



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA

Modelos de optimización de Producción Lechera en Uruguay

Informe de Proyecto de Grado presentado por

Guillermina Borges, Lucía Fernández, Emiliano Hernández, María
Eugenia Reverdito

en cumplimiento parcial de los requerimientos para la graduación de la carrera de Ingeniería de
Producción de Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República

Supervisores

Gastón Notte Kirichenko
Héctor Cancela, Pablo Chilibroste

Montevideo, 30 de mayo de 2025



Modelos de optimización de Producción Lechera en Uruguay por Guillermina Borges, Lucía Fernández, Emiliano Hernández, María Eugenia Reverdito tiene licencia [CC Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor, Gastón Notte, por su invaluable guía y dedicación a lo largo de este proyecto. Su acompañamiento, disposición y orientación fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de este trabajo, brindándonos apoyo y claridad en cada etapa del proceso.

Agradecemos a Pablo Chilibroste y Héctor Cancela por su generosidad al compartir su vasta experiencia y conocimientos, que enriquecieron nuestro enfoque y nos permitieron abordar los desafíos desde nuevas perspectivas.

Extendemos nuestro reconocimiento a todos los docentes y funcionarios de la facultad que nos han acompañado a lo largo de estos años. Su enseñanza y orientación han sido pilares clave en nuestra formación y en la realización de este proyecto.

Finalmente, a nuestras familias y amigos, por su constante apoyo, paciencia y aliento a lo largo de nuestra carrera. Su confianza en nosotros ha sido una fuente inagotable de motivación y fortaleza en cada paso de este camino.

Resumen

La producción lechera es una de las actividades agropecuarias más relevantes a nivel mundial, tanto por su aporte nutricional como por su rol en el desarrollo económico de numerosas regiones. La leche, reconocida por su alto valor biológico, constituye un alimento clave en la seguridad alimentaria global. En Uruguay, este sector ocupa un lugar fundamental dentro de la economía, con un impacto significativo en las exportaciones del país y en la generación de empleo rural.

Esta industria no solo aporta al crecimiento económico, sino que también promueve el desarrollo sostenible de comunidades locales. Sin embargo, enfrenta desafíos crecientes en términos de eficiencia productiva, rentabilidad y sostenibilidad ambiental. En particular, la presión sobre los sistemas agropecuarios por su impacto en el cambio climático y la calidad de los recursos naturales es cada vez más relevante. En este contexto, es fundamental contar con herramientas de planificación eficiente del uso de los recursos, especialmente en la asignación de alimento, ya que actualmente muchas de estas decisiones se toman de forma empírica, basadas en la experiencia del productor y prácticas tradicionales.

Este trabajo busca abordar dicha problemática mediante el desarrollo de modelos matemáticos de optimización orientados a evaluar distintas estrategias de producción, gestión del rodeo y asignación de recursos, integrando formalmente criterios productivos, económicos y ambientales. Para ello, se emplearon técnicas de programación matemática, específicamente Programación No Lineal Mixta.

Los modelos desarrollados representan, con distintos niveles de detalle, el funcionamiento de un tambo, incluyendo variables como la cantidad y tipo de vacas, las zonas de alimentación, los requerimientos energéticos, los costos operativos y las emisiones de metano entérico y nitrógeno. A su vez, se incorporaron restricciones ambientales que permiten analizar el impacto de estrategias orientadas a la mitigación de emisiones sin comprometer la viabilidad económica del sistema.

Los modelos fueron formulados en el lenguaje AMPL y resueltos a través del servidor de optimización NEOS. Estos fueron validados y aplicados a casos de estudio construidos con datos reales. A partir de ellos, se analizaron estrategias de manejo bajo distintos objetivos: la maximización de la producción de leche y del beneficio económico. Los resultados muestran que alimentar adecuadamente a cada vaca según sus requerimientos nutricionales es clave para evitar pérdidas significativas y que, en contextos de escasez, es más eficiente priorizar parte del rodeo que distribuir los recursos de manera insuficiente entre todos los animales. La suplementación estratégica y el ajuste del tamaño del rodeo también demostraron ser herramientas eficaces para estabilizar la producción y mejorar la rentabilidad.

Desde la perspectiva ambiental, los modelos permitieron evaluar el efecto de limitar las emisiones de metano entérico y la excreción de nitrógeno. Se comprobó que una mayor eficiencia alimentaria reduce las emisiones por litro de leche producido. No obstante, restricciones estrictas sobre la excreción de nitrógeno afectan negativamente tanto la producción como la eficiencia del sistema, lo que señala la necesidad de diseñar políticas ambientales equilibradas.

Se destaca que los modelos desarrollados son herramientas que facilitan la identificación de estrategias óptimas de manejo en sistemas lecheros. Su capacidad para integrar diversos criterios los convierte en un aporte valioso hacia una lechería más rentable, eficiente y ambientalmente sostenible.

Palabras clave: Programación Matemática, Producción Lechera, Optimización, Asignación de Recursos, Sustentabilidad, Impacto Ambiental.

Índice general

Glosario	IX
1. Introducción	1
2. Revisión de antecedentes	3
2.1. Sector Lechero	3
2.1.1. Antecedentes de la Industria Lechera en Uruguay	3
2.1.2. Producción Lechera en Uruguay	4
2.1.3. Perspectiva Económica	5
2.1.4. Perspectiva Social	5
2.1.5. Principales Desafíos y Oportunidades	6
2.2. Sistemas Lecheros	6
2.2.1. Métodos de Pastoreo	7
2.2.2. Requerimientos Energéticos del Ganado Lechero	7
2.2.3. Impacto ambiental del sector	8
2.3. Modelos Matemáticos de Optimización	11
2.3.1. Introducción a la Investigación de Operaciones	11
2.3.2. Programación Matemática	12
2.3.3. Modelos de optimización en la industria lechera	15
3. Descripción del problema	19
3.1. Enfoque propuesto para la resolución	20
3.2. Enfoque metodológico	20
3.3. Definición del problema	22
3.3.1. Dimensión Temporal	22
3.3.2. Zonas de Alimentación	22
3.3.3. Tipos de Vacas	22
3.3.4. Consumo Potencial	23
3.3.5. Requerimientos Energéticos	23
3.3.6. Energía Bruta y Disponible	23
3.3.7. Producción de Leche	24
3.3.8. Agrupación de los Animales	24
3.4. Formulación Matemática	24
3.4.1. Conjuntos y Parámetros	24
3.4.2. Variables	25
3.4.3. Restricciones	26
3.4.4. Determinación de la Función Objetivo	26
3.5. Validación del Modelo Base	27
3.6. Modelo con más de un lote	28
3.6.1. Validación del modelo base con más de un lote	29
3.7. Modelo con cantidad de vacas variables	29
3.7.1. Validación del modelo con vacas variables	30
3.8. Modelos con enfoque ambiental - Metano	30
3.8.1. Parámetros	31
3.8.2. Variables	31
3.8.3. Restricciones	31
3.8.4. Validación del modelo con enfoque ambiental - metano	32

3.9. Modelo con enfoque ambiental - Nitrógeno	32
3.9.1. Parámetros	32
3.9.2. Variables	32
3.9.3. Restricciones	33
3.9.4. Validación del modelo con enfoque ambiental - Nitrógeno	33
3.10. Implementación	33
4. Experimentación computacional	35
4.1. Definición de Casos de Estudio	35
4.2. Casos de Estudio	37
4.2.1. Caso de Estudio 1: Comparación de objetivos: producción vs. beneficio	38
4.2.2. Caso de Estudio 2: Evaluación e implicaciones de la gestión ineficiente de los recursos alimenticios	42
4.2.3. Caso de Estudio 3: Estrategias de inversión en suplementación	50
4.2.4. Caso de Estudio 4: Estrategias de reducción del tamaño y configuración del rodeo	53
4.2.5. Caso de Estudio 5: Comparación del beneficio económico: reducción del rodeo vs. inversión en suplementación	62
4.2.6. Caso de Estudio 6: Evaluación del impacto ambiental en la producción lechera: análisis de emisiones de metano y su relación con la rentabilidad del sistema	65
4.2.7. Caso de Estudio 7: Evaluación de limitaciones asociadas a nutrientes - Nitrógeno	75
4.2.8. Caso de Estudio 8: Sensibilidad del modelo económico con vacas variables al precio de la leche	77
4.2.9. Caso de Estudio 9: Análisis anual con disponibilidades de alimento estacionales	80
5. Conclusiones y Trabajo Futuro	85
5.1. Conclusiones	85
5.2. Trabajo Futuro	86
Anexo A: Validación	95
1. Validación de Asignación de Lotes a Zonas (Asignación)	95
2. Validación del Número Total de Vacas por Tipo (totalVacas)	98
3. Validación de la Oferta Mínima de Alimento por Vaca (oferta1)	99
4. Validación de la Cantidad Máxima de Alimento Disponible por Zona (oferta2)	107
5. Validación de mínimo por lote (MinLote)	112
6. Validación del modelo vacas variables	114
Anexo B: Modelos Matemáticos	116
1. Modelo Económico - 1 lote	116
2. Modelo Productivo - 1 lote	118
3. Modelo Económico - 2 lotes	120
4. Modelo Económico - 2 lotes y costo de oportunidad	122
5. Modelo Productivo - 2 lotes	124
6. Modelo con Vacas Variables	126
7. Modelo con Vacas Variables con parámetros dependiente del tipo	128
8. Modelo económico con enfoque ambiental - Metano	131
9. Modelo Económico con enfoque ambiental - Nitrógeno	134
10. Modelo Económico con alimento variable por etapa	137
11. Modelo Económico para varias etapas con consideraciones ambientales	139
12. Modelo con Vacas Variables y enfoque ambiental - Metano	142
13. Modelo con Vacas Variables con parámetros dependiente del tipo y enfoque ambiental - Metano	145
Anexo C: Casos de Estudio	148
1. Caso de Estudio 4: Estrategias de reducción del tamaño y configuración del rodeo	148
2. Caso de Estudio 6: Evaluación del impacto ambiental en la producción lechera: análisis de emisiones de metano y su relación con la rentabilidad del sistema	151

Glosario

- **Carga animal:** Número de vacas que pastorean en una determinada superficie, expresado generalmente en unidades de ganado por hectárea.
- **Concentrados:** Suplementos energéticos o proteicos suministrados a las vacas lecheras para complementar su dieta y mejorar la producción de leche.
- **Consumo potencial total:** Cantidad de alimento que puede consumir todo el rodeo en función de la genética, peso vivo y otros factores, en un determinado período.
- **Consumo total:** Cantidad de alimento consumido por todo el rodeo en un determinado período.
- **Disponibilidad de alimento:** Cantidad de alimento disponible en el sistema para la alimentación del ganado, considerando la producción de forraje, suplementos y forraje conservado.
- **Forraje conservado:** Técnica para almacenar pasto y otros alimentos para el ganado en períodos de escasez o variabilidad climática, incluyendo ensilaje y heno.
- **Metano entérico:** Gas de efecto invernadero producido por la fermentación de los alimentos en el rumen de los rumiantes, siendo una de las principales fuentes de emisiones del sector lechero.
- **Pastura:** Vegetación herbácea que sirve de alimento para el ganado, incluyendo gramíneas y leguminosas utilizadas en la alimentación del rodeo.
- **Período de lactación:** Intervalo de tiempo en el que una vaca produce leche después del parto, con una duración aproximada de 305 días.
- **Potrero:** Terreno cercado con pastos destinado a la alimentación y resguardo del ganado, rotado estratégicamente para mantener la disponibilidad de forraje.
- **Requerimientos energéticos:** Cantidad de energía necesaria para el mantenimiento, locomoción, producción de leche y reproducción del ganado, expresada en megajulios o unidades de energía neta.
- **Rotación de potreros:** Estrategia de manejo que consiste en mover el ganado entre diferentes potreros para permitir la regeneración del pasto y mejorar la eficiencia del uso del forraje.
- **Ym (Factor Ym):** Parámetro que representa la conversión de la energía bruta del alimento en emisiones de metano, expresado como porcentaje de la energía ingerida.
- **Zona de alimentación:** Área con una única fuente de alimento, definida por su valor nutricional, costo y distancia a la plataforma de ordeño.

Capítulo 1

Introducción

La producción lechera ocupa un lugar central dentro de las principales actividades agropecuarias a nivel mundial, tanto por su aporte al suministro de alimentos como por su impacto en el desarrollo económico y social. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la leche es un alimento fundamental en la dieta de millones de personas por su alto valor nutricional, siendo fuente de proteínas de alta calidad, grasas esenciales y diversos micronutrientes [1]. A su vez, el sector lácteo representa un componente estratégico de la seguridad alimentaria global, proporcionando ingresos y empleo a más de mil millones de personas en zonas rurales, tanto en sistemas de producción intensiva como extensiva. La producción mundial de leche alcanzó en 2022 aproximadamente 930 millones de toneladas, consolidando una tendencia de crecimiento sostenido en las últimas décadas, impulsada por el aumento de la demanda de productos lácteos en países en desarrollo [2]. En América Latina, la lechería constituye una de las principales actividades productivas dentro del sector agropecuario, desempeñando un papel relevante en el desarrollo económico y en la generación de empleo rural. La región aporta cerca del 10% de la producción mundial de leche, destacándose países como Brasil, México y Argentina por el volumen de su producción y la diversificación de sus sistemas productivos [3].

En Uruguay, la lechería se ha consolidado como una de las principales cadenas agroindustriales, desempeñando un papel clave en el sector agropecuario al representar aproximadamente el 9% del valor bruto de la producción agropecuaria del país [4]. La actividad se concentra principalmente en las regiones sur y oeste, destacándose los departamentos de Colonia, San José y Florida [5].

En las últimas tres décadas, el sector ha experimentado un proceso de intensificación productiva, con un aumento en el tamaño promedio de los establecimientos y en la eficiencia de los sistemas. La cantidad de vacas por tambo se ha incrementado de 30 a más de 200 cabezas, y la producción diaria por vaca pasó de 10 a 20 litros [6] [7] [8]. En términos de producción, la leche cruda superó los 2.000 millones de litros anuales en los últimos ejercicios, abasteciendo tanto el mercado interno como más de 70 destinos de exportación [9]. Durante 2024, las exportaciones de productos lácteos alcanzaron los 853,9 millones de dólares, lo que representó aproximadamente el 6% del valor total de las exportaciones de bienes del país [10]. A pesar de un contexto de alta volatilidad en los precios internacionales y de restricciones climáticas y laborales, el sector mostró tendencias al alza. En febrero de 2025, las exportaciones de productos lácteos registraron un incremento interanual del 39%, con 19.500 toneladas colocadas en el exterior, destacándose Argelia como el principal destino. El valor medio de exportación se ubicó en 3.670 dólares por tonelada, con la leche en polvo entera como el producto más representativo, al concentrar el 72% del volumen exportado en ese período [11].

Actualmente, la producción lechera enfrenta desafíos crecientes relacionados con la rentabilidad económica, la eficiencia en el uso de recursos y la sostenibilidad ambiental. La volatilidad de los precios internacionales de la leche, el aumento de los costos de producción y las crecientes demandas de productos sustentables han impactado en la viabilidad de muchos sistemas productivos [12]. Esta situación ha contribuido a una marcada concentración del sector, reflejada en la desaparición de más del 50% de los tambos en los últimos años, principalmente pequeños y medianos productores que no han logrado sostenerse y han sido absorbidos por sistemas de mayor escala o industrias con mayor capacidad de inversión [8]. A su vez, el sector enfrenta el desafío de reducir su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el metano, generado por la fermentación entérica de los

rumiantes, uno de los principales contaminantes asociados a la actividad. En este contexto, la búsqueda de estrategias que mejoren la eficiencia productiva y reduzcan las emisiones de GEI se ha convertido en un objetivo prioritario para asegurar la sostenibilidad de la lechería uruguaya a largo plazo [13, 14, 15, 16].

En el contexto actual de la producción lechera, la incorporación de herramientas analíticas que contribuyan a optimizar la gestión de los recursos resulta fundamental. La aplicación de modelos de optimización permite evaluar diversas estrategias de producción, analizando su impacto tanto en la rentabilidad económica como en el desempeño ambiental de los sistemas. Estos enfoques proporcionan un soporte riguroso y sistemático para la toma de decisiones, facilitando la identificación de alternativas que logren un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y viabilidad económica.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y aplicar modelos de optimización orientados al análisis de estrategias de manejo en sistemas lecheros uruguayos. A través de la formulación de modelos de programación matemática, se busca representar de manera realista la dinámica productiva del tambo, incorporando variables clave como el tamaño del rodeo, la disponibilidad y asignación de recursos alimenticios, los costos asociados a la producción y el impacto ambiental medido en términos de emisiones de metano. Asimismo, se exploran estrategias que permitan reducir dichas emisiones sin comprometer la rentabilidad del sistema, considerando un escenario de creciente incertidumbre económica y regulaciones ambientales. Los resultados obtenidos pretenden brindar herramientas que apoyen la toma de decisiones tanto a productores como a técnicos del sector, facilitando la identificación de alternativas productivas que mejoren la eficiencia, la sostenibilidad y la competitividad de los sistemas lecheros en Uruguay.

El resto del presente documento se estructura en 5 capítulos.

El Capítulo 2 está dedicado a la revisión de antecedentes, proporcionando un análisis detallado del sector lechero uruguayo, incluyendo su evolución histórica, su impacto económico y los principales desafíos productivos y ambientales que enfrenta. Se presentan datos actualizados sobre la industria lechera, su estructura productiva y las tendencias recientes en el manejo del rodeo y la gestión de recursos. También se revisan los enfoques previos de modelización matemática aplicados a la optimización de la producción lechera.

El Capítulo 3 presenta una descripción conceptual del problema, con el propósito de situar al lector en el contexto del sistema de estudio. En esta sección se expone de manera detallada la problemática abordada, se describe el punto de partida del análisis y se precisan las principales características y condiciones del sistema lechero bajo estudio. Asimismo, se establecen las consideraciones clave que guían el desarrollo del trabajo y se delinean los pasos que se seguirán para proponer soluciones a través de modelos de optimización.

El Capítulo 4 detalla los materiales y métodos utilizados en la investigación. Se describen las herramientas computacionales y matemáticas empleadas para el desarrollo del modelo de optimización, así como las técnicas de validación utilizadas para garantizar su precisión y aplicabilidad. Se explica la formulación matemática del problema y las metodologías de resolución adoptadas. Finalmente, se describen en detalle las variables, restricciones y funciones objetivo utilizadas, junto con los distintos enfoques de modelización considerados y la justificación de los métodos de optimización aplicados.

En el Capítulo 5, se exponen los resultados obtenidos a partir de la experimentación computacional. Se analizan los distintos casos de estudio formulados, con los respectivos escenarios evaluados, comparando estrategias de asignación de recursos y su impacto en la rentabilidad y sostenibilidad del sistema.

Finalmente, en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones del estudio y se discuten posibles líneas de trabajo futuro para mejorar y ampliar el modelo desarrollado. Se destacan los principales hallazgos de la investigación y se plantean recomendaciones para su aplicación en el sector lechero uruguayo.

Por último, se presentan los anexos A, B y C. El anexo A incluye la validación de los modelos matemáticos utilizados en este estudio. El anexo B proporciona el código utilizado para la formulación e implementación de los modelos de optimización descritos en la Sección 4.3. Finalmente, el anexo C contiene tablas complementarias al caso de estudio presentado en la Sección 5.2.4.

Capítulo 2

Revisión de antecedentes

2.1. Sector Lechero

La leche es reconocida mundialmente por su valor económico y nutricional. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization (FAO), la leche proporciona nutrientes esenciales y es una fuente importante de energía alimentaria, proteínas de alta calidad y grasas. Además, la producción lechera genera ingresos regulares para los productores, ya que la leche se produce diariamente. La leche y sus derivados son productos de alto valor en el comercio internacional, contribuyendo sustancialmente al comercio agrícola mundial. Además, la industria láctea genera empleo y sustento para millones de personas, desde pequeños productores rurales hasta grandes empresas del sector, y también impulsa industrias auxiliares como la manufactura de productos lácteos, la logística y el transporte [17].

A nivel mundial, India es el mayor productor de leche, con el 22 % de la producción global, seguida por Estados Unidos, Pakistán y China. En lo que respecta a la región, Argentina, Brasil y Uruguay son los principales productores de lácteos, habiendo experimentado un crecimiento significativo en los últimos años [2].

Uruguay se posiciona como un actor clave en el comercio mundial de lácteos, exportando a 73 mercados y estando presente en 13 de los 20 mercados de mayor crecimiento. En 2021, el 75 % de sus exportaciones se dirigieron a los principales importadores mundiales, consolidando su lugar en el ranking global de la industria láctea [9].

En 2024, se mantuvo su posición destacada en el comercio mundial de lácteos, con exportaciones que alcanzaron los 853,9 millones de dólares, representando el 6 % del total de bienes exportados por el país. Este desempeño consolidó al sector lácteo como el cuarto producto de exportación más importante de Uruguay, por detrás de la celulosa, la carne bovina y la soja [10]. Los principales destinos de las exportaciones lácteas uruguayas fueron Brasil y Argelia, que en conjunto representaron una parte significativa del mercado internacional para estos productos [18].

Este posicionamiento refleja la relevancia de Uruguay en el mercado global de lácteos, consolidándose como un proveedor confiable y de calidad en los principales mercados internacionales.

2.1.1. Antecedentes de la Industria Lechera en Uruguay

A principios del siglo XX, la producción lechera en Uruguay dependía mayoritariamente del pastoreo en praderas naturales, lo que generaba una alta estacionalidad y reducía la oferta de leche en invierno debido a la escasez de alimento [19]. La falta de infraestructura para la refrigeración y el transporte de leche limitaba la producción y distribución, restringiendo su comercialización a un radio de 100 km de los centros urbanos, obligando a establecer la producción en tierras con altos costos de arrendamiento y el promedio diario se limitaba a tres litros por vaca [20].

Con el tiempo, la incorporación de estrategias como el desarrollo de cooperativas, la pasteurización y la diversificación de la alimentación permitió mejorar la estabilidad del sistema productivo. En particular, la creación de la Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE) en 1935 marcó un punto de inflexión al organizar la comercialización y distribución de leche, reduciendo la estacionalidad de la oferta y garantizando un abastecimiento más uniforme [21].

Desde entonces, la producción lechera en Uruguay ha evolucionado significativamente, incorporando avances en infraestructura, alimentación y manejo del rodeo para mejorar la eficiencia y reducir la estacionalidad. Sin embargo, en la actualidad, el sector enfrenta nuevos desafíos relacionados con la optimización del uso de recursos alimenticios, la eficiencia productiva y el impacto ambiental [12].

2.1.2. Producción Lechera en Uruguay

La lechería en Uruguay desempeña un papel fundamental en el sector agropecuario, representando aproximadamente un 9% del valor bruto de la producción agropecuaria [4].

En la actualidad, la actividad productiva comercial se extiende por todos los departamentos del país, aunque se observan marcadas disparidades regionales. La región sur, principalmente en los departamentos de Colonia, Florida y San José, concentra una notable actividad lechera, seguida de cerca por la región oeste, que abarca los departamentos de Soriano, Río Negro y Paysandú [5].

Según la Dirección de Estadísticas Agropecuarias, en las últimas tres décadas, la producción nacional ha experimentado un notable incremento. Específicamente, la producción de leche se ha duplicado, aumentando un 100%, pasando de menos de 1000 millones de litros anuales en 1990 a más de 2000 millones de litros en años recientes. Este crecimiento se debe principalmente al incremento en la eficiencia productiva por animal y al aumento en la cantidad de vacas por establecimiento, que ha pasado de un promedio de 30 vacas con alrededor de 10 litros diarios por vaca, a más de 200 vacas con un promedio de 20 litros diarios por vaca en el mismo período. Este aumento en la escala productiva ha ido acompañado de una creciente concentración en los sistemas de producción, lo que ha resultado en una reducción del 50% en el número de tambos, afectando principalmente a pequeños y medianos productores [6] [7] [8]. Como se observa en la Figura 2.1, la cantidad de tambos en Uruguay ha experimentado una reducción progresiva en los últimos años, lo que refleja la tendencia de concentración en establecimientos de mayor escala.

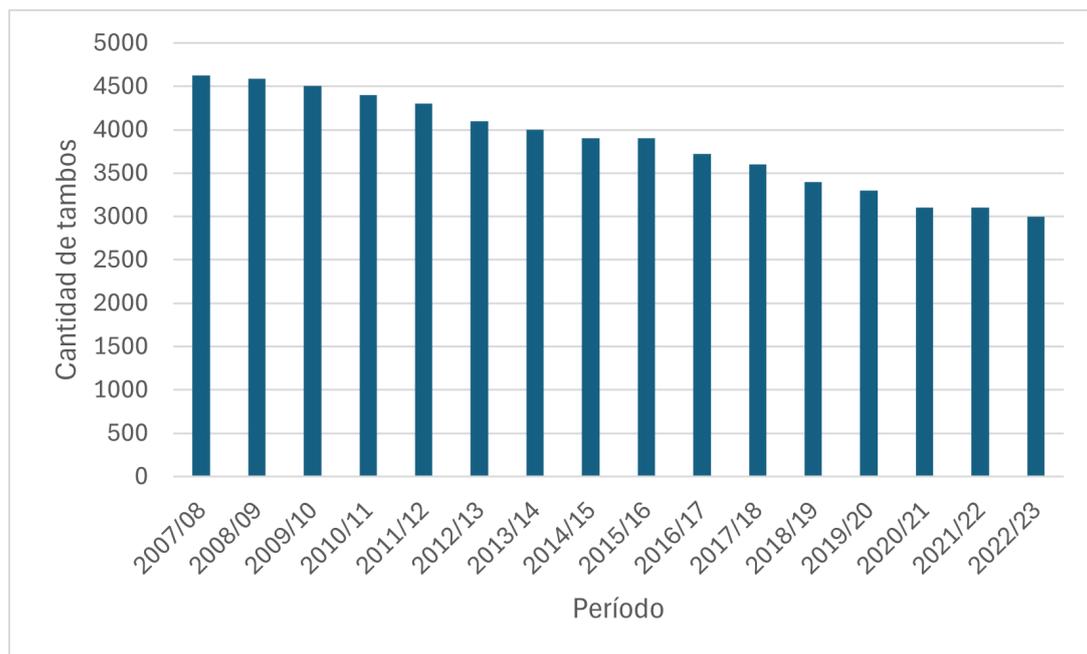


Figura 2.1: Cantidad de tambos en funcionamiento por año en Uruguay. Fuente: Elaboración propia. Información extraída de [22][23]

El Instituto Nacional de la Leche (INALE), como entidad clave en la articulación del sector lechero uruguayo, desempeña un papel crucial en el fomento del desarrollo sostenible de la producción láctea mediante la coordinación entre agentes públicos y privados. Además de asesorar al gobierno en política lechera y promover la investigación e innovación tecnológica, INALE apoya tanto a las pequeñas y medianas empresas como a la producción artesanal e industrial. Su labor se extiende a la generación y difusión de información sectorial, contribuyendo así a una mayor transparencia y conocimiento dentro del sector [24]. En este sentido, INALE realiza relevamientos de datos, estudios y proporciona estadísticas

fundamentales. Estos datos revelan que Uruguay ostenta uno de los consumos per cápita de leche más elevados de la región, con 232 litros por persona al año [25]. Este alto nivel de consumo no solo resalta la importancia cultural y nutricional de la leche y sus derivados en la dieta uruguaya, sino que también impulsa una demanda constante que respalda la producción nacional. La industria láctea responde a esta demanda interna a través de una producción anual aproximada de 2.200 millones de litros de leche, asegurando la disponibilidad de productos lácteos de calidad para los consumidores uruguayos [25].

Por otro lado, en Uruguay existe el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el cual se dedica a generar y adaptar conocimientos y tecnologías para el desarrollo sostenible del sector agropecuario en Uruguay. Su visión es ser reconocido por la excelencia de su trabajo científico-técnico y su compromiso con la innovación y la calidad. INIA se rige por valores como la excelencia, la ética, el respeto, el trabajo en equipo, el compromiso, la iniciativa y el desarrollo del capital humano. Su objetivo es contribuir al progreso del sector agropecuario y del país, promoviendo la investigación, la innovación y la transferencia de tecnología [26].

2.1.3. Perspectiva Económica

El sector lácteo uruguayo ha experimentado transformaciones significativas tanto en el ámbito normativo como económico en las últimas décadas. La Ley 18.242, promulgada el 27 de diciembre de 2007, marcó un punto de inflexión al reformar las regulaciones tradicionales de precios tanto para productores como consumidores, respondiendo a las recomendaciones de la “Mesa Sectorial Consultiva del Sector Lácteo”. Esta legislación se concibió con el propósito de ordenar y desarrollar la cadena láctea, impulsando la eficiencia y competitividad del sector [27]. A partir de su implementación, se promovieron mejoras en la estructura de comercialización y en la integración de los distintos actores de la cadena productiva.

Sin embargo, el sector ha seguido enfrentando desafíos estructurales y coyunturales que han puesto a prueba su sostenibilidad económica. En los últimos años, el sector ha atravesado importantes dificultades económicas, influenciado por fluctuaciones en los precios internacionales, factores climáticos adversos y problemas financieros. En 2023, la caída en los precios de los lácteos en el mercado internacional afectó directamente los ingresos de los productores, reduciendo los márgenes de ganancia y complicando la capacidad de inversión en los tambos [28]. A esto se sumó una sequía prolongada que impactó tanto la disponibilidad de alimento para el ganado como la producción total de leche. Su impacto fue particularmente severo, con pérdidas estimadas en 1.800 millones de dólares. Como consecuencia, el endeudamiento de los productores aumentó significativamente, pasando de 197 millones de dólares en enero de 2023 a 239 millones en enero de 2024 [29]. Las condiciones climáticas extremas, combinadas con la caída de precios, generaron un contexto desafiante para los tamberos, afectando su capacidad de mantener niveles de producción y rentabilidad [28].

Ante este panorama, el gobierno uruguayo implementó medidas de apoyo con el objetivo de mitigar los efectos de la crisis en los pequeños y medianos productores. En mayo de 2024, se aprobó una asistencia de 7 millones de dólares destinada a 1.600 productores que remiten hasta 3.000 litros diarios [30]. Paralelamente, la Cámara de Diputados solicitó al Banco de la República Oriental del Uruguay (BROU) la adopción de medidas adicionales para aliviar la carga financiera de los productores rurales, especialmente en lo que respecta al acceso a crédito y refinanciación de deudas [31]. Estas iniciativas buscan fortalecer la estabilidad del sector y permitir a los productores recuperarse de los efectos de la crisis, aunque su impacto a largo plazo dependerá de la evolución del mercado y de la implementación de estrategias complementarias para mejorar la competitividad del sector.

