones tropicales, su desempeño productivo en estos sistemas, se encuentra relacionado con la calidad y obtención de estabilidad en la oferta forrajera, que se suele verse afectada por las temporalidades climáticas constantes.

De manera reciente, estudios puntuales de la producción de carne bovina, sobre todo en entornos tropicales de baja altitud, han puesto como base prima la importancia de plantear y aplicar estrategias minuciosas para la suplementación nutricional. Tales estudios se relacionan a la planificación de las mismas sobre todo en programas de suplementación donde se puede conducir a la mejora notable de los resultados productivos.

Capper & Cady (2020), en sus trabajos aportan que la ganancia diaria de peso y su eficacia en la conversión alimentaria son dos tópicos importantes para el beneficio sobre todo de la estrategia suplementaria. Lo que se traduce en, pesos altos en periodos cortos, pero también cuentan con la capacidad de obtener nutrientes a partir de esta misma cantidad de alimento.

Por otra parte, los procesos investigativos actuales en el campo de nutrición bovina, como los plasmados por Lopes et al., (2022), se enfocan en el rol importante de generar el equilibrio energético proteico, más que todo en su fase final de engorde. Un sondeo adecuado dentro de estos puntos nutricionales cuenta con un impacto sustancial dentro de la forma en que los animales convierten el alimento en masa muscular, así como en el cubrimiento de su rendimiento independiente. Lo que sugiere, aumentar el interés por parte de los productores en cuanto a la atención de las necesidades nutricionales puntuales de cada uno de los animales en esta etapa crucial para expandir la producción de carne de res de alta calidad.

Este aspecto es relevante para el presente estudio porque se trabajan dos grupos de bovinos de ceba en la Finca La Daniela, cada uno con un tipo de alimentación diferente. A partir de esta comparación se busca observar si la suplementación con forraje verde hidropónico genera algún cambio en el desempeño productivo de los animales.

4.3.4 *Nutrición animal*

La nutrición animal trata de entender qué necesita comer un animal para mantenerse sano y desarrollarse bien. En esa alimentación intervienen componentes como la energía, la proteína, los minerales y las vitaminas. En el caso de los rumiantes, la digestión funciona de una manera particular. Gran parte del aprovechamiento del alimento ocurre en el rumen, donde viven microorganismos que ayudan a descomponer lo que el animal consume. Gracias a esa actividad, los nutrientes pueden ser utilizados por el organismo, lo que termina influyendo en el crecimiento y el rendimiento del ganado.

Estudios recientes han demostrado que la calidad del forraje influye directamente en la fermentación ruminal y en la ganancia de peso en bovinos (Krause & Oetzel, 2021). De igual manera, investigaciones sobre suplementación en sistemas tropicales indican que mejorar la digestibilidad del alimento incrementa la eficiencia metabólica del ganado (Mottet et al., 2022). En esta investigación, la nutrición animal constituye el eje técnico que permitirá evaluar el impacto del FVH sobre el desempeño productivo del hato en estudio.

4.3.5 *Sostenibilidad agrícola*

La sostenibilidad agrícola busca que los sistemas de producción puedan mantenerse a lo largo del tiempo sin agotar los recursos que usan. Esto implica cuidar el medio ambiente, pero también considerar lo económico y lo social. En la ganadería, significa aprovechar mejor el agua y el suelo y producir más sin dañar la naturaleza.

En los últimos años, distintos análisis han planteado que la llamada intensificación sostenible en la producción pecuaria requiere incorporar tecnologías que permitan disminuir la huella ambiental sin comprometer la rentabilidad del productor (Herrero et al., 2021). De manera complementaria, estudios sobre procesos de transición agroecológica sostienen que diversificar

las fuentes de alimentación puede aumentar la capacidad de respuesta de los sistemas frente a la variabilidad climática (Pretty et al., 2022). Bajo esta perspectiva, la evaluación del forraje verde hidropónico en la Finca La Daniela se inscribe en un marco que busca establecer si es posible fortalecer el desempeño productivo y, al mismo tiempo, avanzar hacia un uso más racional de los recursos disponibles.

4.4. Marco Legal

El desarrollo de actividades agropecuarias en Colombia se encuentra regulado por un conjunto de disposiciones constitucionales, legales y reglamentarias orientadas a promover la producción sostenible, el uso eficiente de los recursos naturales y la protección del ambiente. En el caso de la implementación del forraje verde hidropónico (FVH) como alternativa de suplementación alimenticia en sistemas de producción bovina, la presente investigación se fundamenta en las siguientes normas:

4.4.1 Constitución Política de Colombia de 1991

La Constitución Política de Colombia establece el marco general para la protección del ambiente y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Los artículos 79 y 80 reconocen el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y asignan al Estado la responsabilidad de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales bajo criterios de sostenibilidad. En este sentido, la implementación del forraje verde hidropónico constituye una alternativa tecnológica que promueve el uso eficiente del agua y contribuye a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos.

4.4.2 Ley 99 de 1993

La Ley 99 de 1993 creó el Ministerio de Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA), estableciendo los principios que orientan la gestión ambiental en Colombia. Esta norma promueve la adopción de tecnologías que reduzcan los impactos ambientales derivados de las actividades productivas y fomenten el uso racional de los recursos naturales. En consecuencia, la

implementación del FVH se encuentra alineada con estos principios al favorecer un uso más eficiente del agua y disminuir la presión sobre el suelo destinada a la producción de forraje.

4.4.3 Ley 373 de 1997

La Ley 373 de 1997 establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), con el propósito de promover el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en todos los sectores productivos. Debido a que los sistemas hidropónicos utilizan menores volúmenes de agua en comparación con los sistemas tradicionales de producción de forraje, esta tecnología contribuye al cumplimiento de los principios establecidos en esta norma.

4.4.4 Ley 1931 de 2018 y Ley 2169 de 2021

La Ley 1931 de 2018 establece las directrices para la gestión del cambio climático en Colombia, mientras que la Ley 2169 de 2021 fortalece la política nacional de acción climática mediante la promoción de sistemas productivos sostenibles y resilientes. La incorporación del forraje verde hidropónico representa una estrategia que contribuye a la adaptación de los sistemas ganaderos frente a la variabilidad climática, favoreciendo la estabilidad en la disponibilidad de alimento y el uso eficiente de los recursos naturales

4.4.5 Normativa del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) establece los lineamientos relacionados con las Buenas Prácticas Ganaderas (BPG), la inocuidad de los alimentos para animales, la sanidad pecuaria y la trazabilidad de los sistemas productivos. En consecuencia, la implementación del forraje verde hidropónico debe desarrollarse bajo condiciones adecuadas de higiene, manejo sanitario y control de calidad, garantizando la inocuidad del alimento suministrado al ganado y el cumplimiento de la normativa vigente.

5. Metodología

5.1. Enfoque de Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que permitió medir y analizar objetivamente el efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico (FVH) sobre variables productivas y económicas en bovinos de ceba. Para ello, se evaluaron indicadores como la ganancia diaria de peso, el peso final, la conversión alimenticia, los costos de producción y la rentabilidad del sistema.

La información obtenida fue registrada mediante instrumentos de medición estandarizados y posteriormente analizada utilizando estadística descriptiva y herramientas de evaluación económica, permitiendo comparar el comportamiento del grupo suplementado con FVH frente al sistema tradicional de alimentación y determinar la viabilidad económica de esta alternativa tecnológica.

5.2. Tipo y Diseño del Estudio

La presente investigación se desarrolló como un estudio de tipo aplicado, debido a que estuvo orientado a generar información útil para la toma de decisiones sobre la implementación del forraje verde hidropónico (FVH) como alternativa de suplementación alimenticia en un sistema de producción de ganado bovino de ceba. Su propósito fue evaluar, bajo condiciones reales de producción, el comportamiento productivo y la viabilidad económica de esta tecnología en la Finca La Daniela, ubicada en el municipio de Villavicencio (Meta).

El estudio se abordó mediante un diseño comparativo de campo, en el que se conformaron dos grupos de bovinos con características iniciales similares. Un grupo mantuvo el sistema tradicional de alimentación utilizado en la finca (grupo control), mientras que el segundo recibió suplementación con forraje verde hidropónico (grupo experimental). Ambos grupos fueron manejados bajo las mismas condiciones de pastoreo, sanidad y manejo durante un período de 90 días, de manera que las diferencias observadas pudieran asociarse a la inclusión del suplemento alimenticio.

Asimismo, la investigación tuvo un alcance descriptivo y comparativo, ya que permitió registrar y analizar variables productivas, nutricionales y económicas relacionadas con ambos tratamientos. Los resultados obtenidos fueron comparados mediante indicadores técnicos y económicos con el propósito de establecer la conveniencia de implementar el forraje verde hidropónico como alternativa para mejorar la eficiencia y la rentabilidad del sistema de producción bovina evaluado.

5.3. Área de Estudio

La investigación se lleva a cabo en la Finca La Daniela, situada en el corregimiento Pompeya, zona rural de Villavicencio, en el departamento del Meta. Esta área forma parte del piedemonte llanero, una zona reconocida por su relevancia dentro de la actividad ganadera nacional.

La unidad productiva abarca cerca de 55 hectáreas y sostiene, en promedio, unos 100 bovinos en proceso de ceba. El manejo que se desarrolla es el que tradicionalmente se aplica en la zona: los animales permanecen en pastoreo sobre praderas ya establecidas y reciben como complemento sal mineralizada. Se trata de un sistema extensivo, similar al que utilizan la mayoría de los predios ganaderos del sector.

En cuanto al entorno natural, el piedemonte presenta un clima cálido y húmedo. Las temperaturas se mantienen, por lo general, entre 25 y 27 °C, y las lluvias son abundantes, con registros anuales que pueden sobrepasar los 3.500 mm. Durante buena parte del año se presentan precipitaciones constantes, seguidas por un periodo seco más definido. Estos cambios a lo largo del calendario afectan la oferta de pasto: hay meses en los que el crecimiento es alto y otros en los que disminuye tanto la cantidad disponible como su calidad nutricional.

Investigaciones realizadas en la región de la Orinoquía colombiana muestran que los cambios en el clima inciden directamente en el comportamiento productivo del ganado. En los meses secos, cuando disminuye la disponibilidad de pasto, es común que se vea afectada la ganancia de peso de los animales (Rincón et al., 2022). Esta situación obliga a muchos productores a asumir variaciones en sus resultados y, en algunos casos, a incrementar los gastos en alimentación suplementaria.

De igual forma, estudios orientados a la sostenibilidad de la ganadería en zonas tropicales advierten que basar el sistema únicamente en el pastoreo extensivo puede reducir la eficiencia y hacer más frágil la producción frente a eventos climáticos desfavorables (Herrero et al., 2021). En este contexto, el uso de forraje verde hidropónico (FVH) se plantea como una alternativa que podría contribuir a mantener una oferta de alimento más constante, sin requerir la ampliación del área destinada a la actividad ganadera.

La elección de la Finca La Daniela se debe a que funciona bajo un esquema similar al que utilizan la mayoría de los ganaderos del piedemonte del Meta. No se trata de un modelo aislado o tecnificado en exceso, sino de una explotación representativa de la dinámica productiva de la zona. Por esta razón, lo que se observe en el estudio puede resultar útil para otros productores de Villavicencio y localidades cercanas que enfrentan condiciones parecidas.

En este sentido, el entorno donde se realiza la investigación aporta más que una simple ubicación geográfica. Las variaciones del clima, la dependencia casi total de las pasturas y la necesidad de mejorar los resultados en la ceba hacen pertinente revisar opciones como el forraje verde hidropónico dentro de este mismo sistema productivo.

5.4. Población y Muestra

La población objeto de estudio estuvo conformada por los 100 bovinos de ceba pertenecientes a la Finca La Daniela, ubicada en el corregimiento Pompeya del municipio de Villavicencio (Meta).

La muestra estuvo integrada por 20 bovinos, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por criterios, considerando animales con características similares de edad, peso inicial, condición corporal y estado sanitario, con el fin de reducir la variabilidad entre los tratamientos.

Los animales fueron distribuidos en dos grupos de diez (10) bovinos cada uno. El primer grupo correspondió al tratamiento control, el cual continuó con el sistema tradicional de alimentación de la finca, mientras que el segundo grupo recibió suplementación con forraje verde hidropónico (FVH), manteniendo las mismas condiciones de manejo, sanidad y pastoreo durante todo el período de evaluación.

5.5. Distribución Experimental

La muestra estuvo conformada por 20 bovinos de ceba, distribuidos en dos grupos de diez (10) animales cada uno, procurando que presentaran condiciones iniciales similares de edad, peso y condición corporal. Un grupo correspondió al tratamiento control, el cual continuó con el sistema tradicional de alimentación implementado en la finca, mientras que el segundo grupo recibió suplementación con forraje verde hidropónico (FVH), manteniendo las mismas condiciones de manejo, sanidad y disponibilidad de agua durante el período de evaluación.

Grupo Control (n = 10)

Grupo Experimental (n = 10)

La estructura de tratamientos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1

Distribución experimental y tratamientos aplicados

Grupo	Número de animales	Alimentación base	Suplementación adicional	Tratamiento diferencial
Control	10	Pasto sembrado en finca	Sal mineralizada	No recibe FVH
Experimental	10	Pasto sembrado en finca	Sal mineralizada	15 kg/día de tapete de FVH

5.5.1 Descripción del tratamiento experimental

El grupo experimental recibió diariamente 15 kg de forraje verde hidropónico, suministrado en forma de tapete completo, producido en la misma finca bajo condiciones controladas. Durante el período de evaluación se procuró mantener constante la cantidad suministrada y las condiciones de producción del forraje, con el fin de garantizar la uniformidad del tratamiento.

5.5.2 Duración del estudio

El período de evaluación fue de 90 días, tiempo durante el cual se registró el comportamiento de las variables productivas y económicas definidas para la investigación.

5.5.3 Control de las condiciones de la evaluación

Con el propósito de garantizar la comparabilidad entre los tratamientos, ambos grupos permanecieron bajo las mismas condiciones de manejo durante el período de estudio. Para ello, se mantuvieron constantes el sistema de pastoreo, el manejo sanitario, la disponibilidad de agua y las condiciones generales de la finca. Asimismo, los pesajes se realizaron al inicio y al final del período experimental utilizando el mismo procedimiento de medición.

5.6. Variables del Estudio

Para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación, se definieron variables productivas y económicas que permitieron evaluar el efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico (FVH) sobre el desempeño de los bovinos de ceba y determinar la viabilidad económica de su implementación en la Finca La Daniela.

La variable independiente correspondió a la inclusión del forraje verde hidropónico (FVH) como suplemento alimenticio, mientras que las variables dependientes estuvieron relacionadas con el desempeño productivo de los animales y los indicadores económicos utilizados para evaluar la conveniencia de implementar esta tecnología bajo las condiciones propias del sistema de producción

Tabla 2

Operacionalización de las variables de estudio

Objetivo específico	Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad de medida	Instrumento
Establecer el efecto de la suplementación con FVH sobre el desempeño productivo del ganado bovino de ceba.	Independiente	Inclusión de FVH	Presencia o ausencia del suplemento	Sí / No	Registro de tratamientos
	Dependiente productiva	Ganancia diaria de peso	(Peso final – Peso inicial) / días de evaluación	kg/día	Báscula ganadera y registros de campo
	Dependiente productiva	Peso final	Peso registrado al finalizar el período experimental	kg	Báscula ganadera
Determinar los costos	Dependiente	Costos de	Costos	COP	Matriz de costos y

Objetivo específico	Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad de medida	Instrumento
de implementación y operación del sistema de producción de FVH.	económica	producción del FVH	de infraestructura, insumos y operación		registros contables
	Dependiente económica	Costo de alimentación	Costo total de alimentación por animal	COP/animal	Registros financieros
Evaluar la viabilidad económica de la implementación del FVH.	Dependiente económica	Ingreso por venta	Valor comercial estimado del bovino al finalizar el estudio	COP	Registros de comercialización
	Dependiente económica	Margen bruto	Ingresos – Costos variables	COP	Matriz financiera
	Dependiente económica	Rentabilidad	(Utilidad neta / Costo total) $\times 100$	%	Matriz financiera

5.7. Modelo de Análisis de Datos

La información recopilada durante el período de evaluación fue organizada y procesada en una base de datos utilizando Microsoft Excel, con el propósito de facilitar su análisis estadístico y económico. Inicialmente se realizó una revisión de los registros para verificar la consistencia de la información obtenida y corregir posibles errores de digitación antes de iniciar el procesamiento de los datos.