2.1.4. Perspectiva Social

La producción lechera desempeña un rol fundamental en la generación de empleo y el desarrollo social en Uruguay, no solo como generadora de empleo significativo en áreas rurales, sino también como catalizador del desarrollo local. La actividad lechera proporciona empleo directo e indirecto a una amplia gama de trabajadores, desde agricultores y técnicos hasta transportistas y comerciantes locales. Este sector no solo sostiene económicamente a numerosas familias en zonas rurales, sino que también fortalece los lazos comunitarios y fomenta la cohesión social a través de prácticas cooperativas y asociativas [32].

A pesar de la significativa importancia de la producción lechera para Uruguay, la situación actual revela un panorama preocupante. Según Juan Daniel Vago, actual presidente de INALE, aproximadamente 65 tambos cierran cada año en el país debido a la falta de recambio generacional y a los desafíos de escala que enfrentan los productores lecheros locales. En los últimos tres años, la cantidad de tambos que han cerrado ha superado significativamente a la de nuevas aperturas, reflejando una tendencia de

disminución en el número de productores lecheros en Uruguay. Actualmente, hay alrededor de 2068 tambos activos registrados por el Fondo de Garantía Lechero (Fogale). Vago destacó que muchos tamberos, quienes alcanzan los 60 años sin sucesores, se ven obligados a cerrar sus operaciones [33].

Una de las principales razones detrás de este fenómeno es la problemática del recambio generacional. La falta de incentivos y las dificultades económicas desalientan a los jóvenes a continuar con la tradición familiar en la producción lechera. Esta actividad demanda una dedicación constante y un alto nivel de inversión, pero los márgenes de rentabilidad actuales no son proporcionales al esfuerzo requerido [34].

El impacto de esta crisis se refleja no solo en la reducción del número de tambos, sino también en la disminución del área dedicada a la lechería. Según datos del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de 2022, el área lechera total era de poco menos de 650.000 hectáreas, lo que supuso una caída del 12% frente al año anterior y representó el menor registro histórico [35][36]. En solo dos años, se perdieron más de 100.000 hectáreas lecheras, y en comparación con los niveles de 2010/2011, la reducción supera las 200.000 hectáreas [37][38]. Desde los años 90, la superficie destinada a la lechería ha disminuido en aproximadamente 400.000 hectáreas, lo que pone en evidencia la transformación estructural del sector [6].

Si bien Uruguay es competitivo a nivel global, con costos de producción bajos en comparación internacional, existen realidades muy diversas dentro del sector. Mientras que algunos productores logran sostenerse con márgenes aceptables, otros operan con niveles de rentabilidad insuficientes. La combinación de altos costos internos, la necesidad de mayores escalas productivas y la falta de políticas de incentivo para pequeños y medianos productores ha generado un sector lechero cada vez más polarizado. En este contexto, los tambos de menor eficiencia enfrentan serias dificultades para mantenerse en actividad, mientras que las industrias y productores con mayor capacidad de inversión logran consolidarse y expandirse. Como consecuencia, la producción se concentra en unidades más grandes y tecnificadas, lo que impacta directamente en la estructura del sector y en la sostenibilidad de los modelos tradicionales de producción familiar [39].

2.1.5. Principales Desafíos y Oportunidades

La industria lechera uruguaya compite en un mercado global donde los grandes productores, como Nueva Zelanda y la Unión Europea, dominan con economías de escala y alta eficiencia [40]. Esta competencia pone presión sobre los precios y obliga a los productores uruguayos a ser más competitivos. A su vez, los costos de insumos, como alimento para el ganado, energía y mano de obra en el país, son altos. Esto reduce los márgenes de beneficio y dificulta la inversión en mejoras tecnológicas y expansión.

Por otra parte, el sector enfrenta crecientes demandas para adoptar prácticas sostenibles [41]. Esto incluye el manejo adecuado de residuos y efluentes, la reducción de la huella de carbono y el uso eficiente de los recursos naturales, lo que requiere inversión y adaptación por parte de los productores.

A pesar de estos desafíos, existen varias oportunidades para impulsar el crecimiento y la mejora de la producción lechera en Uruguay. Entre ellas, la adopción de nuevas tecnologías, como sistemas de gestión agrícola digital, robótica y avances en biotecnología, puede aumentar la eficiencia y productividad. Esto incluye el uso de sensores para monitorear la salud del ganado y la calidad del pasto, así como tecnologías para optimizar la producción de leche. Al mismo tiempo, obtener certificaciones nacionales y/o internacionales de calidad y sostenibilidad puede agregar valor a los productos lácteos uruguayos, haciéndolos más atractivos en mercados que valoran estas características. Esto puede abrir nuevas oportunidades de exportación y permitir a los productores captar un segmento de mercado dispuesto a pagar más por productos certificados.

2.2. Sistemas Lecheros

Un sistema productivo lechero se refiere a la combinación de prácticas y técnicas agropecuarias, así como factores fijos y variables, que se integran para lograr una producción eficiente de leche. Esto incluye aspectos como el manejo reproductivo y sanitario del ganado, el pastoreo, el uso del suelo, la mano de obra, maquinaria, y el empleo de concentrados y fertilizantes [42].

Como señala Smith (1999), la elección de los niveles de ciertos parámetros fijos y variables, así como la implementación de prácticas y técnicas, depende del productor y de su capacidad empresarial. Siendo esta última, crucial para tomar decisiones informadas y lograr un proceso productivo eficiente [43].

2.2.1. Métodos de Pastoreo

El manejo de pastoreo es fundamental para maximizar la producción y el consumo de forraje de alta calidad a lo largo del año. En este sentido, existen dos métodos de pastoreo diferenciados principalmente por factores climáticos.

En regiones con climas muy fríos, como ciertas áreas de Estados Unidos, Canadá y algunos países europeos, las vacas suelen ser estabuladas en galpones durante el invierno, dependiendo mínimamente del pasto y basando su alimentación en concentrados y forrajes conservados. En contraste, en regiones con climas más benignos y templados, se emplea un sistema de producción extensivo y pastoril, donde la base de la alimentación son las pasturas y la tierra es el recurso más limitado. En este sistema, cada vaca produce leche a partir del forraje que consume en la pastura [44]. En la Figura 2.2 se puede observar la diferencia entre estos dos métodos de pastoreo.



Figura 2.2: Comparación entre vacas estabuladas y vacas en pasturas

Por otra parte, la regulación de la carga animal es fundamental para equilibrar los requerimientos de los animales con la disponibilidad de la pradera en el mediano y largo plazo, lo que se logra mediante la planificación de la carga animal y la rotación de los potreros. Además, la frecuencia y la intensidad de pastoreo determinan la disponibilidad de forraje al ingreso y a la salida de cada potrero, respectivamente, afectando tanto el rendimiento como la calidad de la pradera, así como su consumo por los animales. Por lo tanto, el control de estas variables es crucial para optimizar el manejo de pastoreo y alcanzar los objetivos de producción y calidad [45].

2.2.2. Requerimientos Energéticos del Ganado Lechero

La nutrición del ganado lechero es un proceso complejo que se basa en la provisión de un conjunto de sustancias químicas esenciales, conocidas como nutrientes, que son fundamentales para mantener la homeostasis y el equilibrio del animal con su entorno. Estos nutrientes, que incluyen agua, energía, proteínas, minerales y vitaminas, son esenciales para satisfacer las necesidades básicas del animal y garantizar su bienestar. La demanda de nutrientes se expresa en términos de requerimientos diarios, los cuales están influenciados por una variedad de factores, incluyendo el peso corporal, raza, edad, potencial genético, relación entre nutrientes en la ración, clima y otras condiciones ambientales [46].

En la alimentación del ganado lechero, se pueden distinguir dos requerimientos energéticos principales:

1. **Requerimientos de Mantenimiento:** Estos se refieren a la energía necesaria para mantener el funcionamiento normal de los procesos vitales del animal, independiente de la función productiva. Dentro de los requerimientos de mantenimiento podemos agrupar dos tipos distintos de requerimientos
 - a) **Requerimientos Basales:** Son aquellas necesidades nutritivas destinadas a mantener el funcionamiento normal de los procesos vitales, como la respiración, circulación, manutención del tono muscular y otros, cuyo funcionamiento demanda energía de los alimentos que el animal consume.
 - b) **Requerimientos de Movilidad:** Se entienden como los gastos energéticos que implica el movimiento de la vaca entre la sala de ordeño y las distintas zonas de alimentación
2. **Requerimientos para Producción de Leche:** Estos se refieren a la energía necesaria para producir leche de alta calidad y cantidad.

Además de estos requerimientos, también existen otros factores energéticos importantes, como los relacionados con el crecimiento, el aumento de peso y la gestación, los cuales pueden influir en la planificación nutricional del ganado lechero en función de los objetivos productivos.

La producción de leche está estrechamente relacionada con la energía disponible en la vaca. Dado que esta energía proviene directamente de la ingesta de alimentos, el manejo adecuado de los mismos dentro de un sistema lechero es uno de los factores con mayor incidencia en la producción. Además, una buena alimentación no solo mejora la producción de leche, sino también la sanidad y la reproducción del ganado lechero. Por el contrario, una alimentación inadecuada puede comprometer el bienestar animal, afectando su salud y generando estrés. La malnutrición no solo limita el rendimiento productivo, sino que también impacta en el estado físico y mental de la vaca, lo que, según la Organización Mundial para la Salud Animal (2008), es un aspecto clave dentro de las cinco libertades del bienestar animal. Garantizar una nutrición adecuada es, por lo tanto, esencial para mantener animales saludables, bien nutridos y libres de sufrimiento [47]. Por otro lado, el consumo potencial de las vacas está limitado por la capacidad de su tracto gastrointestinal, específicamente por el rumen, que actúa como el principal regulador de la ingesta en rumiantes [48].

Todos estos aspectos deben ser considerados para formular una dieta óptima, en lo que se considera una cierta proporción de forraje y concentrado. Los principales nutrientes son: azúcares, proteínas, grasas, agua, minerales y vitaminas. Al pastorear una pradera se debe tomar en consideración la disponibilidad de forraje existente en el potrero. El ingreso de los animales se debe hacer cuando la pradera tenga una disponibilidad de por lo menos 2.000 - 2.500 kilos de materia seca (MS) por hectárea, esto corresponde aproximadamente en primavera a una altura de 15 cm. Este umbral contribuye a mantener la persistencia y productividad del pasto, evitando el sobrepastoreo que podría comprometer su rebrote y reducir la disponibilidad futura de alimento. No obstante, este valor varía según la densidad de la pradera y la época del año. A su vez, el consumo potencial de cada vaca no depende solo de las características de la misma, sino también de las características del forraje y del manejo del pastoreo [49].

En los sistemas de pastoreo, la dieta se compone principalmente del forraje disponible en las pasturas. Sin embargo, para aumentar la producción de leche, es necesario proporcionar una suplementación equilibrada que satisfaga las necesidades específicas del ganado. Una suplementación que incluya forrajes mejorados y concentrados de alto valor energético facilitará el cumplimiento de los objetivos tanto nutricionales como de producción láctea. Para determinar correctamente la cantidad de suplementación necesaria en el sistema, es crucial entender las necesidades de las vacas y las condiciones de los potreros [50].

2.2.3. Impacto ambiental del sector

La producción lechera genera diversos impactos ambientales, desde la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) hasta la contaminación del suelo y el agua. Entre los principales desafíos se encuentran la liberación de metano y óxido nitroso, el manejo de residuos orgánicos y efluentes, el uso intensivo de recursos naturales como el agua y la tierra, y la acumulación de nutrientes en los ecosistemas [13, 14].

Uno de los aspectos más críticos es la emisión de GEI, especialmente el metano producido por la fermentación entérica de los rumiantes y el óxido nitroso derivado de la excreción de nitrógeno en la orina y el estiércol. Ambos gases tienen un alto potencial de calentamiento global, situando a la industria lechera en el centro de los esfuerzos para mitigar el cambio climático. Según la FAO, el sector lechero es responsable de una proporción significativa de las emisiones globales de GEI, lo que lo convierte en una de las principales fuentes del calentamiento global [13].

En sistemas pastoriles como los de Uruguay, una vaca lechera excreta diariamente alrededor del 8 % de su peso corporal en forma de estiércol y orina, lo que equivale aproximadamente a 43 kg por día para un animal de 535 kg [51]. Estos desechos contienen grandes cantidades de nitrógeno y fósforo, que pueden ser aprovechados como fertilizantes naturales, pero también representan un riesgo ambiental cuando su manejo es inadecuado. La lixiviación de nitrógeno en los suelos y su transformación en óxido nitroso contribuyen a la contaminación del agua y la atmósfera, generando efectos adversos como la eutrofización y la degradación de la calidad del aire [52].

Además de los residuos sólidos, los tambos generan grandes volúmenes de efluentes, especialmente en áreas impermeables como la sala de ordeño, el corral de espera y los patios de alimentación. Se estima que en estos espacios se producen aproximadamente 75 litros de efluente por vaca al día, los cuales combinan excretas con agua de lavado, residuos de alimentos y otros materiales [51]. La gestión inadecuada de estos líquidos puede resultar en la contaminación de cuerpos de agua y suelos, afectando la biodiversidad y la calidad del agua potable.

La acumulación excesiva de nutrientes en los ecosistemas también es un problema relevante. Cuando el nitrógeno y el fósforo provenientes de los residuos animales se manejan de manera inapropiada, pueden filtrarse al suelo y cuerpos de agua, causando eutrofización. Este proceso reduce la calidad del agua y afecta los ecosistemas acuáticos, promoviendo el crecimiento descontrolado de algas y disminuyendo los niveles de oxígeno [52].

Otro factor ambiental clave en la producción lechera es el uso intensivo de agua. El manejo del agua en los tambos es fundamental debido a su elevado consumo en el lavado de maquinarias, la gestión de residuos sólidos orgánicos y el riego de cultivos. Implementar estrategias de uso eficiente y sostenible del agua es crucial para minimizar el impacto ambiental de la industria [53].

A pesar de los avances en la gestión de recursos, la industria lechera enfrenta desafíos significativos para reducir su huella ambiental. La mitigación de estos impactos es esencial no solo para cumplir con los objetivos internacionales de reducción de emisiones, sino también para garantizar la sostenibilidad y viabilidad a largo plazo del sector.

Indicadores y métodos para medir el impacto ambiental en un tambo

Para medir el impacto ambiental en un tambo, se pueden utilizar varios indicadores y métodos específicos. Uno de los indicadores relevantes es el de la huella de carbono. Este indicador estima mediante una serie de cálculos la cantidad total de GEI emitidos durante el proceso de producción lechera. Esta huella se compone principalmente de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), siendo este último particularmente relevante debido a su significativa contribución a las emisiones en los sistemas de producción de leche [54].

En los últimos años, los investigadores han avanzado en la estimación de la huella de carbono en los tambos en Uruguay [15] [16]. En cuanto a las cifras específicas, la huella promedio para los tambos en el país es de aproximadamente 0,986 kg CO_2 eq/kg de leche, con un rango que varía desde 0,883 hasta 1,387 kg CO_2 eq/kg de leche [55]. Este resultado coloca a Uruguay en una posición de vanguardia, ya que en la lista de países estudiados Uruguay quedó en la 2da posición, detrás de Nueva Zelanda, país pionero en producción de leche [55].

Es de particular interés estudiar la fermentación entérica, ya que en promedio, las emisiones de metano por este proceso representan alrededor de la mitad de la huella de carbono total de los tambos [15] [16]. Este proceso ocurre en el rumen—una de las cuatro cámaras del estómago de los rumiantes—donde microorganismos descomponen la fibra dietética para liberar energía. La emisión de metano en este proceso depende de diversos factores, como la calidad y tipo del alimento, su digestibilidad, y las características del animal, tales como la edad y el peso [56]. Además, las condiciones climáticas afectan la calidad de las pasturas, lo que influye en las emisiones generadas [57].

Los rumiantes, debido a su habilidad para digerir fibras a través de la fermentación en el rumen, producen más metano que otros animales. La energía bruta (EB) que consumen en los alimentos es un elemento fundamental en este proceso. Los alimentos de alta digestibilidad y calidad energética tienden a reducir las emisiones de metano, ya que permiten una mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía disponible [58].

Para estimar las emisiones de metano vinculando la energía bruta consumida por los mismos, se utiliza el factor de conversión en metano (Y_m) [59]. Esta variable representa el porcentaje de la energía bruta que se pierde como metano, y depende de factores tanto del alimento como del animal. Este valor de conversión puede variar en función del tipo de dieta y las prácticas de manejo. Dietas de alta digestibilidad y contenido energético, por ejemplo, suelen tener valores más bajos de Y_m , mientras que alimentos de baja calidad reflejan mayores conversiones de energía en metano [59].

Un método ampliamente utilizado para medir el impacto ambiental es el balance de nutrientes. Este permite analizar la entrada y salida de nutrientes en un sistema productivo, lo que ayuda a identificar posibles excesos o deficiencias. Además, es una herramienta concreta para cuantificar y planificar los nutrientes necesarios en la alimentación del animal, estimando su manejo adecuado, la eficiencia de su utilización y su impacto potencial en el medio ambiente [60].

El desequilibrio en el balance de nutrientes, también conocido como desbalance, puede desencadenar problemas ambientales significativos, como la contaminación del suelo y del agua, derivada de la acumulación de nutrientes no absorbidos. Esto es especialmente relevante en el caso de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio, que se evalúan considerando tanto la alimentación de los animales como los residuos generados [60].

Desafíos y Oportunidades para mitigar el impacto ambiental

Para mitigar el impacto ambiental en un tambo, es esencial implementar estrategias enfocadas en la gestión responsable de los recursos naturales y la minimización de residuos y contaminantes. En nuestro país existen varios entes públicos y privados que trabajan en promover estrategias para ayudar a la sostenibilidad ambiental del sector, tales como el MVOTMA [61], CONAPROLE (Tambo Sustentable) [62] e INALE [63].

Un área clave es la gestión del agua en el establecimiento. Es fundamental proteger las fuentes de agua superficial y subterránea mediante prácticas que prevengan la contaminación y garanticen la sostenibilidad a largo plazo. Además, optimizar el uso del agua es crucial para reducir el desperdicio, lo que incluye ajustar la cantidad utilizada en cada actividad y asegurar que el agua empleada en la sala de ordeño cumpla con los estándares de potabilidad.

En cuanto al manejo de efluentes, diseñar sistemas eficientes es una medida clave donde la INALE ha jugado un papel muy importante [63]. Esto implica considerar factores ambientales y operativos al planificar la infraestructura, así como implementar tecnologías adecuadas para el tratamiento y aplicación segura de efluentes tratados en el terreno. Un enfoque particular en el balance de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, puede evitar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, permitiendo además su aprovechamiento en la fertilización. Distribuir los efluentes de manera uniforme y controlada también contribuye a reducir su impacto. La operación y el mantenimiento adecuado de los sistemas de gestión de efluentes son esenciales para asegurar su funcionamiento continuo y eficiente. Esto requiere un monitoreo constante de las operaciones y la implementación de un programa de mantenimiento que prevenga fallos y minimice las emisiones no controladas.

Otra estrategia importante es la gestión de residuos sólidos generados en el tambo. Es necesario identificar todos los tipos de residuos producidos y aplicar prácticas que minimicen su generación, mejoren su manejo y aseguren su correcta disposición. Esto no solo reduce la carga ambiental, sino que también puede generar beneficios económicos a través de la reutilización o reciclaje de materiales.

Como se mencionó anteriormente, una de las principales estrategias para mitigar las emisiones producidas por la fermentación entérica en tambos es la mejora en la calidad y composición de la dieta del ganado. La inclusión de aditivos como los taninos, saponinas y aceites esenciales puede reducir significativamente la producción de metano al alterar la microbiota ruminal y mejorar la digestibilidad de los forrajes [64]. Además, la implementación de dietas con una mayor proporción de granos en lugar de forrajes de baja calidad puede disminuir la fermentación de carbohidratos en el rumen, lo que a su vez reduce la producción de metano [65].

La mejora genética del ganado es una estrategia clave para reducir las emisiones en la industria lechera. La selección de razas con menor producción de metano puede disminuir significativamente el impacto ambiental. Combinada con el uso de pasturas de alta calidad y prácticas de manejo adecuadas, esta estrategia maximiza la eficiencia alimenticia y reduce las emisiones. Al integrar la mejora genética con una nutrición óptima, es posible lograr una producción más sostenible [66].

En el caso del nitrógeno, existen diversas estrategias como la incorporación de prácticas de manejo de estiércol, la aplicación de tecnologías de compostaje y la utilización de fertilizantes de liberación controlada. Estas técnicas no solo ayudan a reducir las emisiones, sino que también mejoran la calidad del suelo y aumentan la productividad de los cultivos forrajeros [67].

Además, el diseño de sistemas de alimentación que minimicen el excedente de nitrógeno en la dieta es fundamental. Proporcionar una dieta balanceada que se ajuste a las necesidades específicas del ganado puede reducir la cantidad de nitrógeno excretado. Invertir en la formulación de dietas específicas para diferentes etapas de producción y condiciones climáticas puede maximizar la eficiencia del uso de nitrógeno y, al mismo tiempo, disminuir las pérdidas al ambiente [68].

A su vez, los resultados obtenidos a través del análisis de balances de nutrientes permiten desarrollar y evaluar planes de fertilización. Este enfoque es clave para responder preguntas fundamentales, como si los planes actuales son adecuados, cuál es el límite de fertilización que se puede aplicar sin provocar problemas ambientales, o si se están reponiendo adecuadamente los nutrientes extraídos por los cultivos [60].

2.3. Modelos Matemáticos de Optimización

2.3.1. Introducción a la Investigación de Operaciones

La investigación de operaciones (IO) es una disciplina que se enfoca en la aplicación de métodos analíticos avanzados para ayudar en la toma de decisiones. La IO utiliza técnicas de modelado matemático, análisis estadístico y optimización matemática para proporcionar una base cuantitativa para las decisiones. Su objetivo principal es resolver problemas complejos y mejorar la eficiencia de sistemas y procesos. Esta disciplina se originó durante la Segunda Guerra Mundial cuando se emplearon equipos multidisciplinarios de científicos para resolver problemas estratégicos y tácticos en operaciones militares. Hoy en día, la investigación de operaciones se aplica en una amplia variedad de campos, incluyendo la gestión empresarial, la ingeniería, la logística y la sanidad, proporcionando soluciones para problemas que involucran múltiples variables y restricciones complejas [69].

El proceso de IO generalmente sigue varios pasos estructurados, como se muestra en la [Figura 2.3 \[70\]](#):

1. Definición del problema

La definición del problema implica delimitar el alcance del problema bajo investigación. El objetivo es identificar tres elementos principales del problema de decisión:

- a) descripción de las alternativas de decisión,
- b) determinación del objetivo del estudio y
- c) especificación de las limitaciones bajo las cuales opera el sistema modelado.

2. Formulación del modelo

La formulación del modelo busca traducir la definición del problema en relaciones matemáticas. Si el modelo resultante se ajusta a uno de los modelos matemáticos estándar, como la programación lineal, generalmente se puede llegar a una solución utilizando algoritmos. Alternativamente, si las relaciones matemáticas son demasiado complejas para permitir la determinación de una solución analítica, se suele optar por simplificar el modelo y utilizar un enfoque heurístico, o considerar el uso de simulación, si es apropiado.

3. Solución del modelo

Una vez formulado el modelo matemático del problema en estudio, la siguiente etapa de un trabajo de IO consiste en desarrollar un procedimiento, para obtener una solución a partir de este modelo. Un aspecto importante de la fase de solución del modelo es el análisis de sensibilidad. Este trata de obtener información adicional sobre el comportamiento de la solución óptima cuando el modelo experimenta algunos cambios de parámetros. El análisis de sensibilidad es particularmente necesario cuando los parámetros del modelo no pueden estimarse con precisión. En estos casos, es importante estudiar el comportamiento de la solución óptima en el vecindario de las estimaciones de los parámetros.

4. Validez del modelo

La validez del modelo verifica si el modelo propuesto hace lo que se supone que debe hacer, es decir, si predice adecuadamente el comportamiento del sistema bajo estudio. En otras palabras, se debe determinar si la solución tiene sentido, y si los resultados son intuitivamente aceptables. Un método común para validar un modelo es comparar su salida con datos históricos. El modelo es válido si, bajo condiciones de entrada similares, replica razonablemente el rendimiento pasado. En algunas situaciones, la simulación puede utilizarse como una herramienta independiente para validar la salida del modelo matemático.

5. Implementación de la solución

La implementación de la solución de un modelo validado implica la traducción de los resultados en instrucciones operativas comprensibles que deben ser emitidas a las personas que administrarán el sistema recomendado.

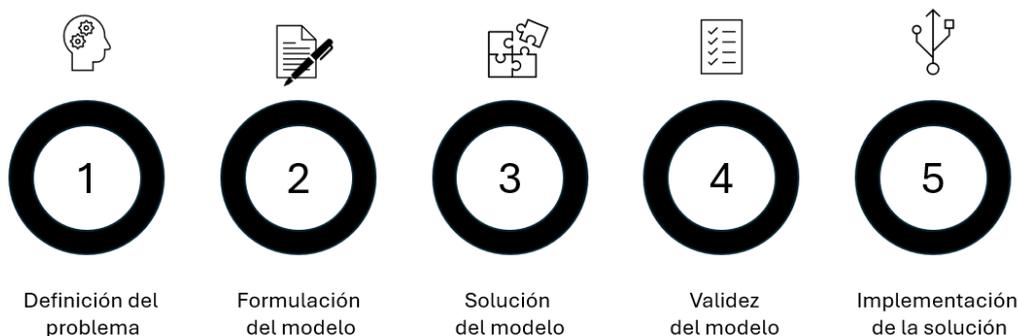


Figura 2.3: Proceso de Investigación de operaciones. Fuente: Elaboración propia

La IO es crucial para mejorar la eficiencia y la efectividad de los sistemas y procesos complejos. Permite a las organizaciones tomar decisiones informadas que optimizan el uso de recursos, reducen costos y mejoran la calidad del servicio. Además, proporciona un marco riguroso para enfrentar la incertidumbre y la variabilidad en los entornos de decisión. Ésta tiene una amplia gama de aplicaciones en diversos campos, incluyendo:

- **Gestión de la cadena de suministro:** Optimización de inventarios, planificación de la producción y gestión de la logística.
- **Salud:** Asignación de recursos hospitalarios, programación de cirugías y planificación de servicios médicos.
- **Finanzas:** Optimización de carteras de inversión, gestión de riesgos y análisis financiero.
- **Transporte:** Planificación de rutas, gestión de flotas y diseño de redes de transporte.
- **Manufactura:** Optimización de procesos de producción, control de calidad y diseño de plantas.

2.3.2. Programación Matemática

La Programación Matemática es una rama de la optimización que se enfoca en encontrar la mejor solución a un problema específico dentro de un conjunto definido de restricciones. Este campo es fundamental en la Investigación de Operaciones y se aplica en diversas áreas como la economía, la ingeniería, la logística y la gestión de recursos [70].

En general, los elementos que componen un problema de programación matemática u optimización son los siguientes [69][71]:

Variables de Decisión

Las variables de decisión representan las opciones disponibles para el decisor y son los elementos que se pueden controlar o ajustar en el modelo. Por ejemplo, en un problema de asignación de recursos, las variables de decisión podrían ser las cantidades de recursos asignados a diferentes tareas.

Funciones Objetivo

La función objetivo es una expresión matemática que representa el objetivo del problema de decisión, ya sea maximizando o minimizando la misma para obtener una solución óptima. Por ejemplo, en un problema de maximización de beneficios, la función objetivo sería la suma de los beneficios generados por las decisiones tomadas.

Restricciones

Las restricciones son las limitaciones o condiciones que deben cumplirse para que las soluciones sean viables. Estas pueden incluir límites de recursos, requisitos de capacidad, demandas mínimas, etc. Las restricciones se expresan como ecuaciones o desigualdades que relacionan las variables de decisión.

Parámetros

Los parámetros son valores constantes que describen las características del sistema y no pueden ser controlados directamente por el decisor. Estos incluyen coeficientes en la función objetivo y en las restricciones, costos, demandas y otros datos necesarios para definir el problema. Los parámetros son cruciales para construir el modelo y deben ser determinados con precisión.

Relaciones Funcionales

Las relaciones funcionales describen cómo interactúan las variables de decisión y los parámetros dentro del modelo. Estas relaciones son fundamentales para entender cómo un cambio en una variable afecta el objetivo o las restricciones del modelo. Por ejemplo, una relación funcional en un modelo de producción podría ser que el tiempo total de producción es la suma del tiempo requerido para cada producto, que a su vez depende de las cantidades producidas.

Supuestos del Modelo

Los supuestos son simplificaciones o idealizaciones que se hacen para construir el modelo. Incluyen condiciones como la linealidad, independencia de variables y certeza de parámetros. Es importante que los supuestos sean realistas y justificados, ya que afectan la validez y aplicabilidad del modelo.

Tipos de Programación Matemática

Existen distintos tipos de programación matemática, cada uno adecuado para diferentes estructuras y restricciones del problema, algunos de los cuales se listan a continuación:

Programación Lineal (PL): La programación lineal es una técnica de optimización en la cual tanto la función objetivo como las restricciones son lineales. La función objetivo se expresa como una combinación lineal de las variables de decisión, y las restricciones se representan como ecuaciones o desigualdades lineales. La programación lineal es adecuada para problemas donde los cambios en las variables de decisión tienen un efecto constante en la función objetivo y las restricciones.

Para resolver problemas de Programación Lineal (PL), se utilizan varias técnicas especializadas que permiten encontrar soluciones óptimas de manera eficiente. Algunas de las técnicas más comunes incluyen [70]:

- **Método Simplex:** es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para resolver problemas de Programación Lineal (PL). Fue desarrollado por George Dantzig en 1947 y ha sido fundamental en el campo de la optimización. Este método iterativo se mueve desde un vértice del conjunto factible al siguiente, mejorando la función objetivo en cada paso hasta alcanzar la solución óptima.

Esta técnica es rápida y eficiente en la práctica, permitiendo resolver problemas con miles de variables y restricciones en un tiempo razonable. Garantiza encontrar una solución óptima si existe, moviéndose a través de los vértices del poliedro factible. Además, es útil para el análisis postóptimo, permitiendo evaluar cómo los cambios en los parámetros del problema afectan la solución óptima. Existen numerosas implementaciones computacionales optimizadas del Método Simplex disponibles en los principales paquetes de software de optimización.