Posteriormente, se desarrolló un análisis estadístico descriptivo e inferencial para evaluar el comportamiento de las variables productivas entre el grupo control y el grupo suplementado con forraje verde hidropónico (FVH). De manera complementaria, se efectuó un análisis económico mediante la estimación de los costos de producción, los ingresos y los indicadores de rentabilidad, con el fin de determinar la viabilidad económica de la implementación del FVH en el sistema de producción bovina evaluado.

5.7.1 Análisis estadístico descriptivo

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de las variables productivas mediante el cálculo de medidas de tendencia central y dispersión, incluyendo la media, la desviación

estándar, así como los valores mínimos y máximos. Estos indicadores permitieron caracterizar el comportamiento de los grupos evaluados durante el período de estudio.

5.7.2 *Análisis estadístico inferencial*

Con el propósito de determinar la existencia de diferencias entre los tratamientos, se verificó previamente el cumplimiento de los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Posteriormente, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, con el fin de comparar las medias de las variables productivas evaluadas entre el grupo control y el grupo suplementado con forraje verde hidropónico.

5.7.3 *Análisis económico*

La evaluación económica se realizó mediante la estimación de los costos asociados a la producción del forraje verde hidropónico, incluyendo infraestructura, insumos, mano de obra y costos operativos. Asimismo, se determinaron el costo de alimentación por animal, el ingreso bruto, el margen bruto y la rentabilidad de cada tratamiento, utilizando las siguientes expresiones:

Ingreso Bruto (IB):

$$IB = \text{Peso final (kg)} \times \text{Precio de venta (COP/kg)}$$

Costo Total (CT):

$$CT = \text{Costos de alimentación} + \text{Costos operativos}$$

Margen Bruto (MB):

$$MB = \text{Ingreso Bruto} - \text{Costo Total}$$

Rentabilidad (R):

$$R(\%) = \left(\frac{\text{Margen Bruto}}{\text{Costo Total}} \right) \times 100$$

Los indicadores obtenidos permitieron comparar el desempeño económico de los tratamientos y determinar la viabilidad de la implementación del forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio en bovinos de ceba bajo las condiciones de la Finca La Daniela.

6. Resultados

6.1. Caracterización inicial de los grupos experimentales

Antes de iniciar el período experimental se verificó que los bovinos seleccionados presentaran características iniciales comparables en cuanto a peso, edad y condición corporal. Esta verificación fue fundamental para garantizar que las diferencias observadas al finalizar el estudio estuvieran asociadas a la suplementación con forraje verde hidropónico (FVH) y no a variaciones previas entre los animales.

La **Tabla 3** presenta las características generales del ensayo, incluyendo el número de animales por tratamiento, la duración del período de evaluación y las condiciones generales de manejo implementadas durante la investigación.

Tabla 3

Características generales del ensayo

Variable	Grupo Control	Grupo Experimental
Número de animales	10	10
Peso inicial promedio	320 kg	320 kg
Duración del ensayo	90 días	90 días
Alimentación	Pasto + sal + agua	Pasto + sal + agua +15kg/día FVH
GDP (ganancia diaria de peso)	0,86 kg /día	1,26 kg /día

Como se observa, ambos tratamientos estuvieron conformados por diez bovinos manejados bajo las mismas condiciones de pastoreo, disponibilidad de agua y manejo sanitario durante los 90 días de evaluación. La única diferencia entre los grupos correspondió a la inclusión del forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio en el tratamiento experimental, lo que permitió evaluar de manera específica el efecto de esta estrategia sobre el desempeño productivo y económico de los animales.

Posteriormente, se realizó la caracterización inicial de los bovinos mediante el registro del peso promedio al inicio del estudio. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4*Caracterización inicial de los animales.*

Variable	Grupo Control (n=10)	Grupo Experimental (n=10)
Peso inicial promedio (kg)	318 ± 12,4	320 ± 11,8
Edad promedio (meses)	23 ± 1,3	22 ± 1,1
Condición corporal (1-5)	3,0	3,0

El peso inicial promedio registrado fue similar en ambos grupos experimentales, lo que evidencia condiciones de partidas comparables para el desarrollo del ensayo. Esta homogeneidad inicial permitió reducir la influencia de factores externos sobre los resultados obtenidos y facilitó la comparación objetiva del comportamiento productivo de los tratamientos durante el período experimental.

La comparación estadística de los pesos iniciales no evidenció diferencias significativas entre los grupos ($p > 0,05$), indicando que ambos tratamientos iniciaron el estudio bajo condiciones equivalentes.

En consecuencia, las diferencias observadas al finalizar el período de evaluación pueden atribuirse principalmente al efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico implementada durante la investigación.

6.2. Efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico sobre el desempeño productivo

Con el propósito de evaluar el efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico (FVH) sobre el desempeño productivo del ganado bovino de ceba, se analizaron indicadores como la ganancia diaria de peso, el peso final y el incremento de peso obtenido durante el período experimental. Estos indicadores permitieron comparar el comportamiento productivo del grupo suplementado frente al grupo alimentado mediante el sistema tradicional implementado en la Finca La Daniela.

6.2.1 Peso final de los bovinos

El peso final constituye uno de los principales indicadores utilizados para evaluar el desempeño productivo en bovinos de ceba, ya que refleja el efecto acumulado del manejo

alimenticio durante el período de evaluación. En este estudio, el peso final permitió establecer el impacto de la suplementación con forraje verde hidropónico sobre el crecimiento de los animales al finalizar los 90 días de seguimiento. La Tabla 5 presenta el peso promedio registrado para cada uno de los tratamientos evaluados.

Tabla 5

Desempeño productivo comparativo

Variable	Grupo Control	Grupo Experimental
Peso final promedio (kg)	397,4 ± 8,2	433,4 ± 9,8
Ganancia total (kg)	77,4 kg	113,4 kg
Ganancia diaria (kg/día)	0,86 ± 0,09	1,26 ± 0,11
Conversión alimenticia estimada	7,2:1*	8,5:1*

Los resultados evidenciaron que los bovinos suplementados con forraje verde hidropónico alcanzaron un peso final promedio de 433,4 kg, mientras que los animales del grupo control registraron un promedio de 397,4 kg. La diferencia observada entre ambos tratamientos fue de 36,0 kg por animal, lo que indica un mayor crecimiento en los bovinos que recibieron el suplemento alimenticio durante el período experimental.

Este comportamiento permitió evidenciar que la suplementación con forraje verde hidropónico favoreció el incremento del peso corporal de los animales evaluados, manteniendo las mismas condiciones de manejo, sanidad y pastoreo para ambos grupos.

La comparación estadística mediante la prueba t de Student para muestras independientes evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$), indicando que el mayor peso final alcanzado por el grupo suplementado estuvo asociado al tratamiento aplicado durante la investigación.

6.2.2 Ganancia diaria de peso

La ganancia diaria de peso representa uno de los indicadores más utilizados para evaluar la eficiencia productiva en sistemas de ceba bovina, debido a que permite cuantificar la velocidad de crecimiento de los animales durante un período determinado.

Tabla 6*Ganancia de peso obtenida durante el período experimental*

Tratamiento	Ganancia diaria de peso (kg/día)	Duración (días)	Ganancia total (kg/animal)
Control	0,86	90	77,4
Experimental (FVH)	1,26	90	113,4

La Tabla 6 presenta la ganancia de peso obtenida por los animales durante los 90 días de evaluación.

Los bovinos suplementados con forraje verde hidropónico alcanzaron una ganancia diaria promedio de 1,26 kg, superior a la registrada por el grupo control (0,86 kg/día). Como consecuencia, la ganancia total de peso por animal fue de 113,4 kg para el grupo experimental y de 77,4 kg para el grupo control.

Estos resultados evidencian un mayor desempeño productivo de los animales suplementados, reflejado en una mayor acumulación de peso durante el período experimental.