A pesar de su eficiencia práctica, el Método Simplex no siempre tiene un tiempo de ejecución predecible en el peor de los casos. En algunas situaciones, puede requerir un tiempo exponencial para encontrar la solución óptima, lo cual puede ser una limitación para problemas extremadamente grandes o complejos. En casos de degeneración, donde múltiples soluciones óptimas existen, puede experimentar ciclos infinitos sin encontrar la solución óptima. Además, requiere una solución inicial factible para comenzar, lo que puede ser complicado y puede necesitar técnicas adicionales [72].

- **Método de los Puntos Interiores:** esta técnica resuelve problemas de PL moviéndose a través del interior del conjunto factible, en lugar de a lo largo de los vértices como en el Método Simplex. Este método es particularmente eficaz para problemas de gran escala y se basa en algoritmos que utilizan la geometría del problema para encontrar la solución óptima.

La formulación estándar de un problema de Programación Lineal (PL) se expresa de la siguiente manera:

Maximizar

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n,$$

sujeta a las restricciones

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n &\leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n &\leq b_2, \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n &\leq b_m, \end{aligned}$$

y

$$x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad \dots, \quad x_n \geq 0.$$

Donde:

- Z es la función objetivo que se desea maximizar.
- c_i son los coeficientes de las variables en la función objetivo.
- x_i son las variables de decisión.
- a_{ij} son los coeficientes de las restricciones.
- b_j son los términos constantes en las restricciones.

Algunas aplicaciones comunes de la programación lineal incluyen la optimización de rutas de transporte para minimizar costos, la asignación de recursos en proyectos y la gestión de inventarios para minimizar costos y satisfacer la demanda.

Programación Entera (PE): La programación entera es una extensión de la programación lineal donde algunas o todas las variables de decisión deben tomar valores enteros. Esto es crucial en problemas donde las decisiones no pueden ser fraccionadas, como en la asignación de tareas discretas.

Resolver problemas de PE es generalmente más difícil y consume más tiempo que resolver problemas de PL. La complejidad computacional aumenta exponencialmente con el tamaño del problema, debido a la necesidad de evaluar combinaciones discretas de soluciones posibles. Para abordar la complejidad de los problemas de PE, se utilizan técnicas especializadas como [69]:

- **Ramificación y Acotación (Branch and Bound):** Esta técnica divide el problema original en subproblemas más pequeños, resolviendo y acotando cada uno de ellos para encontrar la solución óptima.
- **Corte de Planos (Cutting Planes):** Esta técnica agrega restricciones adicionales al problema para eliminar soluciones fraccionarias y acercarse a la solución entera óptima.
- **Métodos Heurísticos y Metaheurísticos:** Métodos como algoritmos genéticos, búsqueda tabú y optimización por enjambre de partículas, que buscan buenas soluciones en un tiempo razonable sin garantizar la optimalidad.

Las aplicaciones típicas de la programación entera incluyen la planificación de la producción en fábricas donde los productos no pueden ser divididos, el diseño de redes de telecomunicaciones y la programación de turnos de trabajo para empleados.

Programación No Lineal (PNL): Es una rama de la optimización que se ocupa de problemas en los que la función objetivo o las restricciones, o ambas, son no lineales. Esto contrasta con la Programación Lineal (PL), donde ambas son lineales. La PNL es más compleja y general que la PL, y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la ingeniería y la economía hasta la gestión de recursos y la planificación.

Existen varias técnicas para resolver problemas de PNL, cada una adecuada para diferentes tipos de problemas y características de la función objetivo y las restricciones. Algunas de las técnicas más comunes incluyen [73]:

- **Método de Gradiente:** es una técnica iterativa que se basa en el uso de la derivada de la función objetivo para determinar la dirección en la que se debe mover para alcanzar un óptimo local. La dirección del gradiente es la de mayor ascenso o descenso, lo que permite encontrar la solución de manera eficiente en problemas bien condicionados. Sin embargo, este método puede quedar atrapado en óptimos locales y requiere que la función objetivo sea diferenciable.

- **Método de Newton:** este método mejora el Método de Gradiente al utilizar tanto la primera como la segunda derivada de la función objetivo. Este método es más rápido y preciso cuando se está cerca del óptimo debido a su capacidad para ajustar la dirección de búsqueda de manera más eficiente. No obstante, el cálculo del Hessiano (segunda derivada) puede ser computacionalmente costoso y, si la función no es convexa, el método puede no converger.
- **Programación Cuadrática:** es un caso especial de la Programación No Lineal donde la función objetivo es cuadrática (incluye también términos x_j^2 y $x_i \neq x_j$ para todo $i \neq j$). Este método es eficiente y se utiliza en problemas con estructuras cuadráticas específicas. Sin embargo, su aplicación está limitada a estos tipos de funciones y restricciones. Se dispone de varios algoritmos para el caso especial de un problema de programación cuadrática donde la función objetivo es una función cóncava.

La formulación estándar de un problema de Programación No Lineal (PNL) se puede expresar como [73]:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } f(x) \\ & \text{Sujeto a } g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \quad h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ & \quad x \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

Donde:

- $f(x)$ es la función objetivo, no lineal, que se desea maximizar.
- $g_i(x)$ son las restricciones de desigualdad no lineales.
- $h_j(x)$ son las restricciones de igualdad no lineales.
- x es el vector de variables de decisión.

Problemas de Asignación

Los problemas de asignación son una clase fundamental dentro de la programación matemática y la investigación operativa, dado su papel en la distribución óptima de recursos limitados entre distintas tareas o elementos. Su aplicabilidad es amplia, abarcando desde la logística y la planificación de proyectos hasta la gestión de recursos computacionales y la asignación de personal. En esencia, estos problemas buscan emparejar dos conjuntos, como recursos y tareas, bajo ciertas restricciones que garantizan la factibilidad de la solución. El objetivo puede ser minimizar costos, maximizar beneficios o equilibrar cargas de trabajo, según las necesidades del sistema en cuestión [74].

Dependiendo de la estructura de la función objetivo y las restricciones, los problemas de asignación pueden clasificarse en lineales y no lineales. Los primeros, como el clásico problema de transporte, pueden resolverse de manera eficiente mediante algoritmos polinomiales [74]. En contraste, los problemas no lineales, como el problema de asignación cuadrática o aquellos con restricciones no lineales, presentan mayores desafíos computacionales. Para abordarlos, se emplean enfoques como técnicas de relajación, algoritmos heurísticos y metaheurísticos, así como métodos exactos de optimización global [73].

2.3.3. Modelos de optimización en la industria lechera

La industria lechera ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y aumentar la sostenibilidad. Los modelos de optimización han jugado un papel crucial en este desarrollo, proporcionando herramientas avanzadas para la toma de decisiones y la gestión eficiente de los recursos. En la publicación realizada por Kelemen en el 2015 [75] pueden encontrarse distintos modelos. En particular, en esta sección, se realiza un pequeño reporte que presenta algunos trabajos de investigación operativa aplicada a problemas de producción animal.

Los modelos de optimización en la industria lechera comenzaron como herramientas básicas para abordar problemas específicos como la asignación de recursos y la planificación de la producción. En sus inicios, la optimización era muy subjetiva y dependía en gran medida de la experiencia del personal del establecimiento. Sin embargo, a partir de la década de 1940, se comenzó a estudiar funciones de

producción, las cuales modelaban la relación entre los insumos utilizados y el rendimiento en términos de producción de leche. Una función de producción de este tipo puede representarse mediante la siguiente expresión matemática:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

donde la variable dependiente Y representa la producción obtenida, mientras que las variables independientes x_1, x_2, \dots, x_n representan los recursos utilizados. La ventaja de tener este tipo de funciones de producción radica en la posibilidad de identificar la mejor variante para combinar los factores de producción en términos de calidad y cantidad [75].

El primer trabajo especializado que estableció una conexión entre la explotación de vacas lecheras y las funciones de producción fue realizado por Jensen, publicado en 1942 [76]. En este estudio, Jensen señala que, además de conocer los requerimientos nutricionales de las vacas lecheras en función de su potencial productivo, es fundamental comprender cómo la producción se ve afectada cuando la ingesta de nutrientes aumenta o disminuye. Otro problema que el autor intenta resolver es la relación entre la cantidad de concentrados administrados y el rendimiento en la producción de leche. En este sentido, plantea la interrogante de si la relación entre la producción y el nivel de concentrados suministrados en la ración es constante o sigue un comportamiento gradual.

Tras la publicación del artículo de Jensen, aparecieron varios estudios que investigaban la posibilidad de hallar un punto óptimo, representado por el cambio en la producción de leche, en la proporción entre la cantidad de pasto y la de forraje en la ración. En este sentido, Huffman y Duncan (1949) estudiaron el impacto de reemplazar los nutrientes provenientes del pasto con una cantidad equivalente aportada por concentrados [77]. Los resultados mostraron un incremento en la producción de leche, lo que llevó a la conclusión de que la función de producción lechera podría no seguir un comportamiento lineal, sino más bien no lineal, reflejando una relación más compleja entre la alimentación y el rendimiento productivo.

Ashe (1950) mostró que la relación entre la alimentación y la producción seguía un patrón lineal cuando las vacas consumían hasta 1800 kg de concentrado en un período de lactación; en cambio, cuando se incrementaba de 1800 a 2700 kg, el aumento de la producción era mucho menor, y si se superaban los 2700 kg por vaca, el efecto positivo en la producción desaparecía [75].

A partir de la década de 1970, la atención de los investigadores se centró aún más en el uso de funciones de producción para optimizar las tecnologías de producción lechera y aumentó el número de publicaciones relativas a este ámbito. En 1981, Balaine, Person y Miller presentaron el artículo "Profit in Dairy Cattle Functions and Effect of Measures of Efficiency and Prices", cuyo objetivo era definir la función de beneficio en función del desempeño de las vacas, así como establecer la relación entre las funciones de beneficio empleadas y determinar el efecto que ejercen los precios sobre las características de dichas funciones y sobre la clasificación de las vacas en el contexto de usar la eficiencia económica de la granja como criterio de selección genética [78].

Un rasgo característico de la utilización de funciones de producción para optimizar las tecnologías de la explotación lechera es el marcado énfasis en la eficiencia económica en detrimento de otros aspectos. Es decir, se dosifican los factores productivos con el fin de lograr la máxima rentabilidad. Para abordar estos desafíos, se han desarrollado modelos más avanzados, como la programación dinámica, que permite optimizar decisiones secuenciales a lo largo del tiempo. Este enfoque se ilustra en la obra "Profitability of Dairy Cow Herd Life", de Congleton y King (1984), donde se utiliza un modelo dinámico para estimar el impacto del aumento de la vida productiva de las vacas en la eficiencia económica de la granja. El modelo calcula cómo varía la eficiencia económica en función de la interacción de varios factores: la edad de las vacas, la producción de leche, la demanda de mano de obra, el costo de los tratamientos, etc [79].

En la década de 1980, la programación lineal fue ampliamente utilizada. En el ámbito de las explotaciones lecheras, la programación lineal se utiliza habitualmente para optimizar las raciones alimenticias, optimizar la rotación de cultivos, estudiar la estructura del rodeo o seleccionar mejoras genéticas. Este último caso resulta útil para seleccionar los animales destinados a la cría, teniendo en cuenta un conjunto de restricciones sobre la disponibilidad de recursos, estrategias de comercialización u otras tendencias. Jansen, en su artículo "Linear Programming in Selection of Livestock" (1984), argumenta que las predicciones de rendimiento de los animales pueden incorporarse a funciones objetivo, por ejemplo, maximizar el beneficio [80]. Este procedimiento aporta un mayor valor al proceso de toma de decisiones que el método de ecuaciones simples, que no contempla las restricciones del modelo ni las alternativas de producción.

Otro enfoque relevante en la optimización de la producción lechera es la teoría de grafos, aplicada a la organización del trabajo en tambos. Esta metodología permite mejorar la eficiencia operativa mediante la planificación y secuenciación óptima de tareas, reduciendo el tiempo requerido para cada proceso

productivo. El uso de esta técnica facilita la asignación racional de recursos humanos y materiales, contribuyendo a una mayor productividad con menores costos operativos [75].

A partir de la década de 1990, aparecen programas informáticos especializados en agricultura y ganadería. Inicialmente, su función era más bien recopilar información en bancos de datos, pero el surgimiento de nuevos programas de procesamiento de información ha permitido aprovechar mejor esos datos. Así, la implementación de “Sistemas Expertos” ha facilitado la adopción de técnicas informáticas más avanzadas y de sensores electrónicos de gran precisión en ganadería. Un ejemplo de este tipo de tecnología es DXMAS, un sistema diseñado para identificar problemas de manejo en tambos y sugerir soluciones optimizadas [81]. Otro caso destacado es LAIT-XPERT VACHES, un sistema basado en inteligencia artificial que permite optimizar la alimentación, reproducción y manejo del ganado lechero con un alto grado de precisión [75].

A partir del año 2000 surge el concepto de “Precision Feeding” (“Alimentación de precisión”) en la ganadería lechera. Se define como la optimización de la tecnología de alimentación para minimizar las pérdidas de nutrientes en la explotación, reduciendo la contaminación y los costos. Esto se logra al ajustar lo que la vaca consume al valor nutricional teórico calculado en la formulación [82]. En este contexto, en los últimos años se han desarrollado múltiples estudios para la implantación y desarrollo de este concepto.

Más recientemente, el concepto de “Precision Dairy Farming” (“Lechería de Precisión”) ha cobrado relevancia en la optimización de la producción lechera. Esta estrategia combina el uso de sensores inteligentes con técnicas de análisis de datos para gestionar individualmente cada vaca dentro del rodeo. A través del monitoreo de variables como la actividad, temperatura corporal y consumo de alimento, es posible detectar cambios en el estado de salud y ajustar la alimentación en tiempo real. Investigaciones han demostrado que la implementación de esta tecnología mejora la eficiencia del tambo, reduce desperdicios y minimiza los costos operativos [83].

Investigación operativa en lechería en Uruguay

Uruguay ha desarrollado una sólida base de investigación aplicada a la optimización de la producción lechera, integrando modelos matemáticos, herramientas de simulación y estrategias de manejo en sistemas pastoriles. A lo largo de los años, se han desarrollado diversos modelos que han permitido mejorar la toma de decisiones en el sector, optimizando el uso de recursos y promoviendo la sostenibilidad.

Uno de los primeros avances en este campo fue el desarrollo del modelo CTR Dairy en 2008, un modelo de simulación ruminal dinámico y mecanístico diseñado para predecir la disponibilidad de nutrientes en vacas lecheras bajo patrones de alimentación discontinua. Basado en ecuaciones diferenciales y algebraicas, este modelo describe la cinética de fermentación y absorción de nutrientes en el rumen, incorporando factores como la degradación de la fibra y la absorción de ácidos grasos volátiles según el pH ruminal [84]. En 2018, su implementación en VBA para Microsoft Excel facilitó su uso por parte de productores y técnicos, permitiendo evaluar estrategias de alimentación en sistemas de pastoreo y suplementación de manera más accesible [85].

En 2011, Ricardo Mello desarrolló un modelo dinámico de simulación para mejorar la toma de decisiones a corto plazo en sistemas lecheros. Su enfoque permite evaluar el impacto de diversas intervenciones en la fase de pastoreo y manejo animal sobre la producción de leche, proporcionando una herramienta práctica para la gestión diaria de los establecimientos [86].

Por otro lado, en 2014, Gastón Notte propuso un modelo de optimización matemática para la asignación eficiente de recursos alimenticios en sistemas pastoriles de producción lechera en Uruguay. Su estudio comparó métodos exactos y algoritmos evolutivos, destacando la eficiencia de los algoritmos genéticos en la distribución de alimentos en rodeos heterogéneos [87]. En 2023, amplió este enfoque con un modelo de optimización combinatoria que optimiza la asignación de vacas según sus necesidades energéticas y su distribución en distintas fuentes de alimento [88].

En cuanto a la planificación del uso del suelo, el Modelo para la Optimización en la Planificación de Usos del Suelo (MOPUS) utiliza programación matemática combinatoria para asignar de manera eficiente el suelo en cuencas lecheras, minimizando la exportación de fósforo hacia cuerpos de agua sin comprometer la viabilidad económica de los sistemas productivos. Este modelo permite evaluar distintos escenarios bajo restricciones ambientales y productivas [89].

Otro aporte significativo es el estudio de Matonte y Calcagno (2021), que presenta una herramienta basada en la metaheurística GRASP para optimizar la rotación de cultivos en predios lecheros de pequeños y medianos productores. Su modelo integra la reducción de la exportación de fósforo con la productividad y la diversidad de cultivos, incorporando un Sistema de Soporte a la Decisión (DSS) para

facilitar su implementación en el sector agropecuario [90].

Más recientemente, Llanos et al. desarrollaron el OLE! Dairy Model, un modelo de simulación de granja completa diseñado para sistemas pastoriles. Este modelo evalúa el desempeño biofísico de los sistemas productivos considerando estrategias de alimentación con diferentes proporciones de pastura y dos genotipos de vacas lecheras, contribuyendo a la optimización de los sistemas de producción lechera en Uruguay [91].

Estos estudios reflejan el compromiso de la comunidad científica y técnica en Uruguay con la mejora continua del sector lechero, integrando herramientas avanzadas de optimización y simulación para hacer frente a los desafíos productivos y ambientales del país.

Capítulo 3

Descripción del problema

La producción lechera enfrenta actualmente un escenario caracterizado por la necesidad de tomar decisiones de manejo cada vez más complejas, en un contexto de alta variabilidad climática, fluctuaciones en los precios de los insumos y la creciente demanda de prácticas sostenibles. Si bien el sistema pastoril predominante en Uruguay permite bajos costos de alimentación y aprovecha las ventajas del clima templado, también presenta desafíos relevantes [12]. Entre ellos, la estacionalidad en la oferta de forraje y la distancia entre las áreas de alimentación y la plataforma de ordeño exigen una planificación precisa para mantener la eficiencia productiva y económica a lo largo del año.

Uno de los aspectos clave de la gestión del sistema es lograr una asignación adecuada de los recursos disponibles, en particular, la distribución de los animales entre las diferentes zonas de alimentación. Esta decisión influye de forma directa en la energía disponible para cada vaca, ya que la cantidad de energía que un animal puede destinar a la producción de leche es resultado del equilibrio entre el consumo de alimento y el gasto energético asociado al mantenimiento y al desplazamiento. Por tanto, una mala asignación puede traducirse en menores niveles de producción y, consecuentemente, en una menor rentabilidad.

Tradicionalmente, las decisiones sobre la asignación de vacas a potreros, el uso de suplementos o el manejo del rodeo se han basado en la experiencia y la intuición del productor. Sin embargo, a medida que los sistemas se vuelven más intensivos y las restricciones económicas y ambientales más exigentes, esta forma de gestión puede resultar insuficiente. La necesidad de considerar simultáneamente múltiples variables —como el peso de los animales, su estado productivo, la calidad y disponibilidad del alimento en cada zona, las distancias de traslado, los costos de producción y el precio de la leche— dificulta la toma de decisiones eficientes sin el apoyo de herramientas analíticas.

Por otro lado, el impacto ambiental de la producción lechera ha adquirido un peso creciente en el diseño y evaluación de los sistemas productivos. Las emisiones de metano entérico generadas durante la digestión representan una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero del sector agropecuario, y la presión social y normativa para reducirlas es cada vez mayor. Esto obliga a incorporar la dimensión ambiental dentro de los criterios de optimización del sistema, buscando alternativas que equilibren la productividad y la rentabilidad con la sostenibilidad.

En la [Figura 3.1](#) se observa cómo interactúan estos factores en la producción lechera.

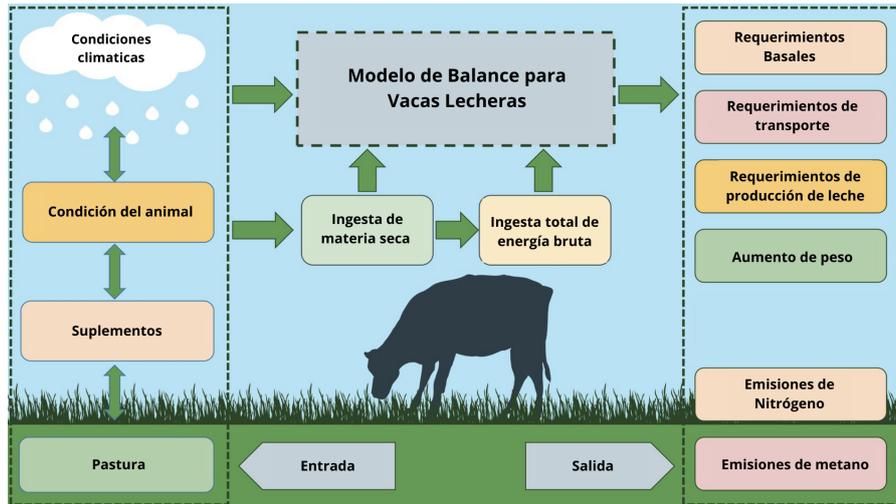


Figura 3.1: Modelo de vacas lecheras. Fuente: elaboración propia

En este contexto, surge la necesidad de contar con modelos que integren las dimensiones productiva, económica y ambiental del sistema lechero. Si bien la sostenibilidad ha cobrado una relevancia creciente en la producción de leche, la mayoría de los modelos de optimización desarrollados hasta el momento se enfocan principalmente en maximizar la producción o el beneficio económico, sin incorporar de forma integral los aspectos ambientales en su estructura. Tal es el caso del modelo original que sirve de base para este trabajo —propuesto por Notte [87]—, en el cual se trabaja con algoritmos evolutivos sin tener en cuenta restricciones ni variables asociadas a impactos ambientales. En respuesta a esta limitación, se busca desarrollar herramientas que permitan explorar estrategias de manejo más sostenibles, optimizando la asignación de los animales a las zonas de alimentación disponibles, considerando no solo el efecto sobre la producción y el beneficio económico, sino también el impacto sobre las emisiones de metano. De esta forma, se pretende facilitar la toma de decisiones basadas en información objetiva y criterios cuantificables, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

3.1. Enfoque propuesto para la resolución

El presente estudio amplía el alcance del modelo base a través de un proceso de adaptación incremental. En primer lugar, se realizó la validación del modelo de referencia, asegurando su consistencia y adecuación a las condiciones del sistema lechero considerado. Posteriormente, se incorporó la dimensión de los lotes, permitiendo la asignación de los animales a diferentes grupos de manejo, en los cuales se contemplan diversas características productivas, y la correspondiente asignación de cada lote a una zona de alimentación específica.

Finalmente, se integró la dimensión ambiental mediante la inclusión de nuevos parámetros, variables y restricciones orientadas a cuantificar y limitar las emisiones de metano entérico, en función de la cantidad y tipo de alimento consumido, el contenido energético de la dieta y otros factores determinantes. Asimismo, se incorporaron indicadores relacionados con la gestión de nutrientes, haciendo especial énfasis en el manejo del nitrógeno, con el objetivo de evaluar el impacto ambiental del sistema en términos de sostenibilidad.

De este modo, los modelos resultantes permiten formalizar el proceso de asignación de recursos en sistemas lecheros de pastoreo, considerando los objetivos de maximización de la producción, el beneficio económico y la mitigación del impacto ambiental.

3.2. Enfoque metodológico

Como se muestra en la Figura 3.2, el proceso metodológico para la construcción y resolución del modelo de optimización sigue una secuencia estructurada desde la definición del problema hasta el análisis de resultados. A continuación, se describen las etapas del proceso:

1. Definición del problema: Se estableció la estructura del sistema productivo, identificando los factores críticos que afectan la eficiencia del tambo, tales como la disponibilidad de alimento, los

requerimientos energéticos de los animales, los costos de producción, el precio de la leche, entre otros.

2. **Formulación matemática:** Se representaron los elementos clave del sistema en términos matemáticos, definiendo variables, parámetros y restricciones. Asimismo, se desarrollaron modelos de programación que permiten optimizar la asignación de recursos y evaluar distintas estrategias productivas.
3. **Implementación computacional:** La formulación del modelo se implementó en **AMPL**, y se resolvió mediante solvers de optimización.
4. **Diseño experimental:** Se definieron diferentes escenarios de simulación para evaluar el impacto de parámetros clave como la oferta de alimento, el tamaño del rodeo y el precio de la leche. Cada escenario fue diseñado con el objetivo de responder preguntas específicas sobre el desempeño productivo y económico del sistema.
5. **Análisis de resultados:** Se analizaron las soluciones obtenidas del modelo para evaluar la viabilidad de distintas estrategias de manejo y sacar conclusiones de interés.

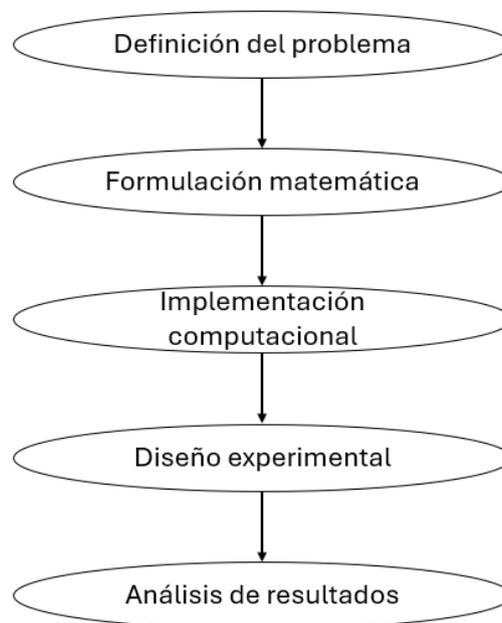


Figura 3.2: Flujo metodológico del modelo de optimización. Fuente: Elaboración propia.

Para desarrollar una herramienta que responda a las necesidades reales del sector, se llevó a cabo un proceso de relevamiento de información que permitió comprender en mayor profundidad las características del sistema lechero uruguayo. Esta etapa fue clave para garantizar la validez del modelo, ya que sentó las bases sobre las cuales se definieron los principales supuestos, variables y restricciones. Se recopiló información a partir de fuentes documentales, trabajos académicos previos y, especialmente, mediante intercambios con referentes técnicos del área.

En este sentido, se mantuvieron reuniones con el Ing. Agr. (PhD) Pablo Chilibroste, quien aportó una visión integral del funcionamiento de los tambos, las estrategias de alimentación y las principales problemáticas de gestión enfrentadas por los productores. Este intercambio permitió ajustar el enfoque del modelo a la realidad local, incorporando criterios relevantes desde una perspectiva productiva y práctica.

A partir de este relevamiento, se identificaron como variables clave del sistema: la cantidad y tipo de vacas presentes en el establecimiento, los consumos energéticos individuales, los costos asociados a cada tipo de alimento, y la relación entre el consumo, la eficiencia productiva y la generación de ingresos. Esta caracterización permitió fundamentar la estructura del modelo y orientar su formulación matemática hacia una representación adecuada de los procesos de toma de decisión en los sistemas lecheros uruguayos.

3.3. Definición del problema

En los siguientes apartados, se describen en términos matemáticos las características clave consideradas en el modelo. Estas se integran directamente como parámetros del sistema o se utilizan de manera indirecta para calcular otros parámetros derivados. La formulación presentada se basa en las ecuaciones y recomendaciones de la guía Nutrient Requirements of Dairy Cattle (Seventh Revised Edition, 2001)[92].

3.3.1. Dimensión Temporal

Se establece una dimensión temporal representada por e etapas, donde cada una de ellas abarca una cantidad específica de días. Durante una etapa, los animales se asignan a los lotes, manteniendo una configuración estable dentro de ese período. Esta estabilidad permite analizar el impacto de la distribución de recursos en la producción y la eficiencia del sistema sin cambios abruptos, garantizando que la conformación de los lotes se mantenga inalterada mientras dure la etapa.

Al finalizar una etapa, se redefine la conformación de los lotes en función de la evolución del sistema y de las condiciones existentes, tales como la disponibilidad de alimento o el estado productivo de los animales. En este nuevo escenario, se realizan nuevas asignaciones de recursos teniendo en cuenta la conformación actualizada de los lotes. Esta dinámica permite ajustar las decisiones de manejo en cada período, optimizando el uso de los recursos disponibles y asegurando una gestión más eficiente y adaptable del sistema productivo a lo largo del tiempo.

3.3.2. Zonas de Alimentación

El sistema considerado incluye diversas zonas de alimentación z , cada una con características específicas que impactan en la energía disponible para las vacas y, por ende, en la producción lechera. Estas características son:

- *Aporte Energético*: Cada zona z tiene un aporte energético asociado, expresado en mega calorías por kilogramo de alimento (Mcal/kg). Este parámetro depende del tipo y calidad del alimento disponible.
- *Distancia*: Representa la distancia que existe entre la zona de alimentación z y la sala de ordeño. Afecta el cálculo del requerimiento energético por traslado ($reqTras$) y se expresa en kilómetros (km). Debe tenerse en cuenta el número de viajes ($nroViajes$) por día que hace el animal para obtener la distancia recorrida diaria.
- *Disponibilidad de Alimento*: Representada por el término *Alimento* (kg), es la disponibilidad de alimento en cada zona estableciendo un límite máximo para el consumo. Para simplificar el modelo, se asume que la disponibilidad total de alimento en cada zona de alimentación se define únicamente por la cantidad disponible al inicio de cada etapa, sin considerar cómo esta puede haber sido afectada por el consumo durante la etapa anterior.
- *Costo del Alimento*: Representa todos los costos asociados a los respectivos alimentos y se establece como un porcentaje del precio de venta del litro de leche. Dentro de estos porcentajes no solo están contemplados los costos relacionados directamente con la obtención del alimento sino también costos indirectos como de manejo y gestión de los alimentos, fertilizantes, higiene animal, agua, energía eléctrica y mano de obra.

Particularmente, se consideraron tres tipos de recursos alimenticios: pastura, forraje conservado y concentrados. El forraje conservado representa una reserva de alimento almacenado para períodos de menor disponibilidad de pastura, mientras que los concentrados son una forma de suplementación con alta densidad energética. Todos los alimentos se expresan en kilogramos de MS, permitiendo una comparación uniforme entre las distintas fuentes de alimentación.

3.3.3. Tipos de Vacas

El sistema incluye diferentes tipos de vacas (t), caracterizadas por:

- *Peso vivo (pv)*: Cantidad de masa corporal total de la vaca en su estado natural, medida en kilogramos.