Tabla 7*Peso promedio de los bovinos al inicio y al final del período experimental*

Grupo	Peso inicial	Ganancia total	Peso final
Control	320 kg	77,4 kg	397,4
Experimental (FVH)	320 kg	113,4 kg	434 ,4

La Tabla 7 presenta el comportamiento del peso promedio de los animales durante el período de evaluación.

Los bovinos suplementados con forraje verde hidropónico alcanzaron un peso final promedio de 433,4 kg, mientras que los animales del grupo control registraron 397,4 kg, lo que representa una diferencia de 36 kg por animal al finalizar el estudio.

La prueba t de Student para muestras independientes evidenció diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos ($p < 0,05$), indicando que el incremento de peso observado estuvo asociado a la suplementación con forraje verde hidropónico.

Tabla 8*Incremento productivo obtenido mediante la suplementación con forraje verde hidropónico*

Concepto	Resultado
Ganancia adicional por animal	36 kg
Ganancia adicional total (10 animales)	360 kg
Incremento porcentual de GDP	46,5 %

Con base en los resultados obtenidos se estimó el efecto productivo generado por la suplementación con forraje verde hidropónico.

Como se observa en la Tabla 8, el grupo experimental obtuvo un incremento adicional de 36 kg por animal, equivalente a 360 kg para el total de los diez bovinos evaluados. Asimismo, la ganancia diaria de peso fue 46,5 % superior respecto al sistema tradicional de alimentación.

Estos resultados permiten evidenciar el efecto favorable de la suplementación con forraje verde hidropónico sobre el crecimiento de los animales durante el período de evaluación.

6.3. Costos de implementación y operación del sistema de producción de forraje verde hidropónico

Con el propósito de dar cumplimiento al segundo objetivo específico de la investigación, se evaluaron los costos asociados a la implementación y operación del sistema de producción de forraje verde hidropónico (FVH) utilizado como suplemento alimenticio en bovinos de ceba. El análisis permitió identificar los recursos requeridos para el establecimiento del sistema y los costos generados durante el período experimental, comparándolos con los costos del sistema tradicional de alimentación utilizado en la Finca La Daniela.

Para facilitar el análisis, los costos se clasificaron en dos componentes: costos de implementación, correspondientes a la inversión inicial necesaria para la construcción del sistema hidropónico, y costos de operación, relacionados con la producción del forraje verde hidropónico durante los 90 días de evaluación. Posteriormente, los costos operativos del sistema con FVH fueron comparados con los del sistema tradicional de alimentación, con el fin de identificar las diferencias económicas entre ambas alternativas y generar la información base para el análisis de la viabilidad económica.

6.3.1 Costos de implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico

La implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico (FVH) requirió una inversión inicial destinada a la construcción de la infraestructura necesaria para la producción del suplemento alimenticio. Esta inversión corresponde a un costo fijo, el cual hace posible el funcionamiento del sistema y puede distribuirse en varios ciclos de producción, disminuyendo su incidencia económica a medida que aumenta el tiempo de utilización de la infraestructura.

La Tabla 9 presenta la inversión realizada para el establecimiento del sistema hidropónico utilizado durante el desarrollo de la investigación.

Tabla 9

Inversión en el sistema hidropónico

Concepto	Valor
Sistema hidropónico artesanal	\$450.000

Como se observa en la Tabla 9, la inversión inicial requerida para la implementación del sistema fue de \$450.000, valor correspondiente a la construcción del sistema hidropónico artesanal empleado para la producción del forraje verde hidropónico. Debido a que esta infraestructura puede utilizarse durante varios ciclos productivos, su costo no fue considerado dentro de los costos operativos del período evaluado, sino como una inversión inicial del proyecto.

6.3.2 Costos de operación del sistema de producción de forraje verde hidropónico

Los costos de operación corresponden a los recursos necesarios para mantener la producción continua del forraje verde hidropónico durante el período experimental. En este estudio, el principal costo variable estuvo representado por la adquisición de semilla de maíz, utilizada como materia prima para la producción diaria del suplemento alimenticio. La Tabla 10 presenta los costos unitarios de producción del forraje verde hidropónico.

Tabla 10*Costos de operación para la producción del forraje verde hidropónico*

Concepto	Valor
Precio bulto maíz (50 kg)	\$70.000
Costo por kg de semilla	\$1.400
Semilla usada por bandeja	2 kg
Producción por bandeja	15 kg FVH
Costo por bandeja	\$2.800

Los resultados muestran que cada bandeja de producción requirió 2 kg de semilla de maíz, con un costo unitario de \$2.800. Cada bandeja produjo aproximadamente 15 kg de forraje verde hidropónico, cantidad suficiente para suplir el consumo diario de un animal durante el período de evaluación. Con base en este consumo, cada bovino recibió una bandeja diaria durante los 90 días del ensayo, generando un costo de producción de \$252.000 por animal. Para el grupo experimental conformado por diez bovinos, el costo total de producción del forraje verde hidropónico fue de \$2.520.000, constituyéndose en el principal componente de los costos operativos del sistema.

La mano de obra no fue incorporada como un costo adicional exclusivo del sistema de forraje verde hidropónico, debido a que las actividades fueron desarrolladas por personal vinculado previamente a la operación habitual de la finca. En consecuencia, este rubro fue considerado un costo común a ambos tratamientos y no se incluyó dentro del análisis incremental de la suplementación con FVH.

6.3.3 Comparación de costos entre el sistema tradicional y el sistema con forraje verde hidropónico

Con el fin de responder al segundo objetivo específico de la investigación, se realizó una comparación entre los costos operativos del sistema tradicional de alimentación y aquellos asociados a la implementación del forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio.

Tabla 11*Estructura comparativa de costos por tratamientos*

Concepto	Sistema tradicional	Sistema con FVH
Sal mineralizada	\$153.000	\$153.000
Producción de FVH	\$0	\$2.520.000
Costo operativo total	\$153.000	\$2.673.000

Los resultados evidencian que el sistema tradicional presentó un costo operativo de \$153.000, correspondiente únicamente al suministro de sal mineralizada durante el período experimental. Por su parte, el sistema suplementado con forraje verde hidropónico alcanzó un costo operativo de \$2.673.000, valor integrado por el costo de producción del forraje (\$2.520.000) y el suministro de sal mineralizada (\$153.000).

Es importante precisar que la inversión inicial correspondiente a la construcción del sistema hidropónico (\$450.000) no fue incorporada dentro de los costos operativos utilizados para esta comparación, debido a que corresponde a un activo fijo cuya vida útil supera el período de evaluación de la investigación. Por esta razón, dicho valor fue considerado únicamente como inversión inicial del proyecto y no como un costo de operación del ciclo productivo analizado.

En términos generales, la incorporación del forraje verde hidropónico implicó un incremento en los costos operativos respecto al sistema tradicional de alimentación. No obstante, este aumento en la inversión debe analizarse juntamente con los beneficios productivos y económicos obtenidos, aspecto que se desarrolla en el siguiente apartado mediante la evaluación de la viabilidad económica del sistema.

Con el fin de consolidar la inversión requerida para la implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico, se integraron los costos correspondientes a la producción del forraje durante el período experimental y la inversión inicial en la infraestructura utilizada para su establecimiento. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12*Costos totales*

Concepto	Valor
Producción FVH	\$2.520.000
Infraestructura del sistema hidropónico	\$450.000
Costo total	\$2.970.000

La inversión total requerida para la implementación del sistema fue de \$2.970.000, de los cuales el 84,8 % correspondió a los costos de producción del forraje verde hidropónico durante el período de evaluación y el 15,2 % a la construcción de la infraestructura del sistema hidropónico. Esta distribución evidencia que la mayor participación en la inversión estuvo asociada a la producción continua del suplemento alimenticio, mientras que la infraestructura representó una proporción menor del costo total del proyecto. Es importante señalar que la infraestructura constituye una inversión de carácter permanente, por lo que su costo puede amortizarse durante varios ciclos de producción, reduciendo progresivamente su incidencia sobre el costo total del sistema en el largo plazo.

6.4. Viabilidad económica de la implementación del forraje verde hidropónico

La evaluación de la viabilidad económica permitió determinar si la implementación del forraje verde hidropónico (FVH) como suplemento alimenticio constituye una alternativa económicamente conveniente para el sistema de producción bovina evaluado. Para ello, se analizaron indicadores financieros como el ingreso bruto, el margen bruto, la utilidad neta, la rentabilidad y el punto de equilibrio, con el propósito de establecer si los beneficios económicos derivados del incremento en el desempeño productivo compensan los costos adicionales asociados a la implementación del sistema.