- *Potencial genético (pg)*: Cantidad de leche que puede producir durante una lactación estándar de 305 días, expresada en litros por día.
- *Semana de lactancia (sl)*: Representa la semana actual en el ciclo de lactancia de la vaca. La cantidad de leche producida varía en función de esta semana.
- *Porcentaje de grasa (g)* en la leche: Cantidad de grasa presente en la leche, lo cual influye en la energía total y la densidad de nutrientes de la leche.
- *Porcentaje de proteína (p)* en la leche: Cantidad de proteínas presentes en la leche, expresada como un porcentaje del peso total de la leche.

Para esta formulación, y por simplicidad, se adoptan valores fijos que representan promedios para los siguientes factores.

- $sl = 20$.
- $g = 3,6\%$.
- $p = 3,1\%$.

3.3.4. Consumo Potencial

El consumo potencial de alimento (*consPot*) para vacas en lactancia se estima a partir de la siguiente expresión, propuesta por el NRC (2001) [93]:

$$consPot(kg) = (0,372 \cdot FCM + 0,0968 \cdot pv^{0,75}) \cdot (1 - e^{-0,192 \cdot (sl+3,67)}) \quad (3.1)$$

Donde:

- *FCM*: medida de la producción de leche corregida por el contenido de grasa, con el fin de estandarizar la producción de leche a un contenido de grasa del 4%. Se utiliza para comparar la eficiencia de la producción de leche de diferentes vacas, independientemente de las variaciones en el contenido de grasa [94].

3.3.5. Requerimientos Energéticos

El modelo considera dos tipos principales de requerimientos energéticos [95]:

Requerimiento Basal

La energía necesaria para las funciones vitales del animal (*reqBasal*) se define como:

$$reqBasal(Mcal) = 0,08 \cdot pv^{0,75} \quad (3.2)$$

Requerimiento de Traslado

La energía consumida al desplazarse desde la sala de ordeño a las distintas zonas (*reqTras*) se calcula como:

$$reqTras(Mcal) = Distancia \cdot NroViajes \cdot aux \cdot pv \quad (3.3)$$

Donde:

- *aux*: La energía requerida para caminar se estableció en 0.00045 Mcal/kg por kilómetro recorrido.

En las zonas donde se proporciona concentrados, se considera que $reqTras = 0$, bajo la premisa de que estos alimentos se suministran dentro de la sala de ordeño.

3.3.6. Energía Bruta y Disponible

La energía bruta (*EB*) se obtiene como:

$$EB(Mcal) = cal \cdot cR \quad (3.4)$$

Donde *cR* es el consumo real de alimento (kg).

La energía disponible (*ED*) para producir leche es:

$$ED(Mcal) = EB - reqBasal - reqTras \quad (3.5)$$

3.3.7. Producción de Leche

La producción de leche (*production*) en litros se calcula como:

$$production(lt) = \frac{ED}{ENl \cdot \rho} \quad (3.6)$$

Donde ρ es la densidad de la leche (1,03 kg/lt) [96] y ENl es la energía neta de lactación, es decir, la energía necesaria para producir un kilogramo de leche [97]:

$$ENl(Mcal/kg) = 0,0929 \cdot g + 0,0547 \cdot p + 0,192 \quad (3.7)$$

Con:

- g : porcentaje de grasa.
- p : porcentaje de proteína.

3.3.8. Agrupación de los Animales

Se considera que los animales se asignan inicialmente a grupos denotados como lotes l , y estos lotes son asignados a las zonas de alimentación. Dentro de un mismo lote, pueden coexistir vacas de todos los tipos t . La cantidad total de animales del rodeo se distribuye entre la cantidad de lotes definida.

3.4. Formulación Matemática

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en dos modelos matemáticos básicos que constituyen el punto de partida para todas las decisiones y avances posteriores. Los modelos realizados por Gastón Notte en su proyecto de maestría han servido como la estructura inicial sobre la cual se diseñó y perfeccionó el enfoque del proyecto [87]. A partir de su implementación y análisis, se tomaron decisiones clave, que serán explicadas en detalle más adelante.

Ambos modelos abordan el problema central de asignación de recursos en el sistema lechero, pero desde perspectivas diferentes y complementarias. Aunque comparten conjuntos, parámetros, variables y restricciones, se distinguen por los criterios que optimizan, lo que los convierte en enfoques paralelos dentro de un mismo marco de análisis.

El primer modelo tiene como objetivo maximizar la producción de leche. Este enfoque considera tanto la cantidad de vacas disponibles como sus características particulares, que determinan la demanda de alimento, mientras que la oferta se define por la disponibilidad de recursos en las distintas zonas del campo, cada una con características específicas. El modelo se centra en la distribución eficiente del ganado lechero entre las zonas de alimentación, sin incluir costos ni márgenes de ganancia en su análisis.

El segundo modelo, en cambio, se orienta a maximizar el beneficio económico, definido como la diferencia entre los ingresos generados por la venta de leche y los costos asociados al sistema. La principal diferencia entre ambos enfoques radica en la función objetivo, que refleja los distintos criterios de optimización empleados.

En conjunto, estos modelos proporcionan una visión integral del problema al abordar tanto la dimensión productiva como la económica del sistema lechero, ofreciendo herramientas complementarias para su análisis y toma de decisiones.

3.4.1. Conjuntos y Parámetros

A continuación se listan los conjuntos y parámetros de los modelos base.

Conjuntos:

- **Etapas:** conjunto de las diferentes etapas en el ciclo de producción.
- **Zonas:** conjunto de las diferentes zonas de alimentación.
- **TiposVacas:** conjunto de los tipos de vacas en el sistema (por ejemplo, diferentes razas o categorías de peso).

- Lotes: conjunto de los lotes de vacas.

Parámetros:

- cantDias: número de días en cada etapa e .
- cantOrdenes: número de ordeños por día.
- Distancia: distancia entre la plataforma de ordeño y cada zona de alimentación z en km.
- Alimento: cantidad de alimento disponible en cada zona de alimentación z .
- cal: cantidad de calorías que brinda el alimento disponible en cada zona de alimentación z en Mcal/kg.
- nroViajes: número de viajes diarios que realizan las vacas entre la plataforma de ordeño y la zona de alimentación z .
- aux: constante de conversión utilizada en el cálculo del requerimiento de traslado $reqTras$.
- ENI: eficiencia neta de la leche producida.
- rho: densidad de la leche en kg/lt.
- precioLeche: precio de venta del litro de leche en dólares americanos (USD).
- costoAlimento: costo del alimento presente en cada zona de alimentación z , representado como un porcentaje del precio de venta del litro de leche.
- PV: peso en kilogramos de cada tipo de vaca t .
- reqBasal: requerimiento basal de energía de cada tipo de vaca t en Mcal.
- consPot: consumo potencial de alimento de cada tipo de vaca t por día en kg.
- cantAnimales: número de animales por tipo de vaca t .

3.4.2. Variables

A continuación se listan las variables de decisión de los modelos base:

- $vL_{e,l,t}$: cantidad de vacas de tipo t en el lote l durante la etapa e .
- $cR_{e,z,l,t}$: consumo real de alimento de vacas de tipo t en la zona z , lote l , y etapa e en kg de MS.
- $aLZ_{e,l,z}$: cantidad de veces que el lote l va a la zona z en la etapa e .
- $consTotal$: cantidad total de alimento que consumen todas las vacas en el sistema en kg de MS.
- $consPotTot$: consumo potencial de alimento de la suma de todas las vacas en el sistema en kg de MS.
- $produccion$: producción total de leche en el sistema en lt. Variable empleada en el Modelo para la Maximización del beneficio económico.
- $beneficio$: beneficio económico total del sistema en USD . Variable empleada en el Modelo para la Maximización de la producción.

3.4.3. Restricciones

A continuación se introducen las restricciones de los modelos base:

■ **Asignación:**

$$\sum_{z \in Zonas} aLZ_{e,l,z} = \text{cantOrdenes} \times \text{cantDias}[e], \quad \forall e \in \text{Etapas}, l \in \text{Lotes} \quad (3.8)$$

Garantiza que el lote l visite las zonas de alimentación la cantidad adecuada de veces por etapa, considerando que esta corresponde al doble de la cantidad de días.

■ **totalVacas:**

$$\sum_{l \in \text{Lotes}} vL_{e,l,t} = \text{cantAnimales}[t], \quad \forall e \in \text{Etapas}, t \in \text{TiposVacas} \quad (3.9)$$

Asegura que el número total de vacas asignadas a los lotes en cada etapa e para cada tipo de vaca t sea igual al total de vacas de ese tipo.

■ **oferta1:**

$$vL_{e,l,t} \times aLZ_{e,l,z} \times \left(\frac{\text{consPot}[t]}{\text{cantOrdenes}} \right) \geq cR_{e,z,l,t}, \quad \forall e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, l \in \text{Lotes}, t \in \text{TiposVacas} \quad (3.10)$$

Asegura de que el consumo de cada vaca de tipo t en una zona z no exceda la mitad de su consumo diario potencial, considerando que las vacas se alimentan en dos ocasiones al día.

■ **oferta2:**

$$\sum_{e \in \text{Etapas}, l \in \text{Lotes}, t \in \text{TiposVacas}} cR_{e,z,l,t} \leq \text{Alimento}[z], \quad \forall z \in \text{Zonas} \quad (3.11)$$

Limita el consumo total de alimento en una zona z a la cantidad disponible de alimento en esa zona.

■ **ConsumoTot:**

$$\text{consTotal} = \sum_{e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, l \in \text{Lotes}, t \in \text{TiposVacas}} cR_{e,z,l,t} \quad (3.12)$$

Calcula el consumo total de alimento como la suma del consumo real de alimento de los animales de todos los tipos en todas las zonas y etapas.

■ **ConsumoPot:**

$$\text{consPotTot} = \sum_{e \in \text{Etapas}, t \in \text{TiposVacas}} \text{consPot}[t] \times \text{cantAnimales}[t] \times \text{cantDias}[e] \quad (3.13)$$

Calcula el consumo potencial total del sistema para todos los tipos de vacas y todas las etapas.

3.4.4. Determinación de la Función Objetivo

Modelo para la Maximización de la Producción

El objetivo de este modelo es maximizar la producción total de leche, dada por la expresión:

$$\begin{aligned} \text{produccion :} & \sum_{e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, l \in \text{Lotes}, t \in \text{TiposVacas}} \frac{(cR_{e,z,l,t} \times \text{cal}[z])}{\text{ENI} * \rho} \\ & - \frac{\left(vL_{e,l,t} \times \left(\frac{\text{reqBasal}[t]}{\text{cantOrdenes}} \right) \times aLZ_{e,l,z} \right)}{\text{ENI} * \rho} \\ & - \frac{(vL_{e,l,t} \times aLZ_{e,l,z} \times \text{Distancia}[z] \times \text{nroViajes} \times \text{aux} \times \text{PV}[t])}{\text{ENI} * \rho} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Modelo para la Maximización del Beneficio Económico

El objetivo de este modelo es maximizar el beneficio económico, dado por la expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{beneficio :} \quad & \sum_{e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, l \in \text{Lotes}, t \in \text{TiposVacas}} \text{precioLeche} \times \left(\left(\frac{cR_{e,z,l,t} \times \text{cal}[z]}{\text{ENI}} \right) \right. \\
 & - \frac{\left(vL_{e,l,t} \times \left(\frac{\text{reqBasal}[t]}{\text{cantOrdenes}} \right) \times aLZ_{e,l,z} \right)}{\text{ENI}} \\
 & - \frac{\left(vL_{e,l,t} \times aLZ_{e,l,z} \times \text{Distancia}[z] \times \text{nroViajes} \times \text{aux} \times \text{PV}[t] \right)}{\text{ENI}} \\
 & \left. - (\text{costoAlimento}[z] \times cR_{e,z,l,t}) \right) \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

3.5. Validación del Modelo Base

La validación del modelo se llevó a cabo de manera incremental, iniciando con la inclusión de restricciones básicas y verificando su correcto funcionamiento antes de incorporar nuevas restricciones. Este enfoque permitió aumentar progresivamente la complejidad del modelo, realizando ajustes en cada fase y asegurando que la calidad de la solución no se viera comprometida.

Dado que el modelo emplea variables enteras, el consumo de memoria aumentó a medida que se agregaban restricciones, ya que los algoritmos de ramificación y corte requieren más recursos para almacenar el árbol de soluciones. Para evaluar su desempeño, se realizaron pruebas con distintos escenarios, validando los modelos matemáticos presentados en la [Sección 3.4](#).

Una vez obtenidos los resultados, se compararon con los valores esperados. En los casos donde existían discrepancias, se llevó a cabo un análisis para identificar sus causas. Estas podían deberse a errores en los resultados esperados o a fallos en el modelado. En este último caso, se realizaron las modificaciones necesarias hasta obtener soluciones alineadas con las expectativas.

Para la etapa inicial de validación, se optó por trabajar con un solo lote. Este enfoque permitió simplificar el análisis, asegurando que las restricciones se cumplieran correctamente antes de incrementar la complejidad del modelo. Además, trabajar con un único lote facilitó el seguimiento de los valores de las variables y la verificación del cumplimiento de las restricciones, permitiendo identificar posibles problemas o conflictos en el modelo. Posteriormente, el proceso se escaló de manera controlada, pasando de un lote a múltiples lotes y etapas.

Validación de Asignación de Lotes a Zonas (Asignación)

Objetivo: Verificar que el lote visite las zonas de alimentación el número correcto de veces por etapa.

Solución obtenida y análisis: Al resolver los modelos, se comprobó que la suma de los valores de la variable $aLZ_{e,l,z}$ por zona es siempre igual a $\text{cantOrdenes} \times \text{cantDias}[e]$, garantizando que el lote visite las zonas de alimentación el número adecuado de veces en cada etapa.

Prueba realizada: Se ejecutaron los modelos con diferentes valores de $\text{cantDias}[e]$ y se confirmó que los días asignados al lote fueran consistentes con los valores esperados. No se encontraron inconsistencias.

Validación del Número Total de Vacas por Tipo (totalVacas)

Objetivo: Verificar que todas las vacas de tipo t estén asignadas a algún lote en cada etapa, asegurando una distribución completa y sin excedentes.

Solución obtenida y análisis: La suma de vacas del lote siempre igualó $\text{cantAnimales}[t]$, tal como lo exige la restricción. Esto confirmó que se respetan el número total de vacas de cada tipo.

Prueba realizada: Se ejecutaron pruebas con diferentes tipos de vacas en el lote y se verificó que el número total de vacas no variaba entre las etapas.

Validación de la Oferta Mínima de Alimento por Vaca (oferta1)

Objetivo: Verificar que el consumo real de las vacas de cada tipo, en cada zona y en cada etapa, no exceda el consumo potencial de cada tipo de vaca.

Solución obtenida y análisis: En los casos donde había suficiente alimento disponible, todo el alimento disponible fue consumido, como era de esperar. Sin embargo, cuando la oferta de alimento era limitada, el modelo ajustó el consumo para asegurar que las vacas consumieran la cantidad óptima para maximizar la producción, respetando así la restricción de no exceder el consumo potencial.

Prueba realizada: Se simuló diferentes niveles de oferta de alimento para las distintas zonas, variando el consumo potencial. En todas las simulaciones, la restricción fue respetada correctamente.

Validación de la Cantidad Máxima de Alimento Disponible por Zona (oferta2)

Objetivo: Asegurar que el consumo total de alimento en cada zona no exceda la cantidad disponible.

Solución obtenida y análisis: Al realizar la prueba con un solo lote, se verificó que los modelos cumplieran correctamente con la restricción. En los casos con disponibilidad limitada de alimento por zona, el modelo ajusta el consumo real de alimento, garantizando que no se excedan los límites establecidos para cada zona. Esto es importante, ya que se busca evitar situaciones de sobreconsumo y mantener el equilibrio en la distribución de recursos.

Prueba realizada: Se ejecutó los modelos con diferentes configuraciones de oferta de alimento en cada zona, simulando tanto escenarios con abundante alimento como con cantidades limitadas. En todos los casos, se verificó que el consumo total de alimento por zona nunca excediera los límites establecidos por la restricción.

Validación de Consumo Total de Alimento (ConsumoTot)

Objetivo: Verificar que la suma total del consumo de alimento se calcule correctamente.

Solución obtenida y análisis: En las simulaciones, el valor de consTotal fue consistente con las expectativas. Esto confirmó que se calcula correctamente el consumo total.

Prueba realizada: Se probaron diferentes configuraciones de vacas y alimento, y se verificó que los valores calculados fueran correctos.

Validación de Consumo Potencial Total de Alimento (ConsumoPot)

Objetivo: Validar que el consumo potencial total de alimento se calcule correctamente, de acuerdo con los valores establecidos en el modelo.

Solución obtenida y análisis: Se validó que el cálculo del consumo potencial total de alimento era correcto, utilizando la fórmula definida en los modelos.

Prueba realizada: Se realizaron simulaciones con diferentes niveles de consumo potencial, cantidad de vacas, y cantidad de días, y se verificó que se calculara correctamente el consumo potencial total.

3.6. Modelo con más de un lote

Inicialmente, el modelo funcionaba correctamente al ser ejecutado con un solo lote. Sin embargo, al intentar escalarlo para incluir dos lotes y más de una etapa, se presentó un problema significativo: el proceso de resolución nunca terminaba, y el modelo continuaba ejecutándose indefinidamente. Este comportamiento inesperado llevó a investigar más a fondo las causas del problema.

Tras un análisis detallado, se identificó que la fuente del inconveniente radicaba en la restricción:

oferta1:

$$vL_{e,l,t} \times aLZ_{e,l,z} \times \left(\frac{\text{consPot}[t]}{\text{cantOrdenes}} \right) \geq cR_{e,z,l,t}, \quad \forall e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, l \in \text{Lotes}, t \in \text{TiposVacas} \quad (3.16)$$

Dicha restricción es no lineal debido a la multiplicación de variables continuas (aLZ y vL). La restricción establece que el consumo real de alimento en una etapa e , proveniente de la zona z y consumido por las vacas del tipo t del lote l , debe ser menor o igual al consumo potencial del tipo en cada ordeño, ajustado por la cantidad de asignaciones del lote a la zona y la cantidad de vacas del tipo en ese lote. Este nivel de detalle es fundamental para reflejar la realidad del sistema y evitar simplificaciones que puedan comprometer la precisión del modelo. Sin embargo, la multiplicación de las variables implicadas hace que el problema sea difícil de resolver con herramientas estándar.

Esto convierte al modelo en uno de naturaleza no lineal, el cual presenta dificultades importantes para su resolución. GLPK, el solver inicialmente empleado, está diseñado principalmente para manejar problemas lineales y enteros, pero no es capaz de gestionar problemas con restricciones no lineales. Como resultado, al intentar resolver el modelo con más de un lote y varias etapas, el solver nunca alcanzaba una solución y quedaba en un bucle infinito.

Una posible solución evaluada fue modificar la formulación de la restricción para que fuera lineal, lo que permitiría que GLPK pudiera resolverla. La linealización generalmente implica la introducción de nuevas variables auxiliares y restricciones adicionales para aproximar el comportamiento no lineal. Por

ejemplo, la multiplicación de dos variables continuas ($x_1 \cdot x_2$) puede reformularse mediante la introducción de dos variables auxiliares (y_1 y y_2) de la siguiente manera [98]:

$$y_1 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2), \quad y_2 = \frac{1}{2}(x_1 - x_2), \quad x_1 \cdot x_2 = y_1^2 - y_2^2.$$

Sin embargo, esta reformulación sigue siendo no lineal y requiere técnicas adicionales, como la aproximación por partes, para obtener una linealización completa. En este caso, las variables involucradas dependen de múltiples dimensiones (etapas, lotes, tipos de vacas y zonas), lo que complica aún más el diseño de una formulación lineal adecuada. Además, estrategias como desarrollos de Taylor o transformaciones logarítmicas, si bien útiles en ciertos contextos, tienden a generar modelos más grandes y complejos computacionalmente.

Debido a estas limitaciones y a que la linealización implicaba una pérdida significativa de eficiencia y claridad en el modelo, se optó por explorar el uso de solvers no lineales que pudieran abordar directamente la estructura original. Este enfoque no solo preserva la integridad de la formulación, sino que también evita la introducción de elementos adicionales que podrían comprometer la robustez del modelo. Además, el uso de herramientas avanzadas permite realizar análisis comparativos y de sensibilidad más detallados.

Finalmente, se decidió emplear NEOS Solver, una herramienta que permite manejar modelos no lineales de alta complejidad y es capaz de ofrecer resultados eficientes en el contexto del problema planteado. Esta elección permitió superar las limitaciones del solver inicial y abrir nuevas posibilidades para un análisis más profundo del modelo.

3.6.1. Validación del modelo base con más de un lote

Además de las validaciones realizadas para el modelo con un solo lote, se incorporó una nueva restricción y su parámetro asociado para limitar la cantidad de vacas por lote.

Objetivo: Limitar la cantidad de vacas por lote para evitar un desbalance en la distribución entre los lotes.

Solución obtenida y análisis: Se incorporó una nueva restricción al modelo que asegura que la cantidad de vacas por lote no sea inferior a un valor mínimo especificado, garantizando una distribución más equilibrada de las vacas entre los lotes.

Nuevo parámetro:

- minlote: número mínimo de vacas por lote l .

Restricción añadida:

$$\sum_{t \in TiposVacas} vL_{e,l,t} \geq \text{minlote}, \quad \forall e \in Etapas, l \in Lotes \quad (3.17)$$

Garantiza que el número de vacas asignado a cada lote l sea al menos el mínimo establecido, evitando así que el modelo elija asignar un lote con una vaca sola o configuraciones inadecuadas desde el punto de vista del manejo del rodeo.

3.7. Modelo con cantidad de vacas variables

A diferencia de los modelos presentados previamente, en los cuales la cantidad de vacas de cada tipo se definía como un parámetro (cantAnimales), la presente versión del modelo la considera como una variable. Esto permite que, en función de la disponibilidad de alimento, el modelo determine la cantidad óptima de animales de cada tipo.

Además, este modelo redefine ciertos parámetros, anteriormente independientes del tipo de vaca (t), para hacerlos dependientes de dicho factor. El porcentaje de grasa (g) y proteína (p) ahora varían según el tipo de vaca, lo que afecta directamente la energía neta de lactación (ENL).

$$ENL[t] = 0,0929 \cdot g[t] + 0,0547 \cdot p[t] + 0,192 \quad (3.18)$$

Del mismo modo, el precio de la leche pasa a depender del tipo de vaca. Las vacas de menor tamaño producen leche con un mayor porcentaje de grasa y, por lo tanto, un mayor precio por litro. Por otro lado, las vacas de mayor tamaño producen leche con un menor porcentaje de grasa, lo que reduce su precio. Estas adaptaciones permiten reflejar con mayor precisión las diferencias específicas entre los tipos de vacas, mejorando la representatividad del modelo y su capacidad para optimizar los resultados.

Por otra parte, esta alternativa permite incluir una cantidad mínima de vacas mediante el uso del parámetro (*minAnimales*), el cual puede depender o no de los tipos de vacas. Es decir, se puede establecer un mínimo total o un mínimo por tipo de vaca. En el primer caso, la restricción se define como:

$$\sum_{t \in \text{TiposVacas}} \text{cantAnimales}[t] \geq \text{minAnimales} \quad (3.19)$$

En el segundo caso, el parámetro *minAnimales* se define para cada tipo de vaca, y la restricción correspondiente es:

$$\text{cantAnimales}[t] \geq \text{minAnimales}[t], \quad \forall t \in \text{TiposVacas} \quad (3.20)$$

3.7.1. Validación del modelo con vacas variables

La validación de este modelo se realizó mediante la comparación con el modelo de vacas fijas, evaluando su capacidad para mejorar los resultados en términos de optimización de la producción y el beneficio económico.

En primer lugar, se ejecutó el modelo permitiendo que la cantidad de vacas de cada tipo se ajuste de manera óptima según la disponibilidad de alimento. Los resultados obtenidos se compararon con aquellos generados por el modelo de vacas fijas, donde la cantidad de animales es un parámetro predefinido. Se observó que la solución óptima alcanzada por el modelo con cantidad de vacas variables fue superior en términos de beneficios económicos y eficiencia productiva, lo que respalda su validez y utilidad como herramienta de optimización.

Adicionalmente, se realizaron pruebas variando la cantidad de alimento disponible en el sistema para analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes escenarios de restricción alimenticia. Los resultados indicaron que el modelo ajusta de manera coherente la cantidad de animales, seleccionando aquellas combinaciones que maximizan la producción sin exceder los recursos disponibles.

Como verificación adicional, se compararon los resultados obtenidos con aquellos del modelo de vacas fijas, pero considerando en este último la misma cantidad total de vacas que el modelo con vacas variables, redistribuyéndolas entre los distintos tipos. Esto permitió confirmar que el modelo con cantidad de vacas variables selecciona correctamente la combinación de tipos de vacas más adecuada para optimizar los resultados.

En conjunto, estos análisis validan la efectividad del modelo, demostrando que permite una asignación óptima de la cantidad y tipo de vacas en función de los recursos disponibles, mejorando la capacidad de toma de decisiones en la producción lechera.

3.8. Modelos con enfoque ambiental - Metano

Los modelos con enfoque ambiental amplían los desarrollos previos de optimización de la producción de leche y el beneficio económico, incorporando parámetros, variables y restricciones adicionales relacionadas con las emisiones de metano entérico.

El metano entérico es un gas de efecto invernadero generado durante la digestión de los rumiantes, como las vacas, a través de un proceso conocido como fermentación entérica. Este fenómeno ocurre en el rumen, donde microorganismos descomponen el alimento ingerido, produciendo metano como subproducto. Este gas es eliminado principalmente por eructación a través de la boca [99].

En este trabajo, todas las referencias al “metano” se enfocan exclusivamente en el metano entérico, generado por los procesos digestivos de los animales.

El objetivo principal es calcular con precisión estas emisiones, lo que permitirá evaluar su impacto en la producción de leche y en los beneficios económicos. Este análisis facilitará decisiones informadas sobre si se debe buscar reducir las emisiones o utilizar la información obtenida para optimizar la gestión del sistema, en función de los objetivos planteados.

La construcción del modelo incluye la incorporación de las emisiones de metano mediante ecuaciones basadas en las “Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero”. Estas ecuaciones permiten estimar las emisiones de metano en función del consumo de alimento de los animales y del factor de conversión de energía bruta en metano [100].

El cálculo de las emisiones de metano se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$EF = \frac{GE \cdot Y_m}{55,65}$$

Donde:

- EF es el factor de emisión (kg CH_4 por animal por etapa), el cual se define como la cantidad de gas de efecto invernadero (GEI) liberado a la atmósfera por unidad de actividad [101].
- GE es la ingesta de energía bruta (MJ por animal por día).
- Y_m representa el factor de conversión en metano, definido como el porcentaje de la energía bruta del alimento disponible en cada zona de alimentación z que se transforma en metano.
- 55,65 es el contenido energético del metano, expresado en MJ/kg CH_4 .

En este trabajo, el valor del Y_m se toma de la Tabla 10.2 del capítulo 10 de las Directrices del IPCC de 2006 [102]. Este factor está directamente relacionado con la digestibilidad del alimento: cuanto mayor es el Y_m , mayor es la proporción de energía bruta del alimento que se convierte en metano, lo que implica mayores emisiones. Según estas directrices, cuando se dispone de alimentos de alta digestibilidad y energía, deben utilizarse los valores inferiores de Y_m , mientras que para alimentos de menor calidad digestible, se recomienda emplear los valores superiores.

Para la formulación de los modelos, se asume que la pastura tiene el Y_m más alto, dado su menor calidad digestible, lo que resulta en mayores emisiones. Por otro lado, la suplementación con concentrados se considera de mejor calidad, con mayor digestibilidad y energía, por lo que se le asigna un Y_m más bajo. Esto implica que una menor proporción de la energía bruta obtenida de la suplementación se convierte en metano, reflejando su impacto ambiental más favorable en comparación con la pastura [59].

Para calcular la emisión total, se suman los factores de emisión de todos los animales, considerando cada tipo t y todas las zonas de alimentación z . De esta manera, se obtiene el valor global de las emisiones en el sistema.

3.8.1. Parámetros

- Y_m : Factor de conversión en CH_4 , dependiente de cada zona de alimentación z .
- AuxEF1: Parámetros auxiliar para obtener el factor de emisión de metano en kg.
- AuxGE: Parámetro auxiliar para la conversión de Mcal a MJ, siendo 1 Mcal equivalente a 4.184 MJ.

3.8.2. Variables

- $EF_{e,z,t}$: factor de emisión de metano por etapa e , zona z , y tipo de vaca t (≥ 0).
- $GE_{e,z,t}$: ingesta de energía bruta por etapa e , zona z , y tipo de vaca t , expresada en MJ.
- Metano: cantidad total de metano liberado (≥ 0).

3.8.3. Restricciones

- **CálculoGE:**

$$GE_{e,z,t} = \sum_{l \in \text{Lotes}} (cR_{e,z,l,t} \times \text{cal}[z] \times \text{AuxGE}), \quad \forall e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, t \in \text{TiposVacas}$$

Cálculo de la energía bruta consumida, multiplicando el alimento consumido por su valor calórico, convertido a MJ para cada etapa e , zona de alimentación z y tipo de vaca t .

- **CálculoEF:**

$$EF_{e,z,t} = \frac{GE_{e,z,t} \times \left(\frac{Y_m[z]}{100} \right)}{\text{AuxEF1}}, \quad \forall e \in \text{Etapas}, z \in \text{Zonas}, t \in \text{TiposVacas}$$

Determina las emisiones de metano en kilogramos (kg CH_4) para cada etapa e , zona de alimentación z y tipo de vaca t . a partir de la energía bruta consumida y del factor de conversión en metano de cada zona de alimentación z

- **MetanoTotal:**

$$\text{Metano} = \sum_{z \in \text{Zonas}, t \in \text{TiposVacas}} EF_{e,z,t}, \quad \forall e \in \text{Etapas}$$

Calcula el total de metano emitido en kilogramos (kg) sumando las emisiones de todas las zonas y tipos de vacas en cada etapa.

3.8.4. Validación del modelo con enfoque ambiental - metano

La validación del modelo de emisiones de metano se basa en la comparación con datos experimentales existentes. El propósito es asegurarse de que el modelo puede estimar con precisión las emisiones de metano generadas por el sistema de producción lechera bajo diferentes escenarios. Para esto, se utilizaron datos experimentales de emisiones de metano para validar las predicciones del modelo. Estos datos provienen de estudios previos que han medido las emisiones de metano en condiciones similares a las del caso de estudio [103] [104] [105]. Las emisiones calculadas por el modelo se compararon con las mediciones directas de metano para determinar el grado de precisión del modelo. En este sentido, las desviaciones entre las predicciones y las mediciones reales deben ser lo suficientemente pequeñas para considerar que el modelo tiene un buen ajuste.

3.9. Modelo con enfoque ambiental - Nitrógeno

Este enfoque incorpora restricciones ambientales asociadas al nitrógeno, utilizando los modelos base de optimización de producción de leche y beneficio económico como punto de partida. El propósito es evaluar cómo la gestión del nitrógeno afecta tanto la producción de leche como los beneficios económicos, considerando la excreción de nitrógeno como un factor ambiental importante en el sistema lechero.

En el presente caso de estudio, no se analizará el balance de nitrógeno como restricción, ya que se vincula directamente con la producción de leche, el cual es un valor que es calculado por el modelo. En su lugar, el estudio se centrará en la excreción de nitrógeno como un indicador clave para evaluar cómo diferentes estrategias de alimentación pueden reducir al mínimo dicha excreción. Se estima que las vacas lecheras retienen entre el 20 % y el 25 % del nitrógeno total consumido en la leche y los músculos, mientras que el restante 75 % a 80 % se excreta en heces y orina [100][106].

Se aplicarán una serie de fórmulas relacionadas a la ingesta de nitrógeno. En primer lugar, se trabajará con el nitrógeno consumido, que vincula directamente el consumo de MS y la concentración de nitrógeno por proteína cruda, la cual varía según el tipo de alimento proporcionado [107] [100].

El modelo calcula el nitrógeno consumido por el ganado en cada zona, tomando en cuenta el porcentaje de proteína cruda en la dieta. Con base en este consumo, se determina la cantidad de nitrógeno excretado (heces y orina) por cada zona de alimentación.

Al igual que el modelo de metano, este modelo de nitrógeno se convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones, ya que permite evaluar el impacto de establecer restricciones en la cantidad de nitrógeno excretado. Esto brinda la posibilidad de equilibrar los objetivos productivos con los aspectos ambientales, gestionando de manera eficiente los recursos disponibles.

3.9.1. Parámetros

- PC: porcentaje de Proteína Cruda en la dieta, según cada zona de alimentación z .
- AuxPC: factor de conversión de proteína cruda a nitrógeno, en kg (16g de N en 100g de proteína).
- NretF: fracción de retención de nitrógeno .

3.9.2. Variables

- cRN_z : nitrógeno consumido por cada zona de alimentación z , en kg.
- Nitrogeno $_z$: nitrógeno excretado por cada zona de alimentación z , en kg.

3.9.3. Restricciones

- **Restricción de cálculo de nitrógeno consumido (NitrogenoConsumido):**

$$cRN_z = \sum_{e \in 1..cantEtapas, l \in 1..cantLotes, t \in 1..cantTiposVacas} cR_{e,z,l,t} \times \frac{PC[z]}{AuxPC}, \quad \forall z \in Zonas$$

Esta restricción calcula el nitrógeno consumido por zona, multiplicando el consumo de alimento por el porcentaje de proteína cruda de la zona y dividiendo por el factor de conversión [107] [100].

- **Restricción de cálculo de nitrógeno excretado (NitrogenoExcretado):**

$$\text{Nitrogeno}_z = cRN_z \times (1 - \text{NretF}), \quad \forall z \in Zonas$$

Esta restricción determina el nitrógeno excretado por zona, considerando la fracción de retención de nitrógeno [107] [100].

3.9.4. Validación del modelo con enfoque ambiental - Nitrógeno

La validación del modelo de excreción de nitrógeno se basa en la comparación con datos experimentales existentes. El propósito es asegurar que el modelo pueda estimar con precisión la cantidad de nitrógeno excretado en el sistema de producción lechera bajo diferentes estrategias de alimentación.

Para esto, se utilizaron datos experimentales sobre la ingesta y excreción de nitrógeno en sistemas lecheros similares al caso de estudio. Estos datos provienen de estudios previos que han medido la retención y excreción de nitrógeno en vacas lecheras bajo distintas condiciones de alimentación [107] [100]. Las cantidades de nitrógeno excretado calculadas por el modelo se compararon con mediciones directas reportadas en la literatura para evaluar el grado de precisión de las estimaciones.

Dado que la fracción de nitrógeno retenido en leche y tejidos se encuentra en el rango del 20 % al 25 %, mientras que el restante 75 % a 80 % se excreta en heces y orina [100][106], el modelo debe reflejar esta distribución dentro de un margen aceptable. La validación busca garantizar que las desviaciones entre las predicciones del modelo y los valores reportados sean mínimas, permitiendo su uso como herramienta confiable en la toma de decisiones.

3.10. Implementación

En el campo de la investigación operativa y la optimización matemática, existen diversos programas de software diseñados para resolver problemas de programación lineal y no lineal. Estos programas utilizan algoritmos avanzados para proporcionar soluciones eficientes y precisas a problemas complejos de optimización. A continuación, se presenta una visión general de los software utilizados para este trabajo.

GLPK (GNU Linear Programming Kit)

GLPK es un conjunto de bibliotecas y herramientas para resolver problemas de programación lineal y programación lineal entera mixta. Desarrollado por el Proyecto GNU, GLPK es un software de código abierto y gratuito distribuido bajo la Licencia Pública General de GNU (GPL). GLPK incluye:

- **GLPSOL:** Una herramienta de línea de comandos para resolver modelos escritos en GMPL (GNU Math Programming Language).
- **Bibliotecas GLPK:** Funciones para definir y resolver problemas de optimización, manipular matrices esparsas, y realizar otras operaciones relacionadas con la optimización matemática.
- **Algoritmos:** Incluye el algoritmo Simplex, el método de puntos interiores y el algoritmo de ramificación y acotación.

GLPK es especialmente útil para usuarios que buscan una solución libre y de código abierto para problemas de optimización [108].

NEOS Server para Optimización

NEOS Server es una plataforma en línea que proporciona acceso a una amplia gama de solvers de optimización para resolver problemas de programación matemática. NEOS (Network-Enabled Optimization System) es un proyecto desarrollado por el Centro de Optimización Matemática de la Universidad de Wisconsin-Madison y es ampliamente utilizado tanto en la academia como en la industria [109][110].

Entre sus principales ventajas, NEOS Server permite resolver problemas de optimización como programación lineal, entera, no lineal, cuadrática, dinámica y redes o flujos. Los usuarios tienen acceso a solvers comerciales y de código abierto, incluyendo **CPLEX** para programación lineal y entera mixta, **Gurobi** para problemas grandes y complejos, **Ipopt** para programación no lineal, **MINOS** para programación lineal y no lineal, y **GLPK** como alternativa de código abierto, entre otros.

El servidor destaca por su facilidad de uso, ya que admite diversas interfaces para enviar problemas, como formularios web, envío por correo electrónico y APIs, lo que lo hace accesible para diferentes tipos de usuarios. Además, al ser gratuito, es ampliamente utilizado en entornos educativos y de investigación, permitiendo experimentar con técnicas avanzadas de optimización sin necesidad de software comercial costoso [109].

Uno de los solvers disponibles en NEOS Server es MINLP (Mixed-Integer Nonlinear Programming), que aborda problemas de programación no lineal de enteros mixtos mediante el método de ramificación y acotación. Este solver garantiza soluciones globales en problemas convexos y, aunque no asegura óptimos globales en casos no convexos, es más robusto que métodos como la descomposición de Benders o la aproximación exterior, ya que preserva amplias regiones factibles. Además, es una herramienta eficaz para manejar problemas que incluyen variables discretas [111].

Excel

Excel fue empleado para la gestión y análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones. Se utilizaron hojas de cálculo para realizar análisis descriptivos, crear tablas de resumen y generar gráficos, lo que facilitó la visualización y comparación de los resultados entre diferentes escenarios.

El equipo utilizado para los experimentos computacionales cuenta con las siguientes especificaciones:

- **Procesador:** Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz (hasta 2.42 GHz)
- **RAM:** 12.0 GB
- **Sistema Operativo:** Windows 11 (64 bits, procesador x64)

Todos los casos de validación presentados en este capítulo fueron resueltos utilizando GLPK. Por otro lado, las experimentaciones computacionales que se detallan en el [Capítulo 4](#) se llevaron a cabo empleando la herramienta NEOS Solvers, en particular el solucionador MINLP en formato AMPL, complementado con el uso de Excel para facilitar el análisis de los resultados.

Capítulo 4

Experimentación computacional

Este capítulo presenta los experimentos computacionales realizados sobre los modelos previamente definidos, con el objetivo de analizar distintos escenarios productivos y evaluar el impacto de diversas estrategias de manejo en el sistema lechero. Se describen en detalle las configuraciones experimentales utilizadas, incluyendo los parámetros considerados y las restricciones aplicadas en cada caso. Asimismo, se justifica la selección de los escenarios analizados en función de su relevancia para la toma de decisiones en la producción lechera. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos y su interpretación en el contexto del estudio, permitiendo extraer conclusiones sobre la eficiencia y sostenibilidad del sistema modelado.

4.1. Definición de Casos de Estudio

En esta sección se describen los casos de estudio analizados en los experimentos computacionales, los cuales se definen en función de la disponibilidad y las características de las zonas de alimentación del campo. Cada caso de estudio tiene como objetivo obtener información sobre el comportamiento de la solución óptima y las variables de interés cuando el modelo experimenta cambios en los parámetros, como se detalló en la [Subsección 2.3.1](#), los cuales se ajustan según cada caso y se denominan iteraciones.

Como se mencionó anteriormente, cada zona de alimentación está asociada a una cantidad específica de Materia Seca (MS) disponible. La caracterización del rodeo se basa en el peso vivo, el potencial genético de las vacas y la distribución de los animales según su tipo. A menos que se indique lo contrario, todos los modelos en los que la cantidad de animales es un parámetro consideran un rodeo compuesto por dos tipos de vacas, tomando como referencia una “*Configuración base*” que incluye 50 vacas de tipo 1 y 150 vacas de tipo 2. Esta configuración se seleccionó con el objetivo de representar un sistema lechero típico de escala mediana en Uruguay, que combina animales de alto rendimiento con otros de menor productividad pero mayor presencia en la realidad productiva nacional. Las características principales de cada tipo son las siguientes:

- **Vacas tipo 1:** con un peso vivo (PV) de 600 kg y un potencial genético de producción de 9000 litros por lactancia (305 días), representan animales de alto mérito genético, comunes en sistemas más intensivos.
- **Vacas tipo 2:** con un PV de 500 kg y un potencial de producción de 5500 litros en 305 días, representan vacas de genética más moderada, frecuentes en tambos semi-intensivos o extensivos.

La proporción de 1:3 entre vacas tipo 1 y tipo 2 refleja la distribución observada en muchos sistemas lecheros nacionales, donde coexisten animales con distintos niveles de producción. Esta mezcla permite capturar la heterogeneidad del rodeo, evaluar el desempeño del sistema bajo distintas condiciones y mantener un equilibrio realista entre productividad, consumo de alimento y requerimientos energéticos.

En cuanto a las zonas de alimentación, se definieron tres áreas diferenciadas:

- **Zona 0 (z0):** Pasturas con una densidad energética de 1.4 Mcal/kg MS, ubicadas a 1.5 km de la sala de ordeño.
- **Zona 1 (z1):** Forraje conservado con una densidad energética de 1.5 Mcal/kg MS, ubicado a 2 km de la sala de ordeño.

- **Zona 2 (z2):** Concentrados con una densidad energética de 1.65 Mcal/kg MS, que se consumen directamente en la sala de ordeño (distancia 0 km).

El consumo potencial total, calculado como la suma del consumo potencial de todos los animales del rodeo, es un indicador clave del modelo, ya que representa la demanda teórica máxima de materia seca (MS) del sistema en condiciones sin restricciones. Este valor depende directamente de la cantidad y tipo de vacas presentes, dado que el consumo potencial varía según el peso vivo y la producción esperada de cada categoría animal. Su definición se encuentra detallada en la [Subsección 3.3.4](#).

Este consumo potencial total se utiliza como referencia para definir los distintos escenarios de simulación. En particular, se toma como punto de partida un caso ideal en el que los animales disponen del 100 % del alimento que pueden consumir, y a partir de allí se ajusta la disponibilidad para representar condiciones de restricción. Cada escenario se construye variando la cantidad de MS disponible en cada zona, expresada como un porcentaje del consumo potencial total de la configuración base.

Esta metodología permite estandarizar las simulaciones, facilitando la comparación entre resultados y asegurando que las restricciones alimenticias estén directamente vinculadas con la capacidad de consumo del rodeo. A su vez, permite analizar de forma controlada cómo diferentes niveles de oferta de alimento impactan en variables clave del sistema, como la producción de leche, el uso energético o el beneficio económico.

En los casos en los que no se aclara lo contrario, el consumo potencial total de la configuración base se distribuye entre las tres zonas de alimentación de acuerdo con una proporción constante, a lo que a efectos de este estudio se le llamó *Escenario Base*:

- **60 %** del alimento se asignó a la Zona 0 (z0).
- **30 %** a la Zona 1 (z1).
- **10 %** a la Zona 2 (z2).

En los casos donde el alimento disponible es inferior al consumo potencial total, es decir, en situaciones de escasez de alimento, las disponibilidades se calcularon con base en los porcentajes reflejados en la [Tabla 4.1](#); es importante señalar que en esos kilogramos no se contempla un remanente, el cual es necesario para no afectar el posterior crecimiento del pasto. La intención es partir de escenarios donde el alimento disponible sea suficiente o incluso exceda el consumo potencial, y gradualmente disminuir la cantidad de alimento disponible. Este enfoque busca reflejar escenarios en los que el recurso alimenticio se ve reducido progresivamente, permitiendo evaluar cómo la disminución afecta tanto el consumo, la producción como el beneficio económico del sistema. La reducción gradual se justifica por la necesidad de simular diferentes condiciones de escasez que puedan ocurrir a lo largo del tiempo, con el fin de entender mejor cómo gestionar los recursos alimenticios en situaciones de estrés o crisis alimentaria.

% del consumo potencial total	Disponibilidad total (kg MS)	Disponibilidad z0 (kg MS)	Disponibilidad z1 (kg MS)	Disponibilidad z2 (kg MS)
100 %	113019	67811	33906	11302
95 %	107369	64421	32211	10737
90 %	101718	61030	30515	10172
85 %	96067	57640	28820	9607
80 %	90417	54249	27125	9042
75 %	84764	50859	25429	8476
70 %	79113	47468	23734	7911
65 %	73463	44078	22039	7346
60 %	67811	40687	20343	6781
55 %	62160	37296	18648	6216
50 %	56510	33906	16953	5651
45 %	50859	30515	15258	5086
40 %	45208	27125	13562	4521

Tabla 4.1: Disponibilidad de alimento según el porcentaje del consumo potencial total de la configuración base.

A lo largo de este capítulo, se hará referencia con frecuencia al “*Escenario Base*”. Este término, como se mencionó, se utiliza para describir el escenario en el que la disponibilidad de alimento es equivalente

al 100 % del consumo potencial total de la *Configuración base* del rodeo, y se corresponde con la primera fila de la [Tabla 4.1](#).

Todos los resultados serán presentados por etapa, considerando que cada etapa tiene una duración de 30 días, si no se indica lo contrario.

En las gráficas presentadas, se utiliza un esquema de color específico para facilitar la comprensión de los diferentes aspectos que se analizan. El color azul y sus tonalidades se destinan a representar la producción en todas sus variantes. Por otro lado, el verde, en sus diversas tonalidades, simboliza los beneficios asociados, abarcando el aspecto económico del sistema que resulta de las prácticas de manejo y producción analizadas. Finalmente, el color naranja y sus matices se utilizarán para representar cualquier otra variable relevante, incluyendo tanto el consumo potencial y real de recursos, así como las emisiones de metano y nitrógeno. Esta codificación de colores se implementará a lo largo de las diferentes secciones de los casos de estudio para garantizar una interpretación clara y eficaz de la información presentada.

A continuación, se presenta la lista de los casos de estudio que serán analizados a lo largo del capítulo. Cada caso está diseñado para abordar objetivos específicos, permitiendo evaluar diversos aspectos del sistema bajo diferentes condiciones. La organización y enfoque de los casos tienen como finalidad proporcionar una comprensión integral de las interacciones entre las variables clave y los resultados obtenidos.

1. Comparación de objetivos: producción vs. beneficio

Se analiza cómo los modelos matemáticos optimizan la producción de leche y el beneficio económico, identificando diferencias en la asignación de los recursos en ambos enfoques.

2. Evaluación e implicaciones de la gestión ineficiente de los recursos alimenticios

Se evalúa el impacto de variaciones en la disponibilidad de alimento, evaluando escenarios de insuficiencia y excedente, y su efecto en la producción de leche y el beneficio económico.

3. Estrategias de inversión en suplementación

Se exploran diferentes estrategias de suplementación en función de la oferta de alimento, evaluando los beneficios en distintos escenarios.

4. Estrategias de reducción del tamaño y configuración del rodeo

Se investiga cómo la cantidad de vacas y su distribución afectan la producción y el beneficio, considerando variaciones en la disponibilidad de alimento.

5. Comparación del beneficio económico: inversión en suplementación vs. reducción del tamaño del rodeo

Se comparan las dos estrategias presentadas en los casos 3 y 4 para abordar limitaciones de alimento.

6. Evaluación del impacto ambiental en la producción lechera: análisis de emisiones de metano y su relación con la rentabilidad del sistema

Se analiza cómo distintas estrategias productivas impactan las emisiones de metano, considerando su relación con la alimentación y su posible regulación.

7. Evaluación de limitaciones asociadas a nutrientes: Nitrógeno

Se analizan cómo posibles limitaciones en la excreción de nitrógeno pueden impactar en la producción lechera y el beneficio económico.

8. Sensibilidad del modelo económico con vacas variables al precio de la leche

Se evalúa cómo cambios en el precio de la leche y su contenido de grasa afectan la rentabilidad del sistema y las decisiones productivas.

9. Análisis anual de disponibilidad de alimento en función de la estación

Se modela la variabilidad estacional en la oferta de alimento y su efecto en la producción y el beneficio a lo largo del año.

En la siguiente sección, se presentan estos casos en detalle, junto con su análisis y los resultados obtenidos.

4.2. Casos de Estudio

A continuación, se describen y presentan los resultados de los nueve casos de estudio mencionados anteriormente.

4.2.1. Caso de Estudio 1: Comparación de objetivos: producción vs. beneficio

Dependiendo de si el foco está en maximizar la producción de leche o en optimizar el beneficio económico, las decisiones sobre la asignación de recursos, la alimentación del ganado y la distribución de los animales pueden variar significativamente.

Este estudio compara dos enfoques claves para la optimización del sistema lechero: un modelo orientado a maximizar la producción de leche y otro diseñado para maximizar el beneficio económico. Aunque ambos modelos comparten los mismos recursos y restricciones, generan efectos distintos en el sistema. Mientras que el modelo productivo busca obtener la mayor cantidad de leche posible sin considerar los costos asociados, el modelo económico integra tanto los costos de alimentación como los precios de venta de la leche para optimizar la rentabilidad del sistema.

Objetivo: Evaluar el impacto de la función objetivo en la distribución de recursos

Analizar cómo la elección de la función objetivo influye en las decisiones del sistema, especialmente en lo que respecta a la asignación de recursos, la distribución de las vacas entre las diferentes zonas de alimentación, y las estrategias para maximizar los resultados bajo diferentes condiciones económicas y productivas.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

- Escenario 1: En este caso, el 100 % del consumo potencial de la configuración base está disponible en cada una de las tres zonas de alimentación (z_0 , z_1 , z_2). En la [Tabla 4.2](#) se presentan los valores utilizados para este caso.
- Escenario 2: Este escenario se centra en el modelo productivo, donde se limita la disponibilidad de z_2 , que tiene la mayor densidad energética. Como resultado, el alimento disponible se distribuye en exceso en z_0 y z_1 . En la [Tabla 4.3](#) se presentan los valores utilizados para este caso.
- Escenario 3: Este escenario se centra en el modelo económico, al limitar la disponibilidad de z_0 , que es la más económica, mientras que existe un exceso de alimento en z_1 y z_2 . En la [Tabla 4.4](#) se presentan los valores utilizados para este caso.
- Escenario 4: En este escenario, el alimento total disponible excede el consumo potencial, y el exceso se reparte entre las tres zonas de alimentación. En la [Tabla 4.5](#) se presentan los valores utilizados para este caso.

2. Modelos considerados:

- Modelo Productivo
- Modelo Económico

3. Variables y parámetros clave

- Parámetro variable entre escenarios:
 - Alimento[z]: Disponibilidad de alimento (kg MS)
- Variables dependientes:
 - producción: Producción de leche (l)
 - beneficio: Beneficio económico (USD)
- Variable controlada:
 - Disponibilidad de alimento: alimento disponible por zona (kg MS)
 - Consumo por zona: alimento consumido por zona (kg MS)
 - % Consumido: Porcentaje del alimento disponible consumido por zona (%)
 - Asignación: cantidad de veces que cada lote va a cada zona en la etapa

Zona	Alimento (kg MS)
z_0	113019
z_1	113019
z_2	113019

Tabla 4.2: Alimento Disponible Escenario 1

Zona	Alimento (kg MS)
z_0	100000
z_1	100000
z_2	20000

Tabla 4.3: Alimento Disponible Escenario 2

Zona	Alimento (kg MS)
z0	75000
z1	50000
z2	50000

Tabla 4.4: Alimento Disponible Escenario 3

Zona	Alimento (kg MS)
z0	75000
z1	40000
z2	20000

Tabla 4.5: Alimento Disponible Escenario 4

En las tablas [Tabla 4.6](#), [Tabla 4.7](#), [Tabla 4.8](#) y [Tabla 4.9](#) se presentan los resultados obtenidos para los modelos en cada escenario analizado. En todos los escenarios, se consideraron dos lotes (L1 y L2), con un mínimo de 50 vacas por lote y una única etapa de 30 días. La *Cant de asignaciones* representa el número de veces que cada lote fue asignado a una determinada zona.

Modelo		z0		z1		z2	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2
Productivo	Cant de asignaciones	0	0	0	0	60	60
	Alimento (kg MS)	113019		113019		113019	
	Alimento consumido (kg MS)	0		0		113019	
	% consumido	0		0		100	
	Producción (l)	186737					
	Beneficio (USD)	39751					
Económico	Cant de asignaciones	60	60	0	0	0	0
	Alimento consumido (kg MS)	113019		0		0	
	% consumido	100		0		0	
	Producción (l)	139524					
	Beneficio (USD)	45599					

Tabla 4.6: Asignación y consumos de los modelos económico y productivo en el Escenario 1

Modelo		z0		z1		z2	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2
Productivo	Cant de asignaciones	0	0	35	60	25	0
	Alimento (kg MS)	100000		100000		20000	
	Alimento consumido (kg MS)	0		93024.51		19994.89	
	% consumido	0		93.02		99.97	
	Producción (l)	154349					
	Beneficio (USD)	32182					

Tabla 4.7: Asignación y consumos modelo productivo en el Escenario 2

Modelo		z0		z1		z2	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2
Económico	Cant de asignaciones	24	60	0	0	36	0
	Alimento (kg MS)	75000		50000		50000	
	Alimento consumido (kg MS)	74982		0		38036	
	% consumido	99.98		0		76	
	Producción (l)	152861					
Beneficio (USD)	43688						

Tabla 4.8: Asignación y consumos modelo económico en el Escenario 3

En el Escenario 1, el modelo productivo concentra la totalidad del alimento consumido en la zona con mayor densidad energética (z2), logrando maximizar la producción a 186737 litros de leche, con un beneficio asociado de 39751 USD. Por otro lado, el modelo económico opta por la zona más económica (z0), alcanzando un beneficio de 45598 USD, lo que representa un 14.71 % más que el modelo productivo. Sin embargo, esta estrategia reduce la producción a 139524 litros, una disminución del 25.3 %.

Modelo		z0		z1		z2	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2
Productivo	Cant de asignaciones	41	0	4	59	15	1
	Alimento (kg MS)	75000		40000		20000	
	Alimento consumido (kg MS)	53031		39996		19992	
	% consumido	70.71		99.99		99.96	
	Producción (l)	148863					
	Beneficio (USD)	39285					
Económico	Cant de asignaciones	35	42	24	3	1	15
	Alimento consumido (kg MS)	74982		18045		19992	
	% consumido	99.98		45.11		99.96	
	Producción (l)	146516					
	Beneficio (USD)	42195					

Tabla 4.9: Asignación y consumos de los modelos económico y productivo en el Escenario 4

Estos resultados evidencian estrategias diferenciadas: el modelo productivo prioriza la maximización de la producción al utilizar alimento de alta calidad, mientras que el modelo económico optimiza el rendimiento financiero al minimizar los costos de alimentación, aún a expensas de una menor cantidad de leche producida.

En el Escenario 2, el modelo prioriza la asignación de vacas a las zonas con mayor densidad energética (z1 y z2), logrando una producción total de 154349 litros de leche y un beneficio asociado de 32192 USD.

En relación con el consumo de alimento, el modelo emplea el 100 % del recurso disponible en la zona 2 y el 93.02 % en la zona 1, mientras que en la zona 0, que posee la menor densidad energética, no se registra consumo. Esta estrategia mantiene la misma orientación del modelo productivo reflejada en el escenario anterior, priorizando las zonas con mayor aporte energético por unidad de alimento para maximizar la producción.

En el modelo económico aplicado al escenario 3, los resultados evidencian la asignación de recursos para maximizar el beneficio cuando la disponibilidad en la zona más económica es limitada. En la zona z0, que representa la opción más accesible en términos económicos, se consume el 100 % del alimento disponible. Ante esta restricción, se recurre a z2, donde se utiliza el 76 % del alimento disponible. Este consumo refleja la diferencia con el potencial de los animales, ya que la insuficiencia en la zona más económica (z0) obligó a complementar con otra fuente (z2). A pesar de ser la menos económica, la zona z2 ofrece una mayor densidad energética, lo que optimiza la producción por unidad de alimento consumido. Por otro lado, en la zona z1 no hay consumo, dado que las necesidades de los animales pueden cubrirse con los alimentos de las otras zonas.

La [Tabla 4.10](#) muestra la relación entre la producción y el beneficio al priorizar el consumo restante en la zona intermedia (z1) en lugar de la zona más costosa (z2). Con esta asignación, la producción alcanza los 143697 litros, lo que representa una reducción de 13750 litros (8.73 %) en comparación con el Escenario 3, mientras que el beneficio resultante es de 40555 USD, un 7.17 % menor que en dicho escenario. Estos resultados refuerzan la estrategia del modelo económico, que optimiza la relación entre costo y aporte energético, recurriendo a las zonas más costosas solo cuando es necesario para cubrir el consumo potencial.

Modelo		z0		z1		z2	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2
Económico	Cant de asignaciones	3	59	57	1	0	0
	Alimento (kg MS)	75000		50000		0	
	Alimento consumido (kg MS)	75000		38015		0	
	% consumido	100		76		0	
	Producción (l)	143697					
	Beneficio (USD)	40555					

Tabla 4.10: Asignación y consumos modelo económico en el Escenario 3

De este modo, el modelo económico evidencia una estrategia de asignación que prioriza el consumo en la zona más económica para maximizar el beneficio, mientras que en las zonas más costosas se restringe el consumo, recurriendo a ellas únicamente cuando es necesario para satisfacer el consumo potencial de

los animales. Asimismo, se resalta la preferencia por la zona de mayor costo debido a su mejor relación entre costo y densidad energética en comparación con la segunda zona más económica.

En el Escenario 4, caracterizado por distintas disponibilidades en las tres zonas, el modelo de maximización de la producción alcanza un total de 148863 litros de leche, con un beneficio asociado de 39285 USD. Por otro lado, el modelo de maximización de ganancias obtiene un beneficio de 42195 USD, lo que representa una diferencia de 2910 USD (un 7.41 % adicional) en comparación con el modelo productivo. Esta mejora en el beneficio viene acompañada de una reducción en la producción, que se sitúa en 146.516 litros, es decir, 2347 litros menos, equivalente a una disminución del 1.58 %.

En la [Figura 4.1](#) se compara el beneficio económico alcanzado por ambos modelos, destacando la ventaja del modelo de maximización de ganancias. A su vez, la [Figura 4.1](#) ilustra la diferencia en la producción total de leche entre los dos enfoques, evidenciando la reducción en litros del modelo de maximización de ganancias. Finalmente, la [Figura 4.2](#) muestra el consumo de alimento en cada zona para ambos modelos en relación con la disponibilidad, permitiendo analizar cómo los recursos son utilizados en cada caso.

Es importante destacar que estas diferencias solo son relevantes en escenarios donde el alimento disponible excede el consumo potencial del rodeo. En casos de alimento limitado, ambos modelos consumen la totalidad del recurso disponible, lo que conduce a una solución óptima única.