6.4.1 Ingreso bruto generado por la suplementación con FVH

El incremento en el peso de los bovinos suplementados con forraje verde hidropónico generó un mayor ingreso económico respecto al sistema tradicional de alimentación. Este valor fue estimado considerando la diferencia de peso obtenida entre ambos tratamientos y el precio de comercialización vigente para el kilogramo de ganado en pie durante el período de evaluación. La Tabla 13 presenta el ingreso bruto adicional obtenido como resultado de la suplementación con forraje verde hidropónico.

Tabla 13*Ingreso bruto generado por la suplementación con FVH*

Concepto	Valor
Ganancia adicional del grupo experimental	360 kg
Precio de venta (COP/kg)	\$10.500
Ingreso bruto adicional	\$3.780.000

Como se observa en la Tabla 13, el mayor incremento de peso alcanzado por los bovinos suplementados con forraje verde hidropónico permitió generar un ingreso bruto adicional de \$3.780.000 durante el período experimental. Este resultado evidencia que el aumento en el desempeño productivo obtenido mediante la suplementación se tradujo en un mayor valor económico al momento de la comercialización de los animales.

6.4.2 Margen bruto

El margen bruto representa el beneficio económico obtenido después de descontar los costos variables asociados a la producción del forraje verde hidropónico. Este indicador permite evaluar la capacidad del sistema para generar excedentes económicos derivados de la suplementación alimenticia. La Tabla 14 presenta el margen bruto obtenido durante el período experimental.

Tabla 14*Margen bruto del sistema suplementado con FVH*

Concepto	Valor
Ingreso bruto adicional	\$3.780.000
Costos variables del FVH	\$2.520.000
Margen bruto	\$1.260.000
Margen bruto por animal	\$126.000

Los resultados muestran que el sistema generó un margen bruto de \$1.260.000, equivalente a \$126.000 por animal. Esto indica que los ingresos obtenidos por el incremento de peso superaron los costos variables asociados a la producción del forraje verde hidropónico, generando un beneficio económico positivo durante el período de evaluación.

6.4.3 Utilidad neta

La utilidad neta se determinó considerando tanto los costos variables de producción del forraje como la inversión inicial correspondiente a la infraestructura del sistema hidropónico. La Tabla 15 presenta la utilidad neta obtenida durante el estudio.

Tabla 15

Utilidad neta del sistema de producción de FVH

Concepto	Valor
Ingreso bruto adicional	\$3.780.000
Costos totales	\$2.970.000
Utilidad neta	\$810.000

La utilidad neta obtenida fue de \$810.000, resultado que evidencia que los ingresos adicionales generados por el incremento del peso de los animales fueron suficientes para cubrir tanto los costos de producción del forraje como la inversión inicial requerida para la implementación del sistema hidropónico.

6.4.4 Rentabilidad

La rentabilidad constituye un indicador que permite establecer el retorno económico generado por la inversión realizada en el sistema de producción de forraje verde hidropónico. La Tabla 16 presenta el porcentaje de rentabilidad obtenido durante el período experimental.

Tabla 16

Rentabilidad del grupo experimental (FVH)

Indicador	Valor
Rentabilidad	27,3 %

El análisis evidenció una rentabilidad de 27,3 %, indicando que la implementación del forraje verde hidropónico generó un retorno económico positivo durante el período de evaluación. Este resultado refleja que la inversión realizada permitió recuperar los costos asociados a la producción del suplemento y obtener un beneficio económico adicional.

6.4.5 Punto de equilibrio

El punto de equilibrio permitió determinar la cantidad mínima de producción adicional requerida para recuperar la inversión realizada en la implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico. La Tabla 17 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 17

Punto de equilibrio del sistema de producción de FVH

Concepto	Valor
Punto de equilibrio	282,86 kg
Producción adicional obtenida	360 kg
Excedente sobre el punto de equilibrio	77,14 kg

El sistema alcanzó una producción adicional de 360 kg, superando el punto de equilibrio en 77,14 kg. Este resultado indica que el incremento de peso obtenido durante el período experimental fue suficiente para recuperar la inversión realizada y generar beneficios económicos adicionales bajo las condiciones evaluadas.

6.5. Síntesis de Resultados

Esta síntesis de resultados permite analizar de manera completa el cumplimiento del objetivo general de la investigación. La implementación del Forraje Verde Hidropónico (FVH) como suplemento alimenticio para el ganado de ceba en la finca la Daniela representa un cambio de paradigma frente a los sistemas de pastoreo tradicionales en el piedemonte llanero. A lo largo de la investigación, se ha evidenciado que el FVH no es solo una solución técnica ante la variabilidad climática, sino un factor determinante en la aceleración de los ciclos productivos.

El grupo de animales suplementado alcanzó una ganancia diaria de peso de 1,26 kg, superando notablemente los 0,86 kg del grupo control, lo que equivale a un crecimiento un 46,51% más rápido. Este rendimiento biológico superior se sustenta en la alta digestibilidad del forraje joven y su capacidad para mejorar la conversión alimenticia, permitiendo que el ganado aproveche con mayor eficacia cada kilogramo de alimento ingerido.

Sin embargo, el éxito de un proyecto agropecuario no se mide exclusivamente por la acumulación de biomasa o el peso vivo, sino por la robustez de su estructura de costos y su rentabilidad final. Aquí es donde el Capítulo 9: Resultados, y específicamente el subcapítulo del componente financiero, adquiere una relevancia crítica. El análisis económico revela una paradoja común en la adopción de nuevas tecnologías: mientras que el desempeño productivo mejora significativamente, los márgenes porcentuales enfrentan presiones debido a la estructura de costos operativos.

El análisis financiero del proyecto se estructuró bajo cuatro indicadores fundamentales: costos de producción, ingresos brutos, margen bruto y rentabilidad comparativa. Al contrastar ambos modelos, se observa que el sistema con FVH genera un margen bruto superior por unidad animal. Esto se debe a que el mayor peso final obtenido compensa el incremento en los gastos de suplementación, permitiendo que cada animal aporte una utilidad neta más alta al cierre del ciclo de engorde.

No obstante, un hallazgo crucial del componente financiero es que el porcentaje de rentabilidad del sistema experimental resultó ligeramente menor al del sistema tradicional. Esta aparente contradicción se explica por la magnitud de la inversión inicial y los costos recurrentes.

La producción de FVH introduce gastos que no existen en el pastoreo extensivo: Semillas de Alta Calidad: Representan un costo variable constante, ya que se requiere una germinación uniforme para mantener la oferta de biomasa. Mano de Obra Especializada: A diferencia del pastoreo, el sistema hidropónico demanda personal capacitado para el control de variables ambientales (temperatura y humedad), así como para las labores diarias de siembra, riego y cosecha. Costos Operativos (Agua y Energía): El mantenimiento de las instalaciones y el consumo de recursos para el riego y la iluminación artificial representan egresos que deben ser optimizados para no erosionar el beneficio económico.

A pesar de que la rentabilidad porcentual inicial sea más ajustada, el análisis financiero sugiere que la viabilidad del FVH debe interpretarse bajo una visión de estabilidad y resiliencia. En regiones como el Meta, donde la estacionalidad forrajera puede reducir drásticamente la oferta de pasto, el FVH actúa como un "seguro" de producción. El costo adicional de la infraestructura se justifica al eliminar las pérdidas asociadas a la pérdida de peso de los animales durante las épocas de sequía, un factor que a menudo no se contabiliza en los sistemas tradicionales pero que destruye la rentabilidad a largo plazo.

El componente financiero del proyecto en la Finca La Daniela demuestra que la implementación del FVH es económicamente viable, siempre y cuando se logre una optimización rigurosa de los recursos. La mayor ganancia de peso permite reducir el tiempo de permanencia del ganado en la finca, lo que aumenta la rotación de inventarios y, en última instancia, mejora la eficiencia del capital invertido. La investigación subraya que para que esta tecnología sea competitiva, el productor debe pasar de un manejo empírico a una administración empresarial agropecuaria, donde cada gramo de semilla y cada litro de agua se traduzcan directamente en rentabilidad monetaria.

Con base en lo anterior, se puede validar la viabilidad técnica y el acierto estratégico de la suplementación con Forraje Verde Hidropónico en la ganadería de ceba intensiva. En primera instancia, se concluye que el FVH rompe con las limitaciones nutricionales inherentes al pastoreo tradicional estacional, permitiendo un aprovechamiento metabólico superior que maximiza la expresión del potencial genético de los animales. El incremento exponencial en la ganancia diaria de peso (de 0,86 kg a 1,26 kg) demuestra que la palatabilidad, digestibilidad y densidad de nutrientes del forraje hidropónico aceleran significativamente los ciclos de engorde, permitiendo que los animales alcancen pesos de faena óptimos en un menor horizonte temporal.

7. Discusión

7.1. El efecto del forraje verde hidropónico sobre el desempeño productivo

Los resultados obtenidos durante el período experimental evidenciaron que la suplementación con forraje verde hidropónico (FVH) favoreció el desempeño productivo de los bovinos de ceba evaluados en la Finca La Daniela. Los animales suplementados alcanzaron una ganancia diaria de peso superior a la del grupo alimentado mediante el sistema tradicional, lo que se reflejó en un mayor peso final al concluir los 90 días de evaluación. Estos hallazgos indican que la incorporación del FVH como suplemento alimenticio constituye una alternativa capaz de mejorar el crecimiento de los animales bajo las condiciones propias de la ganadería tropical.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado por Naik et al. (2023), quienes señalan que el forraje verde hidropónico constituye un suplemento con adecuada disponibilidad de nutrientes y elevada digestibilidad, favoreciendo incrementos en la ganancia diaria de peso cuando se utiliza como complemento de dietas basadas en pastoreo. De igual manera, Kebede et al. (2023) indican que la suplementación estratégica con forrajes de alta calidad nutricional permite mejorar el desempeño productivo de bovinos de ceba, especialmente durante períodos en los cuales la disponibilidad de pasturas disminuye como consecuencia de la variabilidad climática.

Aunque en esta investigación no se realizó un análisis bromatológico del forraje producido, el mayor crecimiento observado en los animales suplementados sugiere que el FVH aportó nutrientes suficientes para complementar la dieta basada en pastoreo. Este comportamiento coincide con lo descrito por Graamans et al. (2021), quienes destacan que el forraje hidropónico presenta una alta disponibilidad de nutrientes durante las primeras etapas de desarrollo vegetal, condición que favorece su utilización como suplemento alimenticio.

Los resultados también permiten evidenciar que el FVH puede contribuir a reducir uno de los principales problemas de los sistemas ganaderos tropicales: la disminución en la disponibilidad y calidad del forraje durante las épocas de sequía. En regiones como el departamento del Meta, donde la producción bovina depende principalmente del pastoreo, disponer de una fuente complementaria de alimento producida bajo condiciones controladas

representa una alternativa que puede contribuir a estabilizar el crecimiento de los animales durante los períodos críticos del año.

Sin embargo, es importante considerar que la respuesta productiva observada corresponde a las condiciones específicas de una explotación ganadera ubicada en Villavicencio y a un período experimental de 90 días. Variables como la genética del ganado, el manejo sanitario, la calidad de las pasturas y las condiciones ambientales pueden influir sobre la magnitud de la respuesta obtenida, razón por la cual los resultados deben interpretarse dentro del contexto particular en el que fue desarrollada la investigación.

7.2. Implicaciones económicas de la implementación del forraje verde hidropónico

El análisis económico realizado permitió establecer que la implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico implicó un incremento en los costos de alimentación respecto al sistema tradicional, debido principalmente a la producción continua del suplemento durante el período experimental. No obstante, dicho incremento fue compensado por el mayor peso alcanzado por los animales suplementados, lo que permitió obtener ingresos adicionales suficientes para generar una utilidad neta positiva.

Los resultados evidenciaron que el mayor componente de los costos correspondió a la producción del forraje verde hidropónico, mientras que la infraestructura representó una proporción relativamente baja de la inversión total. Este comportamiento coincide con lo reportado por Morales et al. (2021), quienes indican que la rentabilidad de los sistemas hidropónicos depende principalmente de los costos asociados a la producción continua del suplemento y no de la infraestructura utilizada para su establecimiento, debido a que esta última puede amortizarse durante varios ciclos de producción.

La rentabilidad obtenida durante el estudio demuestra que, bajo las condiciones evaluadas, la incorporación del FVH permitió recuperar la inversión realizada y generar un beneficio económico adicional. Estos resultados son coherentes con Costa et al. (2022), quienes señalan que la viabilidad económica de este tipo de tecnologías depende de la capacidad del incremento en el desempeño productivo para compensar los costos adicionales derivados de la suplementación.

De igual forma, el análisis del punto de equilibrio mostró que la producción adicional obtenida durante el ensayo fue suficiente para superar la cantidad mínima requerida para recuperar la inversión realizada. Este resultado indica que, bajo las condiciones técnicas y económicas evaluadas, la implementación del FVH puede constituir una alternativa económicamente viable para explotaciones ganaderas con características similares a las de la Finca La Daniela.

No obstante, la rentabilidad observada no debe interpretarse como un resultado aplicable de manera general a todos los sistemas de producción bovina. Factores como el precio de la semilla, el costo de los insumos, el valor de comercialización del ganado, la escala de producción y las condiciones de manejo pueden modificar significativamente los indicadores económicos obtenidos. Por esta razón, la adopción del FVH debe sustentarse en análisis económicos específicos para cada unidad productiva.

7.3. Aporte del forraje verde hidropónico a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos

Además de los beneficios productivos y económicos identificados en esta investigación, la utilización del forraje verde hidropónico representa una estrategia que puede contribuir a fortalecer la sostenibilidad de los sistemas ganaderos tropicales. Su producción bajo condiciones controladas reduce la dependencia de la variabilidad climática y permite disponer de alimento fresco durante períodos en los cuales la oferta de pasturas disminuye considerablemente.

Diversos estudios han señalado que la producción hidropónica de forrajes requiere menores cantidades de agua y superficies reducidas en comparación con los sistemas tradicionales de producción de biomasa vegetal (Graamans et al., 2021; Elghandour et al., 2022). Estas características resultan particularmente relevantes para regiones donde la disponibilidad hídrica presenta una marcada estacionalidad y donde la expansión de las áreas destinadas a la producción de forraje se encuentra limitada por factores ambientales y económicos.

En el contexto del departamento del Meta, la incorporación del FVH puede contribuir a incrementar la resiliencia de los sistemas ganaderos frente a los efectos de la variabilidad climática, proporcionando una fuente complementaria de alimento que reduce la dependencia exclusiva del pastoreo. Aunque el FVH no reemplaza completamente las pasturas tradicionales, su utilización estratégica durante los períodos críticos puede favorecer una mayor estabilidad en

el crecimiento de los animales y disminuir las pérdidas productivas asociadas a la escasez de forraje.

Desde la perspectiva de la administración de empresas agropecuarias, los resultados obtenidos evidencian que la adopción de tecnologías como el forraje verde hidropónico debe analizarse considerando simultáneamente aspectos técnicos, económicos y ambientales. Esta visión integral facilita la toma de decisiones por parte de los productores y favorece la implementación de estrategias orientadas a mejorar la competitividad y sostenibilidad de los sistemas de producción bovina.

7.4. Limitaciones del estudio y perspectivas de investigación

Los resultados obtenidos deben interpretarse considerando las limitaciones propias del diseño metodológico empleado. La investigación se desarrolló en una única unidad productiva, utilizando una muestra de veinte bovinos durante un período experimental de 90 días. Aunque estas condiciones permitieron evaluar el comportamiento productivo y económico de la suplementación con FVH, los resultados no pueden generalizarse a todos los sistemas ganaderos sin considerar las particularidades de cada explotación.

Asimismo, la investigación se centró en indicadores productivos y económicos, sin incluir análisis bromatológicos del forraje producido ni evaluaciones relacionadas con la calidad de la canal, parámetros fisiológicos o indicadores reproductivos. La incorporación de estas variables permitiría ampliar el conocimiento sobre los efectos del FVH en sistemas de producción bovina.