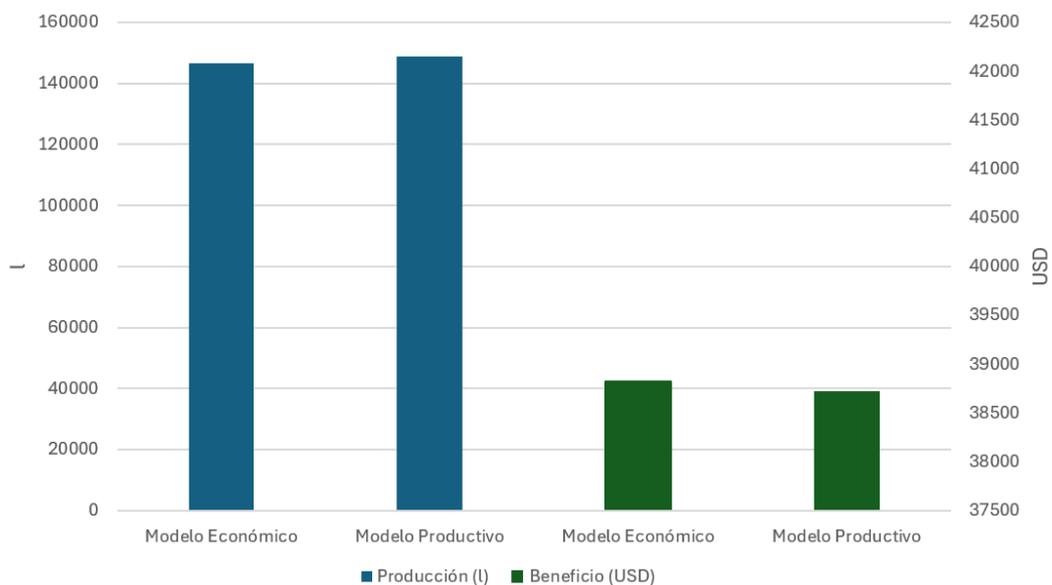


Figura 4.1: Comparación de la producción y el beneficio económico obtenido por los modelos económico y productivo para el Escenario 4

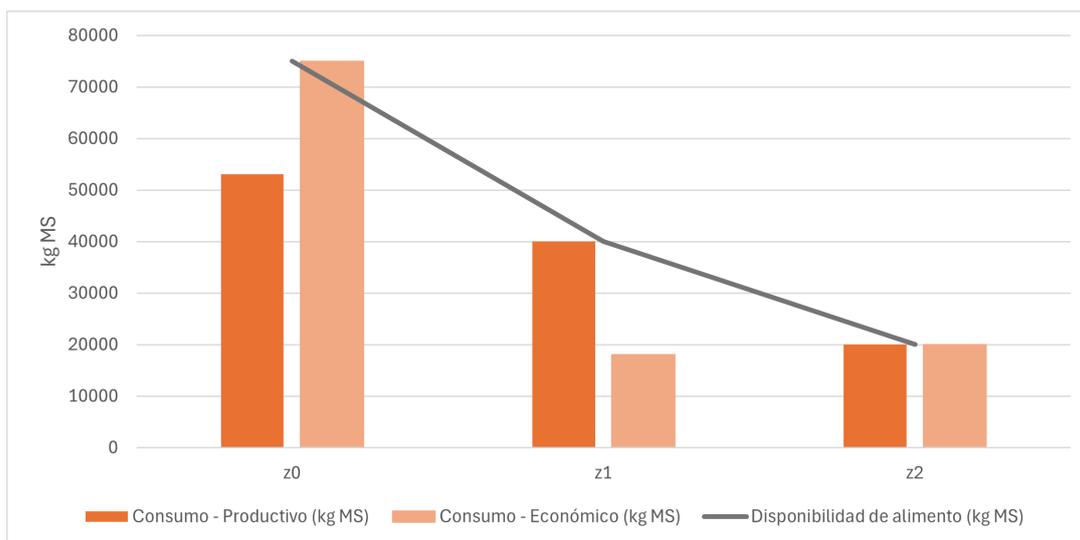


Figura 4.2: Comparación del consumo en cada zona (kg MS) de cada modelo en relación al alimento disponible (kg MS) para el Escenario 4

Los resultados obtenidos muestran que, cuando existe disponibilidad de alimentos, el modelo productivo prioriza la zona con mayor densidad energética (z2), mientras que el modelo económico opta por la zona más económica (z0). Sin embargo, cuando el consumo potencial no se cubre completamente con la zona preferida por cada modelo y existen alimentos disponibles en otras zonas, el modelo productivo se inclina hacia la segunda zona con mayor densidad energética (z1), mientras que el modelo económico prefiere la zona más cara (z2) antes que la zona intermedia (z1) para completar el consumo. Este comportamiento se debe a que la zona más cara, aunque con un costo mayor, ofrece una mayor densidad energética, lo que incrementa significativamente la producción de leche, compensando así la diferencia en los costos.

4.2.2. Caso de Estudio 2: Evaluación e implicaciones de la gestión ineficiente de los recursos alimenticios

Una gestión ineficiente de los recursos alimenticios puede generar efectos adversos en la producción lechera, comprometiendo tanto la rentabilidad como la sostenibilidad del sistema. Este análisis busca comprender cómo las deficiencias o excesos en la disponibilidad de alimento impactan la producción de leche, el beneficio económico y la condición de los animales, permitiendo identificar estrategias que minimicen el desaprovechamiento y maximicen la eficiencia del sistema.

Utilidad para el productor:

- Optimizar el uso de recursos alimenticios para reducir costos sin comprometer la producción lechera.
- Evitar gastos que no contribuyan de manera significativa al aumento de la producción.
- Equilibrar la carga animal con la disponibilidad de alimento, o viceversa.

Objetivo 1: Analizar el impacto de la reducción de alimento disponible en la producción y beneficio económico

Se busca evaluar cómo la reducción en la disponibilidad de alimento afecta la producción de leche y el beneficio económico.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

- Escenario Base

- Escenarios de escasez: se analiza una disminución progresiva en la disponibilidad de alimento de a 5 %, partiendo del consumo potencial del Escenario Base. Esto incluye escenarios con 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, y así sucesivamente.

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico

3. Variables y parámetros clave

- Parámetro variable entre escenarios:
 - Alimento[z] (kg MS)
- Variable dependiente:
 - producción (l)
- Variable controlada:
 - beneficio (USD)

Resultados y Análisis

Los resultados obtenidos permiten evaluar el impacto de la reducción en la disponibilidad de alimento sobre la producción de leche y el beneficio económico. Se observa que, a medida que la oferta de alimento disminuye, tanto la producción de leche como el beneficio económico se reducen progresivamente. En la [Figura 4.3](#), se aprecia que esta reducción no es lineal con respecto a la disponibilidad de alimento. Cuando el alimento disponible es del 100 %, la producción total supera los 140000 litros, mientras que con una disponibilidad del 50 %, la producción no alcanza los 35000 litros. Lo mismo ocurre con el beneficio: con una disponibilidad del 100 %, este supera los 40000 USD, pero al reducirse al 50 %, apenas supera los 2000 USD.

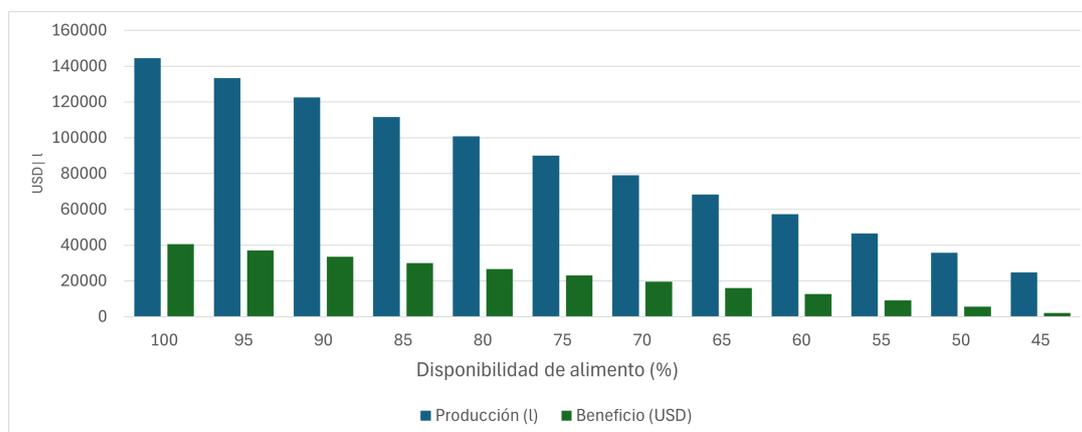


Figura 4.3: Comparación de la reducción de la producción y el beneficio en el modelo económico

En las tablas [Tabla 4.11](#) y [Tabla 4.12](#) se presentan los valores de producción y beneficio, junto con sus respectivas reducciones absoluta y relativa. Estas reducciones se definen como el porcentaje de disminución en la producción de leche o el beneficio económico en comparación con un valor de referencia:

- **Reducción absoluta:** Diferencia con respecto al valor obtenido cuando la disponibilidad de alimento en el sistema equivale al 100 % del consumo potencial total.
- **Reducción relativa:** Disminución en comparación con el valor alcanzado cuando la disponibilidad de alimento es un 5 % mayor.

La producción de leche en el Escenario Base es de 144463 litros, y el beneficio económico alcanza los 40606 USD. Al reducir la disponibilidad de alimento en un 5 %, la producción cae un 7.71 % y el beneficio disminuye un 8.83 %. A medida que la oferta de alimento sigue disminuyendo, ambas variables se ven cada vez más afectadas: con una disponibilidad del 45 %, la producción cae un 82.86 % y el beneficio, un 94.80 %.

Disponibilidad de alimento (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Producción (l)	144463	133331	122520	111657	100793	89935	79070	68209	57349	46493	35638	24761
Beneficio (USD)	40606	37019	33547	30053	26560	23069	19575	16083	12591	9100	5611	2112
Reducción absoluta Producción (%)	-	7.71	15.19	22.71	30.23	37.74	45.27	52.78	60.30	67.82	75.33	82.86
Reducción absoluta Beneficio (%)	-	8.83	17.38	25.99	34.59	43.19	51.79	60.39	68.99	77.59	86.18	94.80
Reducción Relativa Producción (%)	-	7.71	7.48	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.51	7.51	7.53
Reducción Relativa Beneficio (%)	-	8.83	8.55	8.60	8.60	8.60	8.60	8.60	8.60	8.60	8.59	8.62

Tabla 4.11: Relación entre producción, beneficio y reducciones porcentuales para el modelo económico.

Reducción relativa	Promedio
Producción	7.53 %
Beneficio	8.62 %

Tabla 4.12: Promedios de reducción relativa para la producción y el beneficio para el modelo Económico

Aunque la relación acumulada entre la disponibilidad de alimento y las variables analizadas es claramente no lineal, se observa que la reducción relativa paso a paso —es decir, el porcentaje de disminución respecto al escenario inmediatamente anterior— se mantiene aproximadamente constante: en torno al 7.5 % para la producción y al 8.6 % para el beneficio.

Este comportamiento indica que, pese a su naturaleza no lineal, el modelo responde de manera regular ante reducciones sucesivas. Además, la reducción relativa del beneficio económico es consistentemente superior a la de la producción, lo que refleja una mayor sensibilidad del sistema desde el punto de vista económico. En la [Figura 4.4](#) se puede observar cómo la disminución del alimento no solo afecta la cantidad de leche producida, sino que también impacta, y de manera más severa, la rentabilidad del sistema. Esto refuerza la importancia de mantener niveles adecuados de alimentación para preservar tanto la productividad como la rentabilidad.

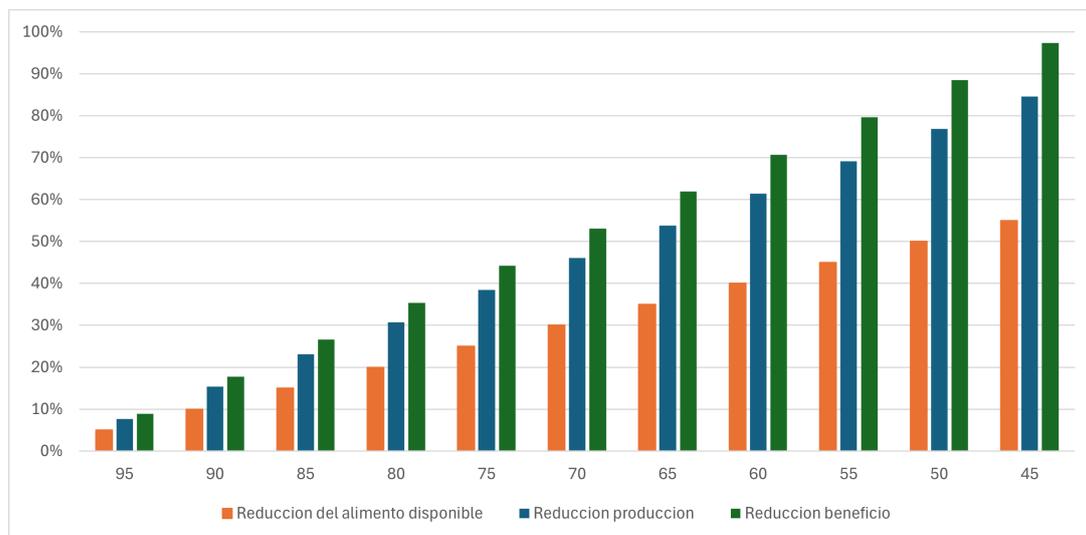


Figura 4.4: Comparación de la reducción del alimento disponible, la producción y el beneficio en el modelo económico

Objetivo 2: Analizar el impacto de la reducción de alimento disponible en la utilización de la energía

Demostrar que, en situaciones de déficit alimenticio, las vacas con menor consumo presentan un bajo rendimiento en producción lechera frente a los requerimientos básicos de mantenimiento.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

- Escenario Base
- Escenarios de escasez

2. Modelos considerados:
 - Modelo Económico
 - Modelo con Vacas Variables
3. Variables y parámetros clave del Modelo Económico
 - Parámetro variable entre escenarios:
 - Alimento[z] (kg MS)
 - Variables controladas:
 - energía basal (Mcal)
 - energía de movilidad (Mcal)
 - energía de producción (Mcal)
4. Variables y parámetros clave del Modelo con Vacas Variables
 - Parámetros variables entre escenarios:
 - Alimento[z] (kg MS)
 - Cantidad de animales
 - Variables controladas:
 - energía basal (Mcal)
 - energía de movilidad (Mcal)
 - energía de producción (Mcal)

Resultados y Análisis

Antes de analizar los resultados, es fundamental comprender la distribución de la energía en el sistema productivo. La energía destinada a la producción de leche depende del balance entre la energía ingerida y la utilizada en mantenimiento, como se detalló en la [Subsección 2.2.2](#). Un aumento en la producción solo es posible incrementando la cantidad o calidad del alimento disponible o reduciendo los gastos energéticos asociados.

Cuando la disponibilidad de alimento es limitada y el número de animales se mantiene constante, la energía destinada para la producción debe reducirse para equilibrar el sistema. Esto ocurre porque la energía basal del rodeo no varía, y las distancias a las zonas de alimentación no pueden ajustarse fácilmente.

La [Tabla 4.13](#) ilustra la distribución de la energía en función de su disponibilidad según el modelo económico para el caso en el cual el rodeo considerado no varía, considerando 50 vacas del tipo t1 y 150 del tipo t2. Se observa que la energía basal para este caso se mantiene constante en 52613 Mcal, representando el requerimiento mínimo para las funciones vitales del ganado. En contraste, la energía destinada a la movilidad disminuye a medida que se reduce la disponibilidad de alimento, lo que refleja una re asignación de los animales a distintas zonas en función de las distancias bajo condiciones de restricción alimenticia. Por otro lado, la energía utilizada para la producción de leche se ve significativamente afectada, reduciéndose drásticamente conforme disminuye la oferta de alimento. Con un 100 % de disponibilidad, la energía destinada a la producción alcanza 103562 Mcal, mientras que con solo un 50 % de alimento, cae a 25548 Mcal. Esto evidencia el impacto directo de la disponibilidad alimenticia en la productividad del sistema lechero.

Disponibilidad de alimento (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
Energía Basal (Mcal)	52613	52613	52613	52613	52613	52613	52613	52613	52613	52613	52613
Energía Movilidad (Mcal)	8352	8026	7553	7120	6686	6246	5812	5378	4940	4500	4060
Energía Producción (Mcal)	103562	95583	87832	80044	72256	64473	56684	48898	41112	33330	25548

Tabla 4.13: Distribución de energía en función de la disponibilidad de alimento según el modelo económico.

En el modelo con vacas variables, donde la cantidad de animales se ajusta según la disponibilidad de alimento, el sistema muestra una mayor capacidad de adaptación a las restricciones alimenticias. La flexibilidad en el tamaño del rodeo permite un uso más eficiente de los recursos, optimizando tanto el balance energético como el rendimiento económico. A medida que la disponibilidad de alimento disminuye,

el sistema ajusta el número de animales, lo que mejora la asignación de recursos y permite una mayor eficiencia en la producción y el mantenimiento de las vacas.

La [Tabla 4.14](#) presenta los valores correspondientes para la energía basal, de movilidad y producción en este modelo. A diferencia del modelo económico, en este caso la energía basal disminuye progresivamente a medida que se reduce la disponibilidad de alimento. Por ejemplo, con un 100 % de alimento disponible, la energía basal es de 47351 Mcal, pero a un 45 %, esta cifra cae a 21165 Mcal. Esto se debe a que el tamaño del rodeo se ajusta según la disponibilidad de alimento, lo que implica menos animales a medida que este se reduce, disminuyendo así el requerimiento energético basal total.

En cuanto a la energía para producción, aunque también disminuye con la restricción alimenticia, la caída no es tan pronunciada en comparación con el modelo económico. A un 100 % de disponibilidad de alimento, la energía para producción es de 110763 Mcal, pero con un 45 % de alimento disponible, esta cifra se reduce a 49282 Mcal. Esto demuestra cómo la producción de leche sigue siendo sensible a la disponibilidad de alimento, aunque el ajuste en el tamaño del rodeo ayuda a mitigar la caída en la producción en comparación con el modelo económico.

Disponibilidad de alimento (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Energía Basal (Mcal)	47351	44516	42188	39861	37533	35205	32841	30513	28185	25858	23530	21165
Energía Movilidad (Mcal)	7856	7435	7047	6656	6264	5873	5483	5094	4702	4311	3920	3531
Energía Producción (Mcal)	110763	104210	98762	93261	87758	82253	76747	71282	65778	60274	54772	49282

Tabla 4.14: Distribución de energía en función del porcentaje de alimento disponible según el modelo con vacas variables.

Al comparar la distribución de la energía en ambos modelos, en la [Figura 4.5](#) se observa que el modelo con vacas variables optimiza mejor el uso de la energía basal, ya que ajusta la cantidad de animales según la disponibilidad de alimento, evitando un gasto energético fijo en vacas que limitan la rentabilidad. En contraste, en el modelo económico, la energía basal se mantiene constante en todos los escenarios, lo que puede generar un uso ineficiente de los recursos cuando la disponibilidad de alimento es baja.

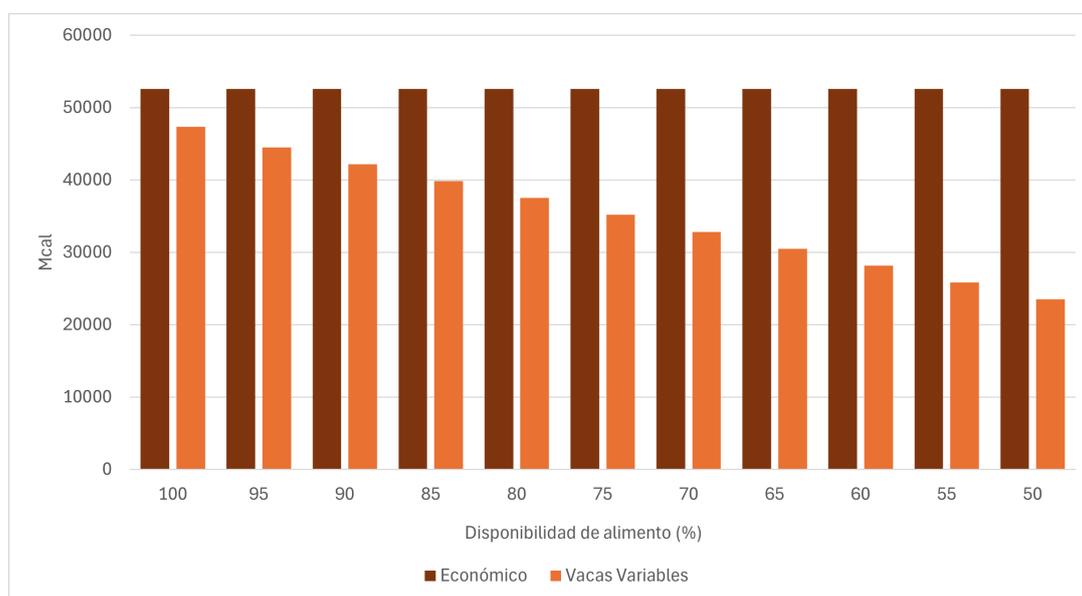


Figura 4.5: Comparación de la energía basal en el modelo económico y el modelo con vacas variables

En cuanto a la energía de movilidad, para una cantidad fija de animales, su optimización depende principalmente de la asignación según el tipo de vaca (en función del peso vivo) y las distancias a recorrer, aunque esta optimización es limitada. No obstante, en el modelo con vacas variables, la energía de movilidad total es menor, ya que al haber menos animales recorriendo las distancias, la proporción entre esta y la energía total por animal mejora.

La energía destinada a la producción de leche, como se muestra en la [Figura 4.6](#), también se comporta de manera más eficiente en el modelo con vacas variables. La flexibilidad en el tamaño del rodeo permite un mejor aprovechamiento de la energía disponible, mientras que en el modelo económico, la producción disminuye drásticamente debido a la escasez de alimento.

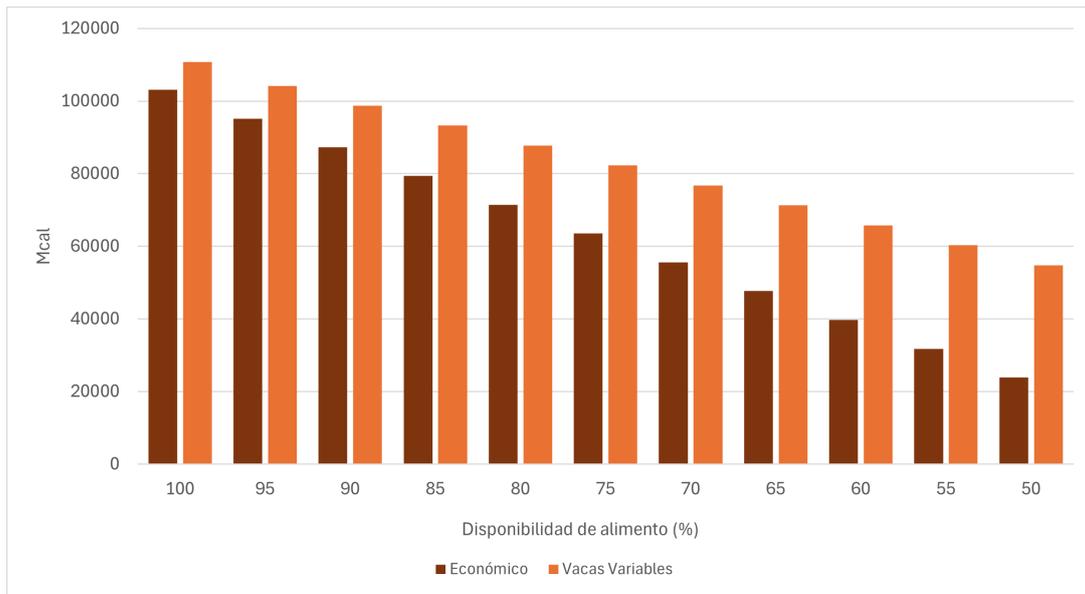


Figura 4.6: Comparación de la energía de producción en el modelo económico y el modelo con vacas variables

Por lo tanto, el modelo con vacas variables logra un mejor aprovechamiento de la energía total disponible, ya que ajusta la cantidad de vacas en función del alimento, optimizando el uso de la energía basal y de movilidad y maximizando la energía destinada a la producción. En cambio, el modelo económico, al mantener una cantidad fija de vacas, desperdicia energía basal cuando hay escasez de alimento, reduciendo significativamente la eficiencia productiva. En la [Figura 4.7](#) se muestra la comparación de la proporción del uso de la energía para cada caso de disponibilidad en el modelo económico, mientras que en la [Figura 4.8](#) se muestra la comparación de la proporción del uso de la energía en el modelo con vacas variables.

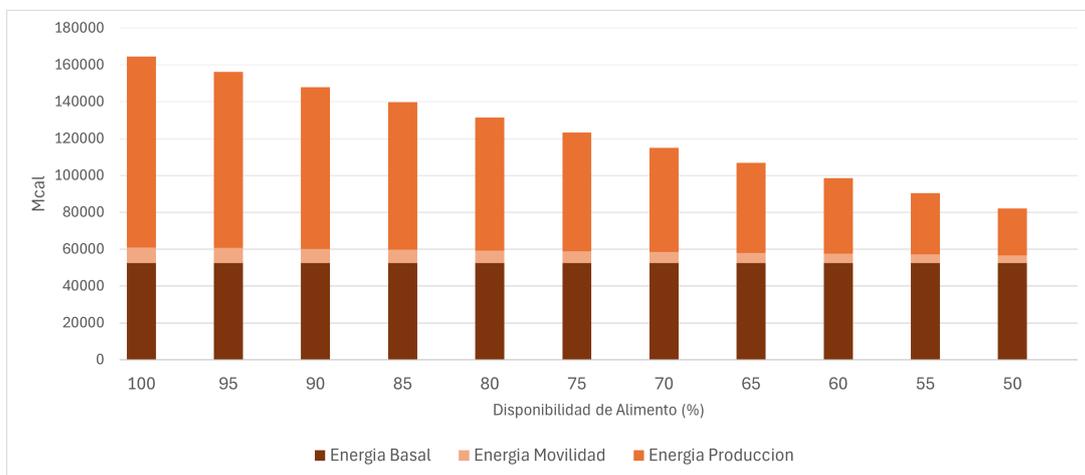


Figura 4.7: Comparación de la proporción del uso de la energía para cada caso modelo económico

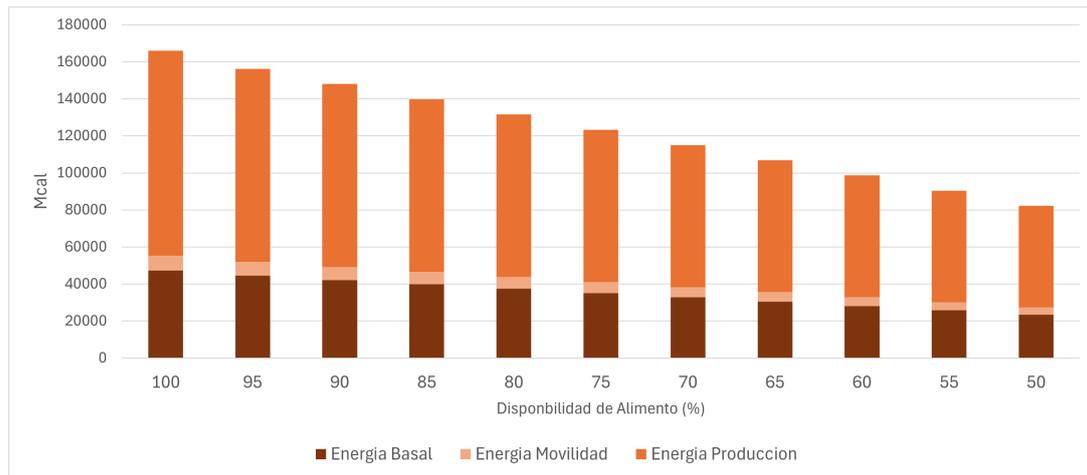


Figura 4.8: Comparación de la proporción del uso de la energía para cada caso modelo con vacas variables

Objetivo 3: Evaluar cómo varían el consumo, la producción y el beneficio económico cuando se cuenta con un excedente de alimento

Se busca demostrar que no es conveniente tener más alimento del necesario, ya que existe un límite en el consumo potencial de las vacas.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

- Escenario Base
- Escenarios de excedente: Progresivo aumento en la disponibilidad de alimento en un 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 % respecto a la disponibilidad total del Escenario Base.

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico

3. Variables y Parámetros clave

- Parámetro variable entre escenarios:
 - Alimento[z]
- Variables dependientes:
 - producción (l)
 - consTot: Consumo total de alimento (kg MS)
- Variable controlada:
 - beneficio (USD)

Resultados y Análisis

Como se mencionó en la [Subsección 2.2.2](#) las vacas tienen una capacidad máxima de ingesta, lo que implica que, incluso si se incrementa la disponibilidad de alimento en el sistema, no necesariamente se traducirá en un mayor consumo ni en un aumento en la producción de leche.

En este contexto, es relevante evaluar si un exceso de alimento tiene un impacto real en el desempeño del sistema. Si la oferta supera las necesidades del ganado sin que esto se refleje en un mayor rendimiento productivo o económico, los recursos podrían estar siendo utilizados de manera ineficiente. A continuación, se analiza cómo esta limitación en el consumo afecta la producción de leche y el beneficio económico del sistema.

La producción de leche se mantiene constante, debido a que las vacas ya han alcanzado su capacidad máxima de consumo. Aunque haya más alimento disponible, su ingesta está limitada por el parámetro

Consumo Potencial, lo que impide un aumento en la producción y porque no cambia la distancia a las zonas de alimentación, por lo que el requerimiento de traslado se mantiene constante. En la [Tabla 4.15](#) se observa que el consumo total de alimento permanece constante en todos los escenarios, ya que está restringido por la capacidad máxima de ingesta de las vacas.

Dado que en el modelo económico el beneficio depende únicamente de la cantidad de alimento efectivamente consumida y no del excedente disponible, el beneficio también permanece constante (30508 USD) sin importar la cantidad adicional de alimento. Esto demuestra que, en este caso, un aumento en la oferta de alimento más allá del consumo potencial no genera mejoras en la producción ni en la rentabilidad del sistema.

Disponibilidad de Alimento (%)	100	105	110	115	120	125
Disponibilidad de Alimento (kg MS)	113019	119700	125400	131100	136800	142500
Consumo Potencial Total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019	113019
Consumo Total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019	113019
Producción (l)	147272	147272	147272	147272	147272	147272
Beneficio (USD)	30508	30508	30508	30508	30508	30508

Tabla 4.15: Resultados del modelo económico para distintos niveles de disponibilidad de alimento

Si al modelo económico se lo modifica incorporando un parámetro adicional para considerar que, además del costo asociado a los kilogramos de alimento efectivamente consumidos, existe también un costo de oportunidad relacionado a la cantidad de alimento disponible (por ejemplo, debido a gastos de adquisición o almacenamiento), el modelo no solo reflejará el gasto en los alimentos consumidos por las vacas, sino también el costo del alimento no utilizado, lo que tendrá un impacto en el beneficio económico.

La [Figura 4.9](#) muestra cómo el beneficio económico disminuye a medida que aumenta la disponibilidad de alimento. Esto se debe a que el costo adicional generado por el exceso de alimento no consumido termina compensando el beneficio generado por la producción constante. En consecuencia, el beneficio total se ve afectado negativamente, ya que el desperdicio de alimento genera un gasto que supera las ventajas de la producción estable.