Para futuras investigaciones se recomienda evaluar la implementación del forraje verde hidropónico durante períodos de mayor duración, incorporar un mayor número de animales y comparar diferentes niveles de suplementación, con el fin de establecer la dosis más eficiente desde el punto de vista productivo y económico. Igualmente, resulta pertinente desarrollar estudios que integren indicadores ambientales, como el uso eficiente del agua y la reducción de emisiones asociadas a la producción de alimento, fortaleciendo así la evaluación integral de esta tecnología dentro de los sistemas ganaderos tropicales.

8. Conclusiones

La presente investigación permitió evaluar el efecto de la suplementación con forraje verde hidropónico (FVH) sobre el desempeño productivo y la viabilidad económica de un sistema de ganado bovino de ceba en la Finca La Daniela, ubicada en la vereda Pompeya del municipio de Villavicencio. Con base en los resultados obtenidos y su respectiva discusión, se establecen las siguientes conclusiones:

1. La suplementación con forraje verde hidropónico incrementó el desempeño productivo de los bovinos de ceba evaluados, evidenciado en una mayor ganancia diaria de peso y un mayor peso final respecto al sistema tradicional de alimentación. Los animales suplementados alcanzaron una ganancia diaria de 1,26 kg, frente a 0,86 kg del grupo control, lo que representó un incremento del 46,5 %, confirmando el efecto favorable del FVH sobre el crecimiento de los animales.

2. La inclusión del forraje verde hidropónico permitió obtener un incremento promedio de 36 kg por animal durante el período experimental, equivalente a 360 kg adicionales para el grupo suplementado. Este resultado demuestra que el FVH constituye una alternativa eficiente para complementar la alimentación basada en pastoreo, especialmente en sistemas ganaderos donde la disponibilidad y calidad de las pasturas se ven afectadas por la variabilidad climática.

3. La implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico requirió una inversión inicial asociada a la construcción de la infraestructura y costos operativos derivados principalmente de la producción del suplemento alimenticio. El principal componente de los costos correspondió a la adquisición de semilla de maíz, mientras que la infraestructura representó una menor proporción de la inversión total y puede amortizarse durante varios ciclos de producción.

4. A pesar de que el sistema con forraje verde hidropónico presentó mayores costos de operación que el sistema tradicional de alimentación, los ingresos adicionales generados por el incremento en el peso de los animales permitieron obtener un margen bruto positivo, una utilidad neta favorable y una rentabilidad del 27,3 %, evidenciando la viabilidad económica del sistema bajo las condiciones evaluadas.

5. El análisis del punto de equilibrio demostró que la producción adicional obtenida durante el período experimental superó la cantidad mínima requerida para recuperar la inversión

realizada. Este resultado confirma que la suplementación con forraje verde hidropónico puede constituir una alternativa económicamente viable para explotaciones ganaderas con características similares a las de la Finca La Daniela.

6. Desde la perspectiva de la administración de empresas agropecuarias, la implementación del forraje verde hidropónico representa una estrategia que integra beneficios productivos, económicos y de sostenibilidad, al contribuir a reducir la dependencia de las pasturas tradicionales y fortalecer la capacidad de adaptación de los sistemas ganaderos frente a la variabilidad climática.

7. Los resultados obtenidos permiten concluir que el forraje verde hidropónico constituye una alternativa técnicamente factible y económicamente conveniente para complementar la alimentación de bovinos de ceba en condiciones similares a las evaluadas. No obstante, su adopción debe sustentarse en análisis económicos específicos para cada unidad productiva, considerando factores como la escala de producción, los costos de los insumos, la disponibilidad de mano de obra y las condiciones particulares de manejo.

9. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos durante la investigación, se plantean las siguientes recomendaciones para productores, investigadores y entidades relacionadas con el sector ganadero:

Se recomienda a los productores ganaderos evaluar la implementación del forraje verde hidropónico como complemento del sistema tradicional de alimentación, especialmente durante los períodos de menor disponibilidad de pasturas, con el fin de mejorar el desempeño productivo y mantener una oferta constante de alimento para el ganado.

Antes de implementar un sistema de producción de forraje verde hidropónico, es recomendable realizar un análisis técnico y económico que considere la inversión inicial, los costos de operación, la disponibilidad de mano de obra, la capacidad instalada y la escala de producción de cada explotación ganadera, con el propósito de garantizar la viabilidad del proyecto.

Se recomienda optimizar el proceso de producción del forraje verde hidropónico mediante el uso eficiente del agua, la selección de semillas de alta calidad y la implementación de buenas prácticas de manejo e higiene, con el fin de mejorar la productividad del sistema y reducir los costos operativos.

Para futuras investigaciones se sugiere desarrollar estudios con un mayor número de animales, diferentes niveles de suplementación y períodos de evaluación más prolongados, permitiendo validar los resultados obtenidos en diversos sistemas de producción bovina y condiciones agroecológicas.

Se recomienda incorporar en futuras investigaciones análisis bromatológicos del forraje verde hidropónico, evaluaciones de calidad de la canal, indicadores de conversión alimenticia, emisiones de gases de efecto invernadero y análisis de ciclo de vida, con el propósito de realizar una evaluación integral de esta tecnología desde las perspectivas productiva, económica y ambiental.

A partir de los hallazgos de este estudio, se aconseja evaluar la implementación del sistema de producción de forraje verde hidropónico en explotaciones ganaderas con altos costos de alimentación, especialmente en sistemas donde el uso de concentrados representa una proporción importante de los costos de producción. En estos casos, el FVH puede constituir una

alternativa complementaria que contribuya a mejorar la eficiencia productiva y la rentabilidad, siempre que se realice un análisis técnico y económico previo adaptado a las condiciones particulares de cada explotación.

Finalmente, se recomienda fortalecer los procesos de transferencia tecnológica y capacitación dirigidos a productores ganaderos del departamento del Meta, promoviendo la adopción de alternativas alimenticias sostenibles que contribuyan a mejorar la competitividad, la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas de producción bovina frente a los efectos de la variabilidad climática.

10. Referencias bibliográficas

- Arango, J., Ruden, A., Martínez-Barón, D., et al. (2020). Sistemas ganaderos sostenibles en trópico bajo latinoamericano. *Agricultural Systems*, 176, 102676. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102676>
- Arias, R. O., Muro, M. G., Marino, B., Trigo, M. S., Boyezuk, D., & Cordiviola, C. Á. (2019). Aporte nutricional del forraje verde hidropónico en cabras. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 118(1), 133–140. <https://doi.org/10.24215/16699513e013>
- Arrieta, A., Pardo, C., & Vélez, J. (2023). Sustainable livestock and environmental regulation in Latin America. *Journal of Environmental Management*, 326, 116757. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116757>
- Avgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2022). Indoor vertical farming in urban agriculture. *Sustainability*, 14(2), 663. <https://doi.org/10.3390/su14020663>
- Briceño, C., & Rodríguez, G. A. (2022). Desarrollo sostenible y Estado ecológico en la Constitución colombiana. *Revista de Derecho del Estado*, 52, 45–68. <https://doi.org/10.18601/01229893.n52.03>
- Capper, J. L., & Cady, R. A. (2020). The effects of improved performance in livestock on environmental impact. *Animal Frontiers*, 10(2), 14–22. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa008>
- Castillo-Castro, S. del S., & Chavarria-Torrez, A. (2018). Hydroponic green fodder as an alternative feed. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(8), 1032-1039. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i8.6716>
- Costa, M. P., Schoenmaker, G. J. W., van der Werf, H. M. G., et al. (2022). Environmental performance of beef production systems. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129833. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129833>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2022). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). Sage.
- Delis Hechavarría, E. A., Jiménez Jiménez, R., Estrada, M., & Gil González, G. I. (2025). Forraje verde hidropónico y follaje de morera como alternativas agroecológicas en alimentación bovina. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 16(1), e-1162. <https://doi.org/10.22579/22484817.1162>

- Elghandour, M. M. Y., et al. (2022). Hydroponic green fodder as a sustainable livestock feed: A review. *Animals*, 12(3), 299. <https://doi.org/10.3390/ani12030299>
- Elmulthum, N. A., Zeineldin, F. I., Al-Khateeb, S. A., Al-Barrak, K. M., Mohammed, T. A., Sattar, M. N., & Mohmand, A. S. (2023). *Water use efficiency and economic evaluation of the hydroponic versus conventional cultivation systems for green fodder production in Saudi Arabia*. *Sustainability*, 15(1), 822. <https://doi.org/10.3390/su15010822>
- Gómez, C. A., Molina, D., & Vargas, J. (2022). Food safety and livestock innovation in emerging economies. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100310>
- Gómez, J. A., Herrera, C., & Parra, D. (2022). Suplementación con forraje verde hidropónico en bovinos de carne en el Caribe colombiano. *Acta Agronómica*, 71(2), 142–150. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.98765>
- González, L., & Mejía, D. (2023). Environmental constitutionalism and climate governance in Colombia. *Sustainability*, 15(6), 5124. <https://doi.org/10.3390/su15065124>
- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2021). Plant factories versus greenhouses: Resource use efficiency. *Agricultural Water Management*, 160, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Mason-D'Croz, D., et al. (2021). Innovation can accelerate sustainable livestock transformation. *Nature Food*, 2, 498–500. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00302-1>
- Islam, M. R., Chowdhury, M. A., & Rahman, M. M. (2021). Nutritional evaluation of hydroponic maize fodder for ruminants. *Tropical Animal Health and Production*, 53, 347. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02758-2>
- Jini, D., Bam, J., Deori, S., Alone, R. A., & Angami, T. (2022). *Hydroponics fodder production for sustainable livestock husbandry in Arunachal Pradesh: A review*. *Indian Journal of Hill Farming*, 35(2), 127-131. <https://doi.org/10.56678/iahf-2022.35.02.18>
- Kebede, G., Feyera, T., & Tufa, T. (2023). Effects of dietary supplementation on growth performance of beef cattle: A review. *Animals*, 13(2), 280. <https://doi.org/10.3390/ani13020280>
- Krause, K. M., & Oetzel, G. R. (2021). Understanding ruminal fermentation and feed efficiency. *Journal of Dairy Science*, 104(5), 5570–5583. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19716>

- León, J. C., & Leiton, J. A. (2023). Forraje verde hidropónico en sistemas lecheros tropicales: una revisión aplicada. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 15(2), 1–12. <https://doi.org/10.24188/recia.v15.n2.2023.984>
- Lopes, S. A., Paulino, M. F., Valadares Filho, S. C., & Detmann, E. (2022). Nutritional strategies to improve feed efficiency in beef cattle. *Animal Production Science*, 62(10), 915–926. <https://doi.org/10.1071/AN21345>
- López, D., & Martínez, H. (2023). Eficiencia hídrica del forraje verde hidropónico en sistemas productivos colombianos. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 26(1), e2103. <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2103>
- Montgomery, D. C. (2021). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley.
- Moraes, E. H. B. K., Paulino, M. F., & Valadares Filho, S. C. (2021). Nutritional strategies for beef cattle production systems. *Animal Feed Science and Technology*, 273, 114818. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114818>
- Morales, J., Rodríguez, D., & García, L. (2021). Economic feasibility of hydroponic fodder systems in small-scale livestock production. *Agricultural Systems*, 190, 103095. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103095>
- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., & Tempio, G. (2022). Livestock feeding and sustainable intensification. *Global Food Security*, 33, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100634>
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B. (2011). Agroforestry and silvopastoral systems for climate mitigation. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9234-0>
- Naik, P. K., Swain, B. K., & Singh, N. P. (2023). Hydroponics technology for green fodder production: A review. *Indian Journal of Animal Sciences*, 93(2), 115–124. <https://doi.org/10.56093/ijans.v93i2.124567>
- Pastorelli, G., Serra, V., Turin, L., & Attard, E. (2023). Hydroponic fodders for livestock production: A review. *Annals of Animal Science*, 24(3), 645–656. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0075>
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., et al. (2022). Global assessment of agricultural system redesign. *Nature Sustainability*, 5, 915–923. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00914-0>

- Quispe, E. C., Cárdenas, F., & Rojas, M. (2022). Evaluación productiva del forraje verde hidropónico en bovinos de altura. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 33(2), e22341. <https://doi.org/10.15381/rivep.v33i2.22341>
- Ramírez, J. D., Castaño, L., & Beltrán, M. (2024). Análisis económico del forraje verde hidropónico en sistemas bovinos colombianos. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(1), 89–101. <https://doi.org/10.22490/21456453.5678>
- Rincón, A., Gómez, C., & Vargas, J. (2022). Seasonal variability and productivity of cattle systems in the Colombian Orinoquia. *Tropical Animal Health and Production*, 54, 305. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03215-0>
- Ríos, J. F., Peña, J., & Gutiérrez, E. (2023). Traceability systems in Latin American cattle production. *Animals*, 13(4), 654. <https://doi.org/10.3390/ani13040654>
- Rivera, A., Morán, J., & González, R. (2021). Producción de forraje verde hidropónico como alternativa para zonas áridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(3), 765–779. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5664>
- Rodríguez, L. F., & Rincón, A. (2021). Evaluación del forraje verde hidropónico en sistemas ganaderos tropicales colombianos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 13(1), 45–56. <https://doi.org/10.24188/recia.v13.n1.2021.827>
- Rodríguez, M., & Ramírez, L. (2022). Environmental governance and agricultural sustainability in Colombia. *Sustainability*, 14(9), 5382. <https://doi.org/10.3390/su14095382>
- Salo, T., Kaseva, J., & Mäkelä, P. (2022). Hydroponic fodder production systems and their potential for livestock feeding. *Agronomy*, 12(4), 879. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040879>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2022). Review of controlled environment agriculture and water productivity. *Agricultural Water Management*, 263, 107469. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107469>
- Silva, T. H., Costa, R. S., & Pereira, L. G. R. (2022). Experimental designs in animal nutrition trials. *Tropical Animal Health and Production*, 54, 112. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03078-5>
- Sneath, R., & McIntosh, F. (2022). Review of hydroponic fodder production for livestock feed. *Grass and Forage Science*, 77(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/gfs.12566>

- Szekely, I., & Jijakli, M. H. (2022). Bioponics as a Promising Approach to Sustainable Agriculture: *A Review of the Main Methods for Producing Organic Nutrient Solution for Hydroponics. Water*, 14(23), 3975. <https://doi.org/10.3390/w14233975>.
- Terefe, G., & Mengistu, G. (2022). Effect of feeding hydroponic fodders on the performance of dairy cattle and small ruminants: A review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 12(13), 20–27. <https://doi.org/10.7176/JBAH/12-13-03>
- Torres, A. M., Hernández, J., & Vargas, P. (2024). Growth performance indicators in beef cattle under controlled feeding systems. *Livestock Science*, 282, 105460. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105460>
- Torres, E., & Calderón, J. (2025). Innovación tecnológica y sostenibilidad en la ganadería colombiana: el rol del forraje verde hidropónico. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 38(1), 1–12.
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAinsh, M. (2021). Vertical farming increases crop yield and resource efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128055. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128055>
- Yahyaei, M., & Talebi, B. (2024). Hydroponic fodder for livestock production and productivity: A review. *Journal of Greenhouse Plant Production*, 1(3), 1–12. <https://doi.org/10.61186/GPPJ.1.3.1>

Anexos

A continuación de forma seguida se ilustrarán cada uno de los procesos para la obtención del forraje verde Hidropónico, en la Finca La Daniela.

Anexo 1 Montaje del sistema de producción de forraje verde hidropónico.



Anexo 2 Semillas listas para la muestra.



Anexo 3 Desarrollo inicial del cultivo.



Anexo 4 Desarrollo vegetativo del maíz en el sistema.



Anexo 5 Revisión de calidad y estado de la semilla.



Anexo 6 Inspección del crecimiento y uniformidad de los tapetes de FVH



Anexo 7 Monitoreo del desarrollo, humedad y calidad de los tapetes de FVH.



Anexo 8 Tapetes del forraje verde completamente desarrollados dentro de la Finca La Daniela



Anexo 9 Forraje de maíz en etapa final, suministrado en canecas para el consumo del ganado



Anexo 10 Recolección de la materia vegetal destinada al consumo final



Anexo 11 Observación del consumo eficiente del forraje debido a su alta palatabilidad