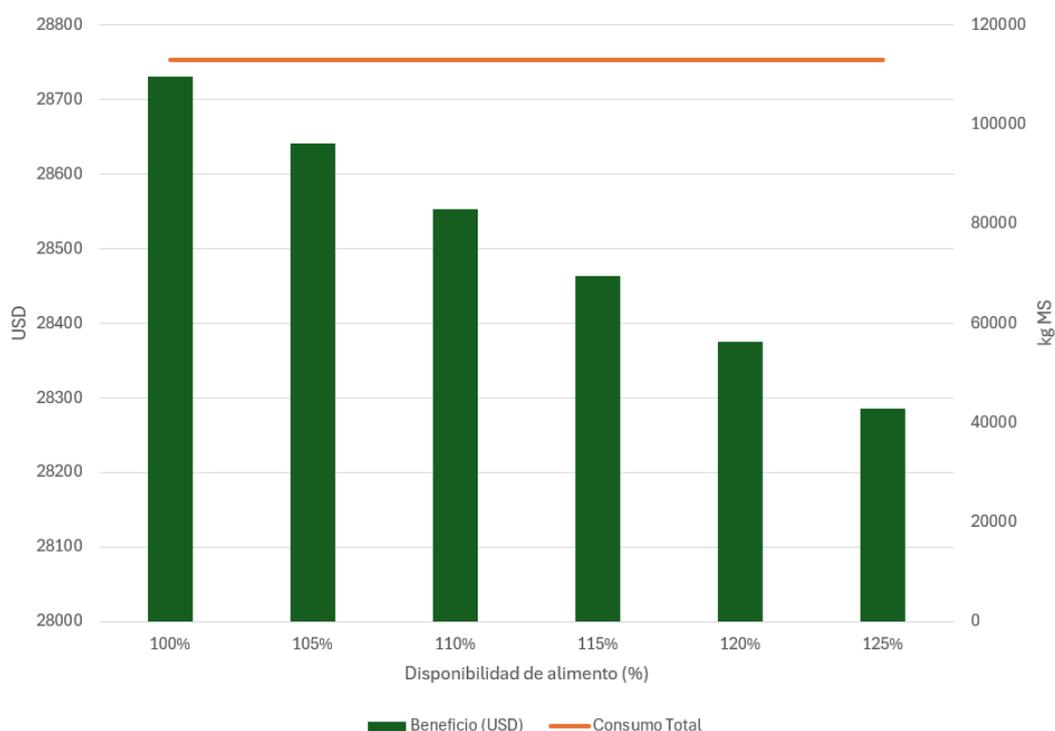


Figura 4.9: Beneficio vs. Disponibilidad de alimento

Conclusiones del Caso

El análisis realizado sobre los impactos de la reducción de la disponibilidad de alimento en la producción lechera y el beneficio económico permite concluir que una gestión eficiente de los recursos alimenticios es fundamental para optimizar ambos indicadores. La disminución progresiva en la disponibilidad de

alimento se traduce en una reducción significativa en ambos aspectos, con una mayor sensibilidad del beneficio económico frente a la reducción de los recursos, lo que resalta la importancia de mantener un suministro adecuado de alimentos para evitar pérdidas económicas considerables. Además, la evaluación de la utilización de la energía en situaciones de déficit alimenticio demuestra que una menor cantidad de alimento disponible no solo afecta la producción de leche, sino también la asignación de la energía dentro del sistema productivo. La energía destinada a la producción se ve severamente comprometida cuando los recursos alimenticios disminuyen, lo que refuerza la necesidad de asegurar una ingesta suficiente para cubrir las necesidades de mantenimiento y producción del ganado. Por otro lado, evitar el desaprovechamiento de alimentos permite reducir los costos y, por lo tanto, no afectar al beneficio económico.

En resumen, los resultados de este estudio destacan la relevancia de gestionar eficientemente los recursos alimenticios, buscando lograr un equilibrio entre la oferta de alimento y la carga animal para garantizar una producción lechera rentable y sostenible.

4.2.3. Caso de Estudio 3: Estrategias de inversión en suplementación

Como se ha analizado en los casos anteriores, la disponibilidad de alimento es un factor determinante en la eficiencia del sistema lechero, ya que influye directamente en la producción individual y, consecuentemente, en el beneficio económico. En situaciones de escasez de pastura, la suplementación surge como una estrategia clave para mitigar el impacto negativo sobre la productividad y la rentabilidad. Sin embargo, la decisión de invertir en suplementos debe ser evaluada, considerando tanto el costo de adquisición como el retorno en términos de producción adicional y mejora del estado nutricional del rodeo.

Utilidad para el productor

- Entender cuál es la mejor combinación entre las opciones de alimento según el contexto productivo para maximizar la eficiencia del sistema, garantizando que los animales reciban los nutrientes necesarios sin incurrir en costos excesivos.
- Contar con un plan de suplementación flexible para afrontar sequías u otras situaciones de escasez de alimento sin afectar gravemente la rentabilidad del sistema.
- Evaluar la inversión en cada tipo de suplemento para ajustar el presupuesto en función de los precios del mercado, asegurando que los costos de alimentación sean sostenibles en el tiempo.

Objetivo: Evaluar cómo varía la producción de leche y el beneficio económico a partir de tres estrategias distintas de inversión en suplementación

En una situación de escasez de alimento, donde la disponibilidad de pasto es fija y no puede aumentarse, analizar tres estrategias de inversión en suplementación para determinar cuál es más conveniente: distribuir la inversión en partes iguales entre forraje conservado y concentrados, invertir únicamente en forraje conservado o únicamente en concentrados, considerando cuánto y en qué conviene gastar para optimizar el sistema.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario Base.
- Escenario de escasez de alimento fijo en 80 % del Escenario Base.
- Escenarios de inversión en suplementación mediante tres estrategias distintas: Se analiza un aumento progresivo en la disponibilidad de alimento con respecto al Escenario Base, pasando de un 80 % como punto de partida, a un 85 %, luego a un 90 %, 95 % y finalmente 100 %. Este incremento se alcanzará a través de tres estrategias diferentes de suplementación:
 - Estrategia 1 - Inversión en forraje conservado.
 - Estrategia 2 - Inversión en concentrado.
 - Estrategia 3 - Inversión equitativa.

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:
 - Alimento[z]: Disponibilidad de alimento (%)
- Variables dependientes:
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)
 - producción (l)
- Variable controlada:
 - beneficio (USD)

La [Tabla 4.16](#) detalla la disponibilidad de alimento total y la distribución en las distintas zonas de cada estrategia y cada escenario para este objetivo.

	Escenario Base			80 %			85 %			90 %			95 %			100 %		
Alimento	113019			90417			96067			101718			107369			113019		
Zonas	z0	z1	z2	z0	z1	z2	z0	z1	z2	z0	z1	z2	z0	z1	z2	z0	z1	z2
Estrategia 1	67811	33906	11302	54249	27125	9042	54249	32776	9042	54249	38427	9042	54249	44078	9042	54249	50709	9042
Estrategia 2	67811	33906	11302	54249	27125	9042	54249	27125	14693	54249	27125	20344	54249	27125	25995	54249	27125	32626
Estrategia 3	67811	33906	11302	54249	27125	9042	54249	20909	20909	54249	23735	23735	54249	26560	26560	54249	29876	29876

Tabla 4.16: Disponibilidad de alimento (kg MS) por zona de alimentación para cada escenario y estrategia estudiada

Resultados y Análisis

Las tablas [Tabla 4.17](#), [Tabla 4.18](#) y [Tabla 4.19](#) presentan los resultados obtenidos para las tres estrategias de inversión. La [Tabla 4.17](#) muestra los resultados de invertir únicamente en forraje conservado, la [Tabla 4.18](#) refleja la estrategia de invertir exclusivamente en concentrados y la [Tabla 4.19](#) corresponde a la estrategia de inversión equitativa entre forraje conservado y concentrados. Si bien en este caso se utiliza el Modelo Económico, la producción resultante se presenta como aquella que maximiza el beneficio, aunque esta no necesariamente coincide con la producción óptima.

	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
Alimento Disponible (kg MS)	90417	96067	101718	107369	113019
Consumo potencial total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019
Consumo total (kg MS)	90417	96067	101718	107369	113019
Producción (l)	100793	111823	122844	133847	144875
Beneficio (USD)	26560	29558	32553	35540	38529

Tabla 4.17: Resultados de inversión en forraje conservado

	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
Alimento Disponible (kg MS)	90417	96067	101718	107369	113019
Consumo potencial total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019
Consumo total (kg MS)	90416	96067	101718	107369	113019
Producción (l)	100793	113794	126806	139730	153169
Beneficio (USD)	26560	30020	33483	36923	40488

Tabla 4.18: Resultados de inversión en concentrado

	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
Alimento Disponible (kg MS)	90417	96067	101718	107369	113019
Consumo potencial total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019
Consumo total (kg MS)	90416	96067	101718	107369	113016
Producción (l)	100793	112802	124831	136844	149018
Beneficio (USD)	26560	29786	33020	36249	39512

Tabla 4.19: Resultados de inversión equitativa

La reducción en la disponibilidad de alimento genera un déficit que limita el consumo de los animales. Como resultado, se ve afectada negativamente tanto la producción como el beneficio económico, tal como se demostró en la [Subsección 4.2.2](#).

A medida que aumenta la inversión en suplementos, la disponibilidad de alimento mejora progresivamente, permitiendo un incremento gradual en el consumo total. En este contexto, los animales aprovechan al máximo el alimento disponible en cada nivel de inversión, acercándose cada vez más al consumo potencial total.

En la [Figura 4.10](#) se observa una tendencia creciente en el beneficio económico conforme aumenta la inversión, independientemente de la estrategia utilizada. No obstante, los resultados del modelo muestran que, para los costos y densidades energéticas considerados, la inversión en concentrados y la estrategia equitativa (mitad forraje conservado, mitad concentrados) generan mayores beneficios que la inversión exclusiva en forraje conservado.

Es importante destacar que estos resultados están condicionados por los parámetros económicos y nutricionales definidos en este modelo. En particular, la rentabilidad relativa de cada estrategia depende fuertemente del costo por unidad de energía y la eficiencia productiva asociada a cada tipo de suplemento.

En el nivel más alto de disponibilidad de alimento (100%), la inversión en concentrados ofrece el mayor beneficio económico, seguida de cerca por la estrategia equitativa, mientras que el forraje conservado se mantiene como la opción menos rentable. Como se evidenció en la [Subsección 4.2.1](#).

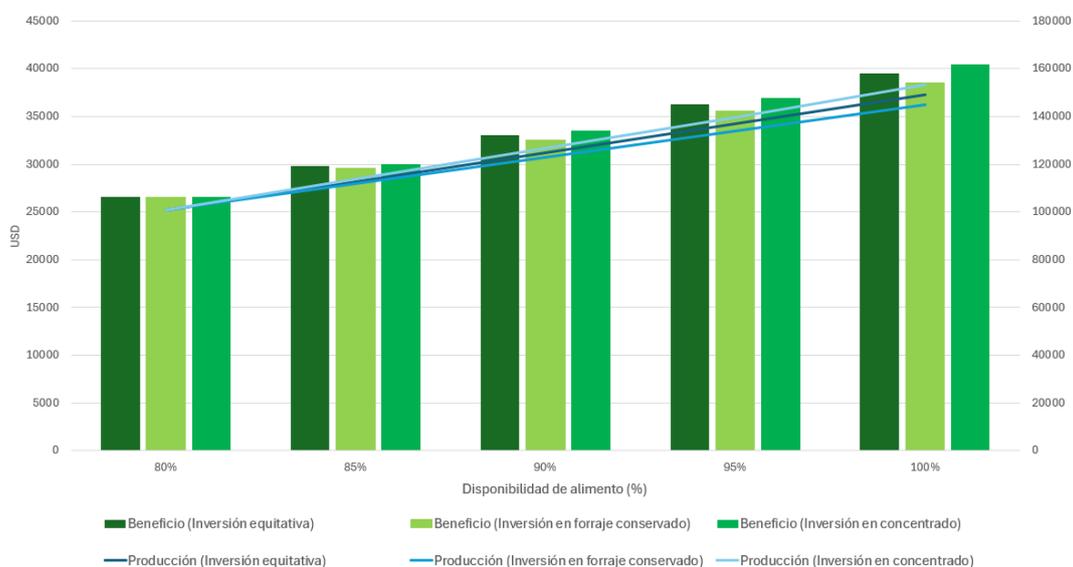


Figura 4.10: Beneficio económico según cada estrategia de inversión en suplementos

Conclusiones del Caso

Se observó que, en condiciones de escasez (80% de disponibilidad de alimento respecto al Escenario Base), todas las estrategias de inversión resultaron en un aumento progresivo tanto en la producción de leche como en el beneficio económico, conforme se incrementó la disponibilidad de alimento. Esto sugiere que una mayor inversión en suplementos mejora la eficiencia del sistema al acercarse más al consumo potencial total de los animales.

Comparando las tres estrategias, los resultados mostraron que la estrategia de inversión en concentrados genera mayores beneficios económicos que las otras, lo que sugiere que este tipo de alimentos, por su alta densidad energética, puede ser una opción más eficiente para maximizar el rendimiento económico del sistema lechero. Por otro lado, la estrategia de inversión en forraje conservado, aunque útil para mejorar el consumo de alimento en niveles intermedios de disponibilidad, resultó ser la menos rentable cuando se alcanzaron altos niveles de suplementación. Esto podría estar relacionado con el alto costo asociado al forraje conservado, que resulta menos eficiente en términos de la energía proporcionada por cada unidad de alimento en comparación con otras opciones.

4.2.4. Caso de Estudio 4: Estrategias de reducción del tamaño y configuración del rodeo

Como se observó en la [Subsección 4.2.2](#), el tamaño del rodeo es un factor crucial para optimizar la eficiencia del sistema. Un rodeo excesivamente grande en condiciones de escasez de alimento no solo incrementa costos innecesarios, sino que también reduce el potencial productivo individual y puede provocar problemas de malnutrición que afectan la salud animal. Por otro lado, aprovechar la diversidad de características entre los tipos de vacas permite diseñar configuraciones que maximicen los beneficios, adaptándose mejor a las distintas condiciones del sistema.

Utilidad para el productor:

- Determinar el tamaño adecuado del rodeo para cada situación de disponibilidad de alimento.
- Evitar la sobrecarga animal en escenarios de escasez.
- Tomar decisiones fundamentadas sobre la gestión del rodeo, teniendo en cuenta las características y necesidades específicas de cada tipo de vaca.

Objetivo 1: Evaluar cómo varía la producción de leche y el beneficio económico según el tamaño del rodeo y la configuración del mismo

Se busca analizar cómo influye el tamaño y la configuración del rodeo sobre la producción de leche y el beneficio económico, para una situación de escasez de alimento respecto al Escenario Base.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

Para una disponibilidad de alimento fija, equivalente al 80% del consumo potencial total de la configuración base, se estudiaron tres estrategias de reducción del rodeo, explorando diferentes maneras de ajustar el tamaño del mismo. En cada caso, se evaluaron los tamaños de rodeo de 200, 190, 180, 170, 160 y 150 vacas en total. Cada estrategia considera ajustes específicos en las cantidades de los dos tipos de vacas presentes en el sistema, como se observa en la [Tabla 4.20](#).

- Estrategia 1 - Reducción equitativa: Se realizó una disminución uniforme, reduciendo simultáneamente 5 vacas del tipo 1 y 5 vacas del tipo 2 en cada iteración.
- Estrategia 2 - Reducción exclusiva del tipo 1: Se redujeron únicamente vacas del tipo 1, disminuyendo su cantidad en intervalos de 10 vacas por iteración, manteniendo constante la cantidad de vacas del tipo 2.
- Estrategia 3 - Reducción exclusiva del tipo 2: Se redujeron únicamente vacas del tipo 2, disminuyendo su cantidad en intervalos de 10 vacas por iteración, manteniendo constante la cantidad de vacas del tipo 1.

2. Modelos considerados

- Modelo Económico

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:
 - cantAnimales[t]
- Variables dependientes:
 - producción (l)
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)
- Variable controlada:
 - beneficio (USD)

Total de vacas	200	190	180	170	160	150
Estrategia 1	50/150	45/145	40/140	35/135	30/130	25/125
Estrategia 2	50/150	40/150	30/150	20/150	10/150	0/150
Estrategia 3	50/150	50/140	50/130	50/120	50/110	50/100

Tabla 4.20: Configuración del rodeo para cada estrategia estudiada (T1/T2)

Resultados y Análisis

Existen dos indicadores clave para analizar el comportamiento de los resultados en cada caso: el consumo potencial total y el consumo total. El primero depende tanto de la cantidad total de vacas como de la distribución de vacas de cada tipo dentro del rodeo, es decir, la configuración del rodeo. Mientras que el segundo indicador está limitado por el consumo potencial total y también por la cantidad de alimento disponible.

Para este análisis, la disponibilidad total de alimento está fija en una situación de escasez, mientras que el tamaño del rodeo y su configuración de tipos de vacas se modifican de una prueba a otra.

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas [Tabla 5.96](#), [Tabla 5.97](#), [Tabla 5.98](#) del [Capítulo 13](#), correspondientes a cada una de las tres estrategias de reducción del rodeo analizadas. En estas tablas se detallan, para cada tamaño y configuración de rodeo, el consumo potencial total y el consumo total por tipo de vaca, así como la producción de leche y el beneficio económico total de la configuración. Estos resultados reflejan cómo cambian las variables principales según las distintas estrategias de manejo del rodeo.

Al inicio del estudio del caso, con la configuración base del rodeo, el consumo total se encuentra limitado principalmente por la cantidad de alimento disponible en el sistema. A medida que disminuye el tamaño del rodeo, el consumo potencial total también se reduce progresivamente, aunque en magnitudes diferentes según los tres tipos de reducciones analizadas. En cierto momento, se alcanza un punto de corte en el cual el alimento disponible deja de ser el factor limitante y pasa a ser el consumo potencial total el que define la cantidad máxima de alimento que el sistema puede aprovechar.

En la [Figura 4.11](#) se observa cómo la brecha entre el consumo potencial total y el consumo total se va haciendo cada vez más pequeña hasta que ambas variables convergen en un mismo valor. En el punto de corte antes mencionado, el sistema comienza a estar en una situación de excedente de alimento disponible, marcando un cambio en la dinámica del grado de utilización de los recursos.

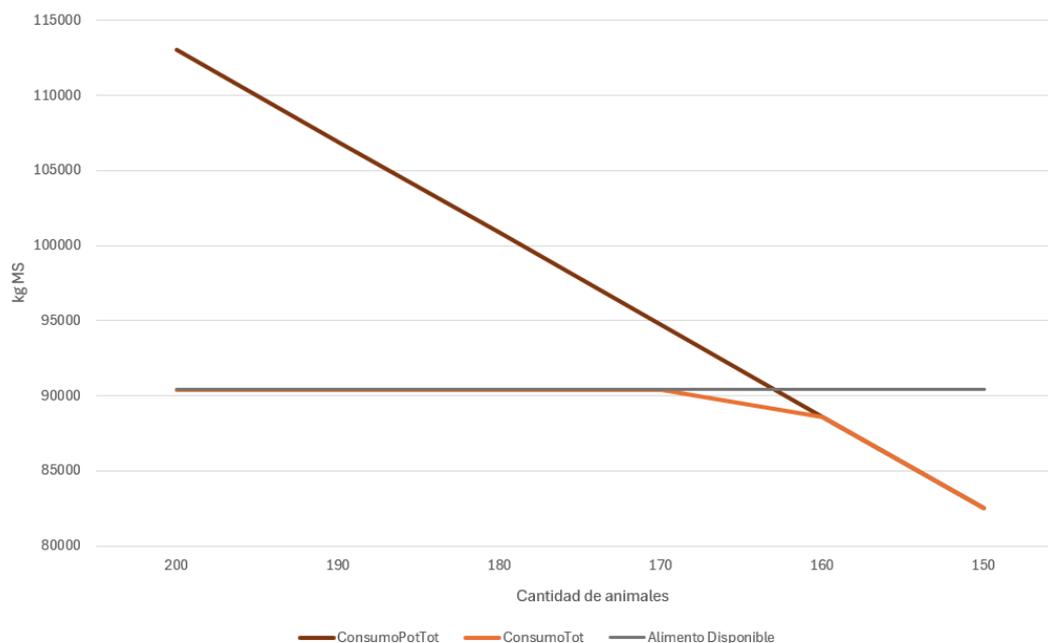


Figura 4.11: Convergencia de Consumo Total con Consumo Potencial Total

Dado que la situación es similar en las tres estrategias de reducción, aunque con diferencias en los valores de consumo potencial total y, por lo tanto, en el consumo real según el tamaño del rodeo, la [Figura 4.11](#) se presenta utilizando únicamente los valores de la Estrategia 1 - Reducción equitativa.

Para los distintos tamaños y configuraciones de rodeo se analizaron los porcentajes de utilización tanto del consumo potencial como del alimento disponible. El porcentaje de utilización del consumo potencial se calcula dividiendo el consumo total entre el consumo potencial del rodeo, indicando qué proporción del alimento que los animales podrían consumir realmente se les está proporcionando. Esto impacta directamente en la producción, que depende del consumo real de alimento. Por su parte, el porcentaje de utilización del alimento disponible se obtiene dividiendo el consumo total entre la disponibilidad de alimento, permitiendo evaluar qué porcentaje del alimento ofrecido es efectivamente consumido y cuánto queda sin aprovechar.

Cuando se está a la izquierda del punto de corte en la gráfica de la [Figura 4.11](#), es decir, cuando el alimento disponible no alcanza para cubrir todo el consumo potencial, el porcentaje de utilización del consumo potencial es el factor que impacta directamente en el beneficio. En cambio, cuando se está del lado derecho, donde el consumo potencial total y el consumo real son iguales, significa que hay un excedente de alimento no aprovechado. En este caso, el porcentaje de utilización del alimento disponible es el que influye en el beneficio del sistema.

A partir de este análisis, se definió un indicador “*Mínima Utilización*”, calculado como el mínimo entre ambos porcentajes de utilización. Este enfoque permitió identificar que el beneficio económico está estrechamente ligado al grado de explotación de los recursos del sistema, en particular, los recursos alimenticios y la producción total de los animales.

En las tablas [Tabla 4.21](#), [Tabla 4.22](#) y [Tabla 4.23](#) se presentan los cálculos realizados para las tres estrategias estudiadas.

Cantidad total de vacas	200	190	180	170	160	150
Configuración del Rodeo: (T1/T2)	50/150	45/145	40/140	35/135	30/130	25/125
ConsumoPotTotal (kg MS)	113019	106914	100808	94702.5	88597	82491
ConsumoTotal (kg MS)	90416	90416	90416	90416	88597	82491
Alimento disponible (kg MS)	90427	90427	90427	90427	90427	90427
% Utilización Consumo Potencial Total	80.00	84.57	89.69	95.47	100	100
% Utilización alimento disponible	99.99	99.99	99.99	99.99	97.98	91.22
Beneficio (USD)	26559	28066	29574	31080	31624	29891
Mínima Utilización (%)	80.00	84.57	89.69	95.47	97.98	91.22

Tabla 4.21: Resultados con la Estrategia 1 - Reducción Equitativa

Cantidad total de vacas	200	190	180	170	160	150
Configuración del Rodeo: (T1/T2)	50/150	40/150	30/150	20/150	10/150	0/150
ConsumoPotTotal (kg MS)	113019	106004	98989	91975	84960	77945
ConsumoTotal (kg MS)	90416	90416	90416	90416	84959	77944
Alimento disponible (kg MS)	90427	90427	90427	90427	90427	90427
% Utilización Consumo Potencial Total	80.00	85.29	91.34	98.31	100	100
% Utilización alimento disponible	99.99	99.99	99.99	99.99	93.95	86.20
Beneficio (USD)	26560	28148	29740	31329	30031	27914
Mínima Utilización (%)	80.00	85.29	91.34	98.31	93.95	86.20

Tabla 4.22: Resultados con la Estrategia 2 - Reducción tipo 1

Cantidad total de vacas	200	190	180	170	160	150
Configuración del Rodeo: (T1/T2)	50/150	50/140	50/130	50/120	50/110	50/100
ConsumoPotTotal (kg MS)	113019	107823	102627	97431	92234	87038
ConsumoTotal (kg MS)	90416	90416	90416	90416	90416	87038
Alimento disponible (kg MS)	90427	90427	90427	90427	90427	90427
% Utilización Consumo Potencial Total	80.00	83.86	88.10	92.80	98.30	100
% Utilización alimento disponible	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	96.25
Beneficio (USD)	26560	27981	29401	30823	32250	31881
Mínima Utilización (%)	80.00	83.86	88.10	92.80	98.30	96.25

Tabla 4.23: Resultados con la Estrategia 3 - Reducción tipo 2

Cuando la reducción del tamaño del rodeo no es significativa y el consumo total sigue por debajo del consumo potencial, las diferencias en el beneficio económico entre configuraciones no son tan evidentes. No obstante, es más eficiente priorizar la reducción de vacas de mayor tamaño, ya que su demanda de alimento es mayor. En cambio, cuando la reducción del rodeo es más significativa y permite que el consumo potencial total se iguale con el consumo real limitado por la disponibilidad de alimento, la configuración más eficiente es aquella que mantiene la cantidad de vacas de tipo 1, que presentan una mayor producción de leche, reduciendo en su lugar el número de vacas de tipo 2. Además, como se puede observar en la [Figura 4.12](#), el beneficio económico y el indicador “Mínima Utilización” siguen una tendencia similar: cuando uno aumenta, el otro también lo hace. El punto de mayor beneficio económico se alcanza cuando la mínima utilización es máxima entre todas las estrategias listadas en el eje de abscisas del gráfico. Esto resalta la relación entre el beneficio económico y el grado de aprovechamiento de los recursos. Es decir, cuando se logra maximizar la utilización tanto del consumo potencial como de la disponibilidad de alimento, el beneficio económico es el más alto.

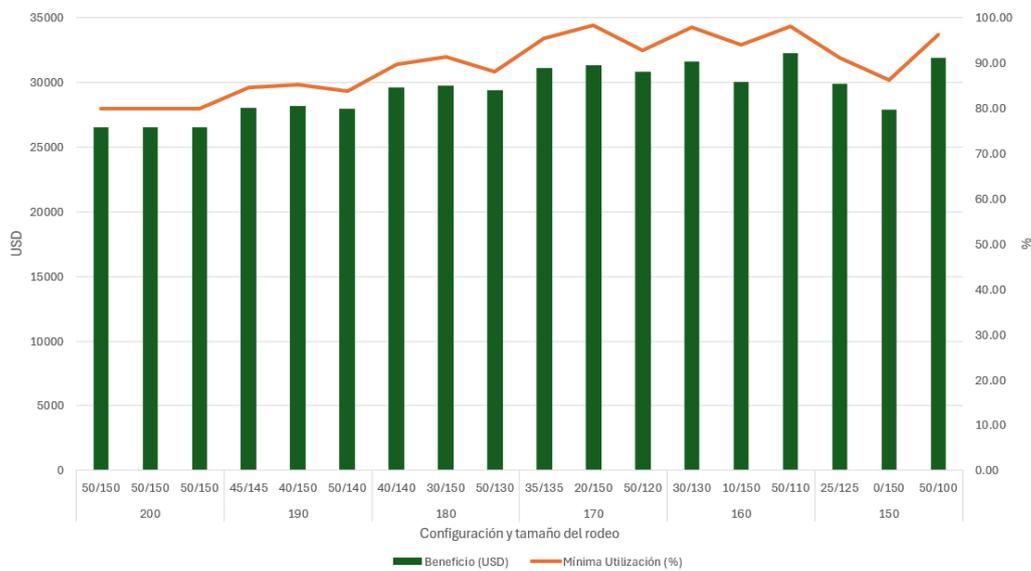


Figura 4.12: Comparación del beneficio económico obtenido para cada tamaño y configuración del rodeo contra el grado de Utilización de los recursos

Objetivo 2: Identificar el tamaño y configuración óptima del rodeo

Determinar el número óptimo de vacas mediante el modelo con vacas variables, así como la configuración de ambos tipos que maximiza el beneficio en función de la disponibilidad de alimento.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

- Escenario Base
- Escenarios de escasez

2. Modelos considerados

- Modelo con Vacas Variables

3. Variables y parámetros clave para Modelo Económico con Vacas Variables

- Parámetro variable entre escenarios:
 - Alimento[z] (kg MS)
- Variables dependientes:
 - producción (l)
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)

- Variable controlada:
 - beneficio (USD)

Resultados y Análisis

En la gestión de los sistemas lecheros, la determinación de la cantidad óptima de vacas en el rodeo es un factor clave que influye directamente en la rentabilidad y sostenibilidad de la producción. La composición del rodeo, en términos de cantidad y tipo de animales, afecta la eficiencia en el uso de los recursos, la producción de leche y los costos asociados a la alimentación y el manejo.

El modelo con cantidad de vacas como variable ofrece una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, permitiendo analizar distintos escenarios y definir la combinación óptima de animales dentro del sistema. A diferencia de los otros modelos donde el tamaño del rodeo se considera un parámetro fijo, este modelo incorpora flexibilidad, posibilitando evaluar cuántas vacas de cada tipo resultan más convenientes según la disponibilidad de alimento, los costos de producción y el impacto en el beneficio económico.

Los resultados obtenidos permiten evaluar el impacto de la reducción en la disponibilidad de alimento sobre la producción de leche y el beneficio económico utilizando el modelo con vacas variables. Se observa que, a medida que la oferta de alimento disminuye, la producción de leche y el beneficio económico presentan una reducción progresiva. En la [Figura 4.13](#) se observa cómo la producción de leche y el beneficio decrecen a medida que se reduce la disponibilidad de alimento. El modelo reduce progresivamente la cantidad óptima de vacas en el sistema, priorizando la permanencia de vacas del tipo T1 sobre las de tipo T2. En el Escenario Base, la cantidad óptima de vacas es de 161 del tipo T1 y 2 del tipo T2, alcanzando una producción de 154507 litros de leche y un beneficio de 44403 USD. A medida que la disponibilidad de alimento disminuye en un 5 %, la cantidad de vacas se reduce a 153 (solo T1), lo que provoca una reducción en la producción de leche a 145367 litros y un beneficio de 41863 USD.

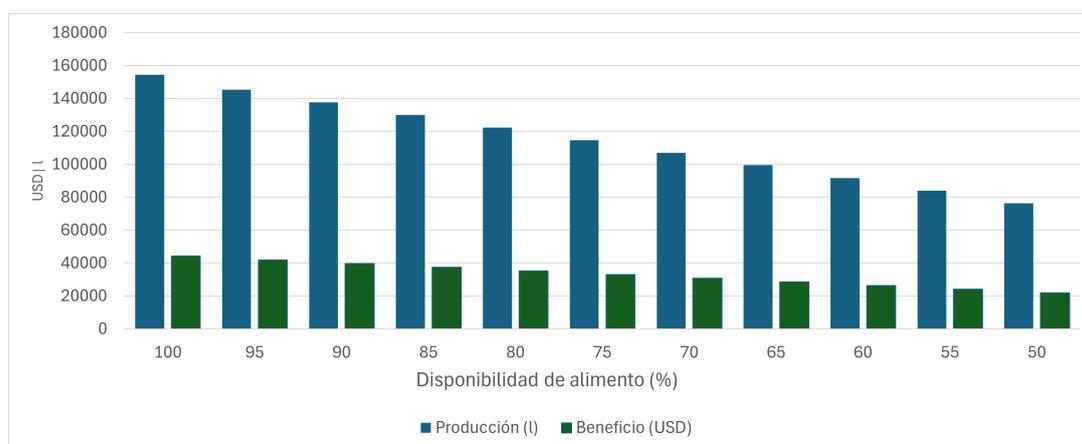


Figura 4.13: Comparación de la reducción de la producción y el beneficio en el modelo con vacas variables

Esta tendencia continúa con la reducción progresiva del alimento disponible. Para un 80 % de disponibilidad de alimento, el rodeo óptimo se compone de 129 vacas de tipo T1, alcanzando una producción de 122416 litros de leche y un beneficio de 35246 USD. En condiciones de mayor escasez, con solo un 50 % de alimento disponible, la cantidad óptima de vacas desciende a 80 de tipo T1 y 1 de tipo T2, con una producción de 76403 litros y un beneficio de 21987 USD. En la [Tabla 5.99](#) del [Capítulo 13](#) se pueden observar los valores obtenidos para cada escenario, mientras que en la [Figura 5.1](#) del mismo [Capítulo 13](#) se puede visualizar el tamaño y configuración del rodeo según la disponibilidad de alimento.

Por otro lado, el porcentaje de reducción en la producción y el beneficio sigue un patrón similar, con valores que van desde el 5.92 % hasta el 55.51 % en producción y del 5.72 % al 55.45 % en beneficio. Además, la tasa de reducción relativa entre cada nivel de restricción se mantiene constante, con valores cercanos al 4.97 % tanto en producción como en beneficio. Esto sugiere que el modelo responde de manera estable a las restricciones, sin generar variaciones abruptas en los resultados. En la [Tabla 4.24](#) se presentan los valores obtenidos para cada nivel de disponibilidad de alimento, mientras que en la [Tabla 4.25](#) se resumen los promedios de reducción relativa tanto de la producción como del beneficio económico.

Disponibilidad de alimento%	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Producción (l)	154507	145367	137767	130093	122416	114737	107057	99434	91756	84078.12	76403	68745
Beneficio (USD)	44403	41864	39672	37459	35246	33032	30824	28626	26412	24198	21986	19784
Reducción absoluta producción (%)	-	5.92	10.83	15.80	20.77	25.74	30.71	35.64	40.61	45.58	50.55	55.51
Reducción absoluta beneficio (%)	-	5.72	10.66	15.64	20.62	25.61	30.58	35.53	40.52	45.50	50.49	55.45
Reducción Relativa Producción (%)	-	5.92	4.92	4.97	4.97	4.97	4.97	4.93	4.97	4.97	4.97	4.96
Reducción Relativa Beneficio (%)	-	5.72	4.94	4.98	4.98	4.99	4.97	4.95	4.99	4.98	4.99	4.96

Tabla 4.24: Relación entre producción, beneficio y reducciones porcentuales para el modelo con vacas variables.

Reducción relativa	Promedio
Producción	5.05 %
Beneficio	5.04 %

Tabla 4.25: Promedios de reducción relativa para la producción y el beneficio para el modelo vacas variables

El modelo selecciona consistentemente el tipo de vaca T1, a pesar de que su consumo potencial por vaca es mayor. Esto implica que, para una determinada cantidad de alimento, habría que tener menos vacas para alcanzar dicho consumo. Sin embargo, la producción de leche por unidad de alimento consumido es superior en las vacas tipo 1, lo que resulta en un beneficio económico mayor, incluso considerando que el precio de la leche de las vacas tipo 1 es menor (0.37 USD/litro) en comparación con el de las vacas tipo 2 (0.4 USD/litro).

Si comparamos una vaca del tipo 1 con una del tipo 2 consumiendo una misma densidad energética, observamos que, aunque la vaca tipo 1 consume un 34% más alimento debido a su mayor consumo potencial, su producción de leche es un 48% mayor que la de la vaca tipo 2 cuando ambas consumen su consumo potencial. Estos resultados pueden verse en la [Tabla 4.26](#), donde se comparan ambos tipos para un día de producción en la zona 0.

Tipo	ConsPot (kg MS)	cR (kg MS)	reqbasal/2 (Mcal)	PV (kg)	Producción (l)
T1	23.38	23.38	4.849	600	30.77
T2	17.32	17.32	4.229	500	20.75

Tabla 4.26: Producción por tipo de vaca para 1 día en la zona 0

Las vacas del tipo 1 son más eficientes en el uso de la energía que las vacas del tipo 2. Aunque ambas vacas consumen su máximo potencial de alimento, las vacas del tipo 1 utilizan una menor proporción de la energía adquirida para mantenimiento y desplazamiento, dejando más energía disponible para la producción de leche. La relación del requerimiento basal respecto a la máxima energía adquirida es un 17% menor para las vacas del tipo 1 que para las del tipo 2. Por lo tanto, las vacas del tipo 1 tienen una mayor eficiencia en la conversión de alimento en producción, lo que explica su mayor rendimiento productivo.

El modelo asegura que el consumo potencial total de las vacas seleccionadas siempre se mantiene cercano al alimento disponible, garantizando que el consumo real sea prácticamente igual al consumo potencial. Esta estrategia refuerza la conclusión de que siempre es óptimo que las vacas consuman la mayor cantidad posible de su consumo potencial, ya que esto maximiza el beneficio económico.

Sin embargo, en algunos casos, el modelo asigna una vaca de tipo T2 para optimizar el uso del alimento disponible, especialmente cuando la cantidad de vacas tipo 1 seleccionadas no permite aprovecharlo en su totalidad. Esto asegura que el alimento disponible se utilice de manera eficiente.

Objetivo 3: Evaluar el impacto de la variabilidad en la disponibilidad de alimentos sobre el consumo, la producción y el beneficio económico por vaca

Estudiar cómo los cambios en la cantidad de alimento disponible afectan tanto al consumo individual de alimento como a la producción y al beneficio económico por vaca para dos enfoques distintos: cuando el número de vacas es constante y cuando es variable dentro de un modelo de maximización del beneficio económico.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario Base.
 - Escenarios de escasez de alimento
2. Modelos considerados
- Modelo Económico
 - Modelo con Vacas Variables
3. Variables y Parámetros para Modelo Económico
- Parámetro variable iteraciones:
 - Alimento [z] (kg MS)
 - Variables dependientes:
 - Consumo potencial por vaca (kg MS/v): Consumo Potencial Total entre el número de vacas total
 - Consumo por vaca (kg MS/v): Consumo Total entre el número de vacas total
 - Variables controladas:
 - producción individual (l/v)
 - beneficio individual (USD/v)
4. Variables y Parámetros para Modelo con Vacas Variables
- Parámetro variable entre iteraciones:
 - Cantidad de animales
 - Variables dependientes:
 - Consumo Potencial Individual (kg MS/v)
 - Consumo Individual (kg MS/v)
 - Variables controladas:
 - producción individual (l/v)
 - beneficio individual (USD/v)

Resultados y Análisis

Se analizaron dos enfoques distintos para los escenarios de escasez de alimento en el sistema de estudio, comparando cómo afecta la reducción de la disponibilidad de alimento al consumo individual de las vacas mediante el empleo del modelo económico y el modelo con vacas variables. Los resultados y los respectivos valores individuales calculados se encuentran en las tablas [Tabla 5.100](#) y [Tabla 5.101](#) del [Capítulo 13](#).

La [Figura 4.14](#) muestra la evolución del consumo de alimento en el escenario donde el número de vacas es fijo (200 vacas en total). En este caso, el consumo potencial total se mantiene constante, pero a medida que disminuye la disponibilidad de alimento, el modelo ajusta el consumo real por vaca, distribuyendo equitativamente los recursos disponibles. Esto provoca una reducción progresiva en el consumo individual, ya que el sistema prioriza que todas las vacas reciban al menos una parte del alimento disponible, aunque esta cantidad esté por debajo de su requerimiento óptimo.

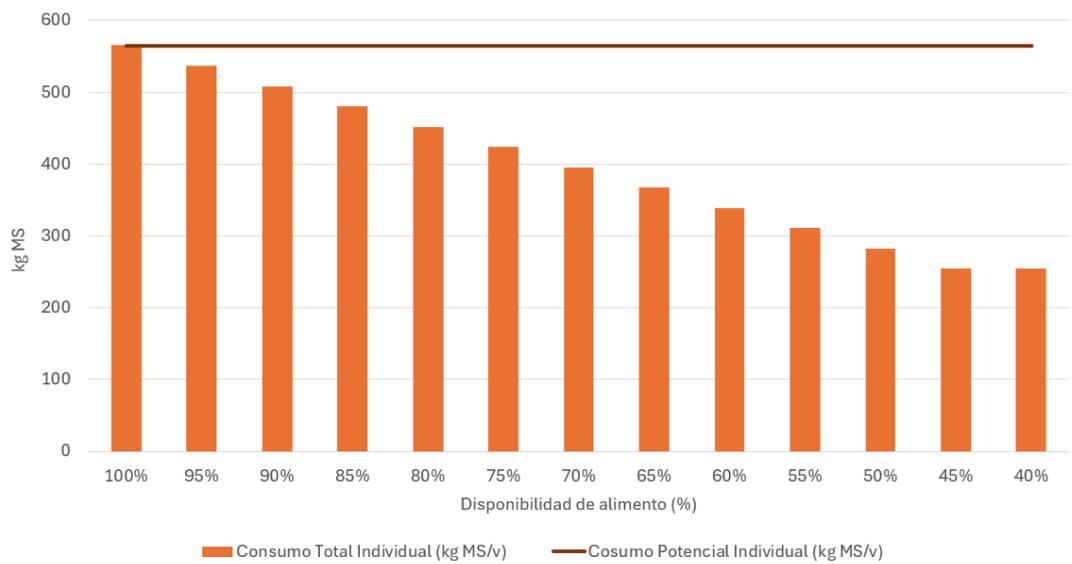


Figura 4.14: Consumo Individual vs. Consumo Potencial Individual a partir del modelo económico con Vacas Fijas

En contraste, la [Figura 4.15](#) ilustra el comportamiento del modelo cuando el número de vacas es una variable de decisión. Aquí, el modelo opta por reducir el tamaño del rodeo a medida que disminuye la oferta de alimento, de modo que todas las vacas del sistema puedan consumir una cantidad de alimento muy cercana a su consumo potencial máximo. Esta estrategia permite mantener niveles óptimos de alimentación por vaca.

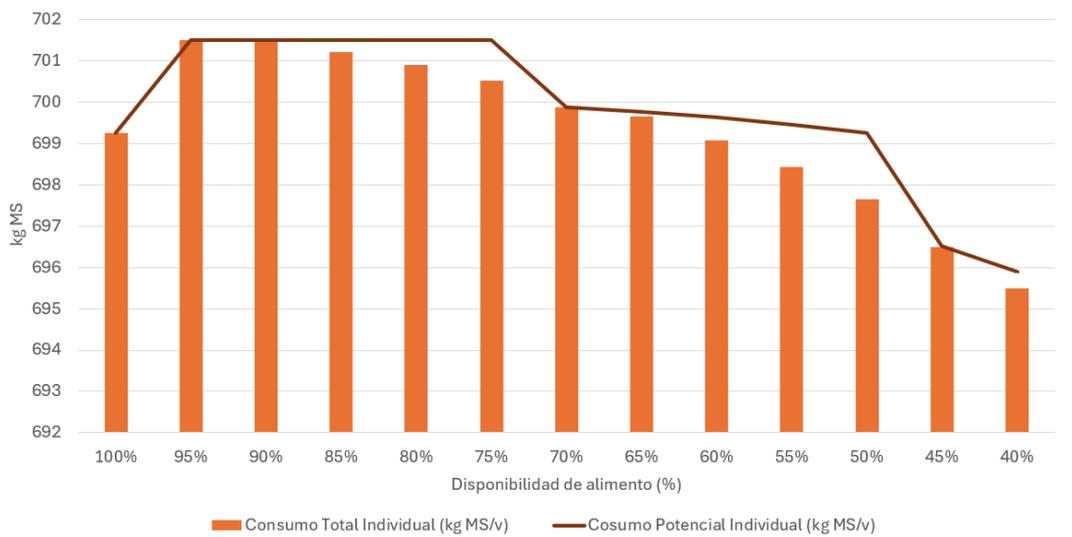


Figura 4.15: Consumo Individual vs. Consumo Potencial Individual a partir del modelo económico con vacas variables

Las diferencias en el consumo de alimento entre ambos modelos tienen una repercusión directa en la producción individual de leche. En la [Figura 4.16](#), que compara las producciones individuales obtenidas en ambos enfoques, se observa que en el modelo con número de vacas fijas, la producción por vaca disminuye progresivamente conforme se reduce la disponibilidad de alimento. Esto es consecuencia directa del consumo insuficiente en relación con el consumo potencial de cada animal, lo que afecta su capacidad productiva. Por otro lado, en el modelo donde el número de vacas es una variable de decisión, la producción individual se mantiene estable. Esto se debe a que el modelo reduce la cantidad total de vacas, permitiendo que las restantes consuman una cantidad de alimento más cercana a su requerimiento óptimo. De esta manera, cada vaca mantiene una mejor eficiencia productiva en términos de litros de

leche generados por unidad de alimento consumido.

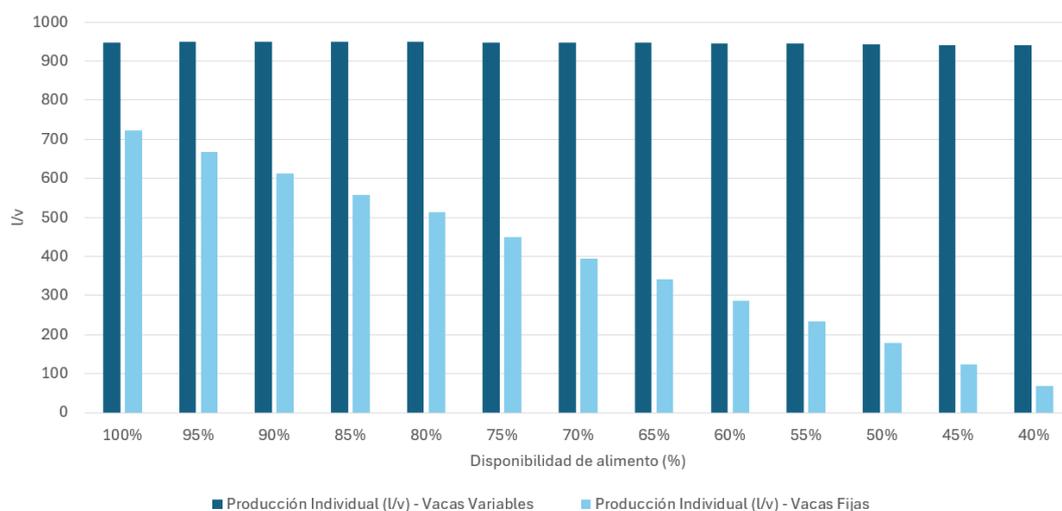


Figura 4.16: Comparación de la producción individual a partir de modelo económico con vacas variables y modelo económico con vacas fijas

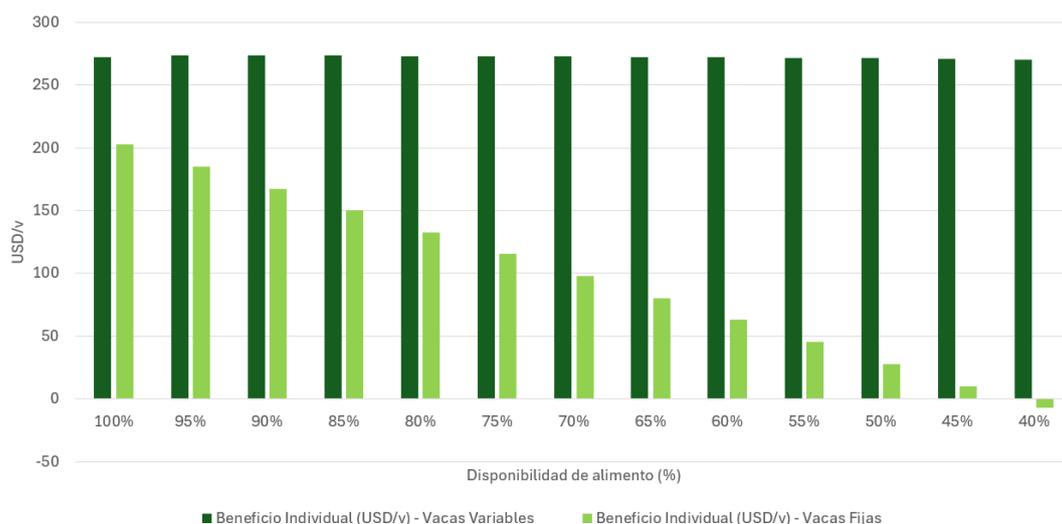


Figura 4.17: Comparación del beneficio económico individual a partir de modelo económico con vacas variables y modelo económico con vacas fijas

Al observar la [Figura 4.17](#), se puede apreciar un comportamiento similar al de la producción en relación al beneficio por vaca. Sin embargo, en el último caso con un 40%, se observa un beneficio negativo, lo que indica una disminución en la rentabilidad que podría afectar al sistema, llevando incluso a pérdidas económicas. Al ajustar la cantidad de vacas según la disponibilidad de alimento, el modelo con vacas variables logra mantener un beneficio económico constante incluso en situaciones de escasez. En contraste, el modelo con vacas fijas muestra una vulnerabilidad considerable ante la reducción de recursos, ya que la falta de flexibilidad para ajustar el número de vacas a las condiciones de alimentación conlleva una caída del beneficio, llegando incluso a pérdidas económicas en escenarios extremos.

Conclusiones del Caso

El análisis realizado subraya la importancia de gestionar de manera flexible el tamaño y la configuración del rodeo, especialmente en condiciones de escasez de alimento. Es crucial ajustar el número de vacas según la disponibilidad de recursos para asegurar que cada animal reciba la cantidad adecuada de nutrientes. Cuando los recursos son limitados, priorizar las vacas de mayor producción y complementar con

las de menor tamaño y rendimiento resulta más rentable, ya que asegura un mejor aprovechamiento del alimento disponible y optimiza el beneficio económico.

Mantener un número fijo de vacas frente a una reducción en la disponibilidad de alimento tiene un impacto negativo en el consumo individual, lo que afecta tanto la producción como la salud de los animales. Por el contrario, permitir que el modelo ajuste el número de vacas según la oferta de alimento garantiza que cada vaca reciba lo necesario, evitando una caída drástica en la producción y mejorando la eficiencia del sistema.

La flexibilidad en la gestión del número de animales es una estrategia clave para optimizar la producción lechera, especialmente cuando se enfrentan restricciones alimentarias. Reducir el número de vacas para asegurar que todas estén bien alimentadas mejora el rendimiento de las vacas mejor nutridas y genera un mayor beneficio económico en comparación con un modelo rígido.

4.2.5. Caso de Estudio 5: Comparación del beneficio económico: reducción del rodeo vs. inversión en suplementación

Como se analizó en las subsecciones [Subsección 4.2.3](#) y [Subsección 4.2.4](#), en situaciones de escasez de alimento es crucial adoptar estrategias que permitan mantener la estabilidad del sistema lechero sin comprometer la salud de los animales, minimizando al mismo tiempo el impacto negativo en el beneficio económico.

En la [Subsección 4.2.3](#), se evaluó una estrategia basada en la inversión en suplementación para compensar la falta de alimento. Para ello, se analizaron tres enfoques distintos de inversión en suplementación, con el objetivo de determinar su efectividad en la recuperación del sistema en términos económicos.

Por otro lado, en la [Subsección 4.2.4](#) se analizó una estrategia alternativa basada en el ajuste del tamaño y la configuración del rodeo según la disponibilidad limitada de alimento. Para ello, se adoptaron tres estrategias diferentes en la reducción de la cantidad de animales.

Frente a un escenario de escasez de alimento, es fundamental determinar cuál de estas estrategias resulta más conveniente. La comparación entre ambas opciones permite orientar la toma de decisiones en sistemas productivos con restricciones en la disponibilidad de recursos, proporcionando información valiosa para su gestión eficiente.

Utilidad para el productor:

- Facilitar la toma de decisiones ante situaciones críticas como lo es la escasez de alimento en el sistema.

Objetivo: Comparar los beneficios económicos obtenidos mediante reducción del rodeo e inversión en suplementos

Comparar el beneficio económico generado por dos enfoques estratégicos para determinar cuál de ellos resulta más rentable y adecuado en términos de sostenibilidad económica y eficiencia productiva en condiciones de restricción alimentaria, teniendo en cuenta que esta comparación se basa en los resultados obtenidos en los casos 3 y 4, y el diseño experimental utilizado es el de dichos casos.

Resultados y análisis de la comparación

Para analizar los resultados, se compararon dos estrategias alternativas ante la escasez de alimento: invertir equitativamente en suplementación (Estrategia 3 de la [Subsección 4.2.3](#)) y reducir equitativamente el tamaño del rodeo (Estrategia 1 de la [Subsección 4.2.4](#)). En el caso de la suplementación, se optó por una distribución uniforme del alimento adicional para evitar sesgos en la asignación de recursos y evaluar su impacto de manera equilibrada entre ambas opciones de suplementación. Por otro lado, la reducción del rodeo se llevó a cabo de manera proporcional entre ambos tipos de vacas, con el objetivo de preservar la estructura del sistema productivo y minimizar efectos indirectos en el consumo.

Al comparar ambas estrategias, dado que en una varía la cantidad de alimento y en la otra la cantidad de animales, el análisis se centra en la *cantidad de alimento por vaca*. Esto permite normalizar la comparación entre ambas. Además, por simplicidad y claridad, se optó por trabajar con valores promedio.

Es importante aclarar que el 80% mencionado en relación con la disponibilidad, cuando se aplica la estrategia de variar el tamaño del rodeo, se refiere al escenario base previamente presentado. Antes de realizar la comparación del beneficio, se lleva a cabo un análisis de la cantidad de alimento disponible por vaca en cada caso. A partir de este análisis, se compara esta cantidad de alimento por vaca con el consumo potencial por vaca, lo que permite una evaluación más precisa del impacto de cada estrategia.

En la [Figura 4.18](#), se observa que, a medida que se avanza en cada iteración, partiendo de un rodeo de 200 vacas con un 80% de alimento disponible respecto al escenario base y desplazándose hacia la derecha según cada estrategia, este indicador muestra una tendencia creciente en ambos enfoques. Sin embargo, la estrategia de inversión en suplementos logra, en todos los casos, una disponibilidad de alimento por vaca ligeramente superior.

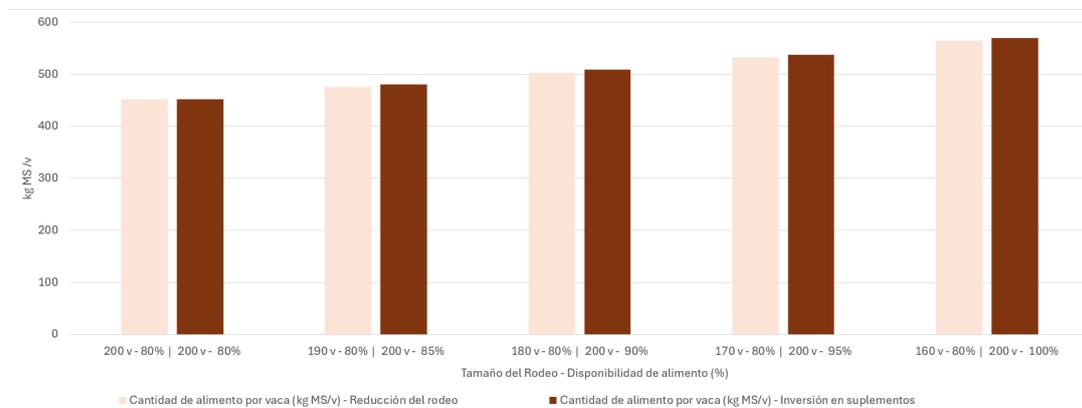


Figura 4.18: Comparación de la cantidad de alimento disponible por vaca para ambas estrategias

Al incorporar al análisis el consumo potencial por vaca, es posible comparar este valor con la cantidad de alimento disponible por animal, bajo ambas estrategias. Como se muestra en la [Figura 4.19](#), la disponibilidad de alimento por vaca sigue una tendencia creciente, acercándose progresivamente al consumo potencial. Esto refleja el objetivo subyacente de ambas estrategias: lograr un equilibrio entre la oferta de alimento y la demanda nutricional del rodeo.

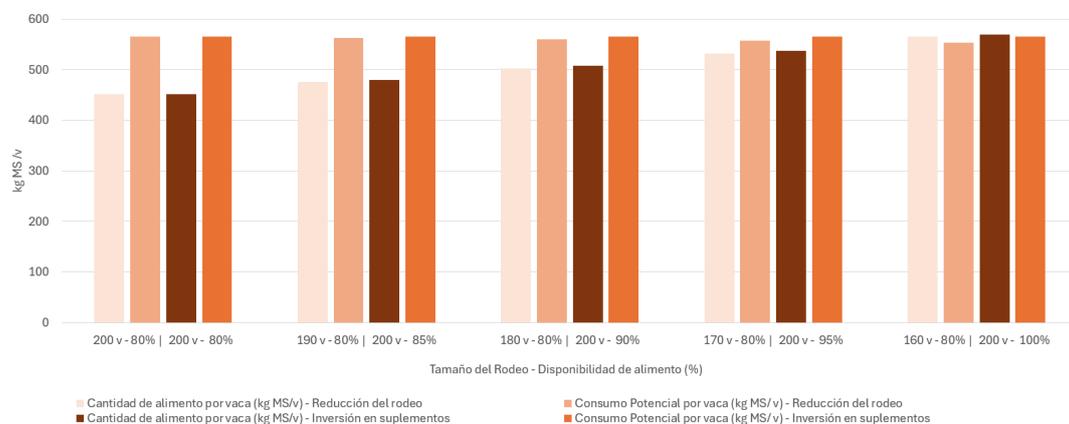


Figura 4.19: Comparación de los consumos potenciales frente a la cantidad de alimento por vaca, para ambas estrategias

La reducción progresiva de la diferencia entre la cantidad de alimento disponible por vaca y su consumo potencial se refleja directamente en la tendencia creciente del beneficio económico por animal en ambas estrategias representada en la [Figura 4.20](#). A medida que se incrementa la inversión en suplementos o se reduce el tamaño del rodeo para ajustarse a la disponibilidad limitada de alimento, las vacas acceden a una ración más cercana a su requerimiento óptimo, lo que favorece su desempeño productivo. Este ajuste en la relación oferta-demanda de alimento permite maximizar la eficiencia del sistema, asegurando un uso más rentable de los recursos disponibles y contribuyendo a un aumento en la rentabilidad individual. En la [Figura 4.20](#) puede notarse cómo a lo largo de todas las iteraciones, la estrategia de inversión en suplementos presenta un beneficio por vaca ligeramente superior al de la estrategia de reducción del rodeo. Esta diferencia sugiere que la suplementación permite mantener la productividad individual de las vacas en niveles más altos que la simple reducción del número de animales. Sin embargo, el margen entre ambas estrategias es relativamente pequeño, lo que indica que ambas opciones son viables dependiendo de las condiciones del sistema productivo.

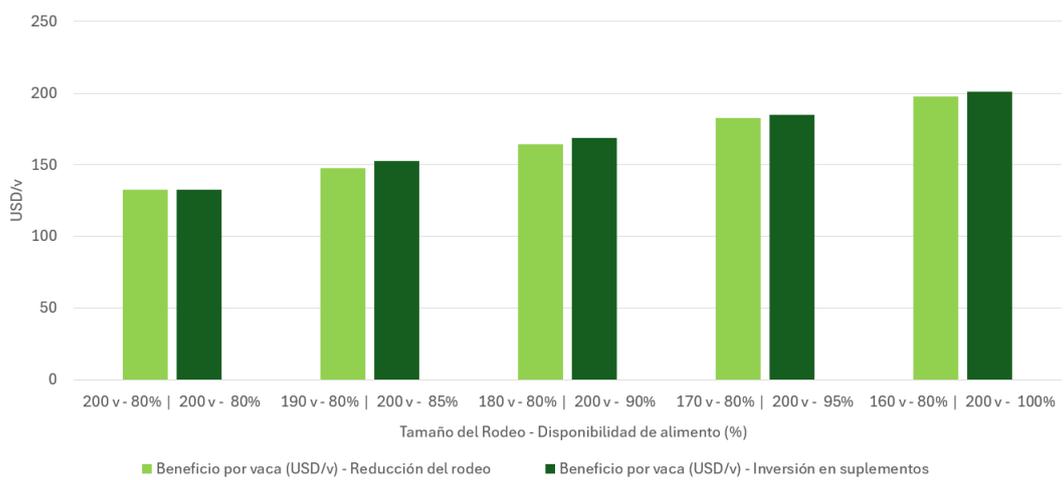


Figura 4.20: Comparación de los beneficios económicos individuales obtenidos a partir de ambas estrategias

Al analizar los valores totales, se observa que, aunque ambas estrategias muestran un beneficio individual creciente, lo que refleja una mayor eficiencia en el uso de los recursos disponibles (ya sea en términos de alimentación, manejo de las vacas o reducción de costos operativos), el beneficio total solo experimenta un aumento significativo cuando también se maneja un número adecuado de vacas. Es decir, aunque el beneficio por vaca aumente, si el número de vacas es bajo, el impacto en el beneficio total será limitado. Esto se refleja claramente en la [Figura 4.21](#), donde se puede ver que, en aquellas estrategias que combinan tanto un alto beneficio individual como un número elevado de vacas, el beneficio total se incrementa de manera considerable.

En este sentido, la estrategia de inversión en suplementos al 100% se destaca como la opción más rentable, logrando un beneficio total de 40265 USD, lo que supera de manera significativa al beneficio de la alternativa más rentable dentro de la estrategia de reducción del rodeo, que alcanza los 31624 USD, como se ilustra en la gráfica.

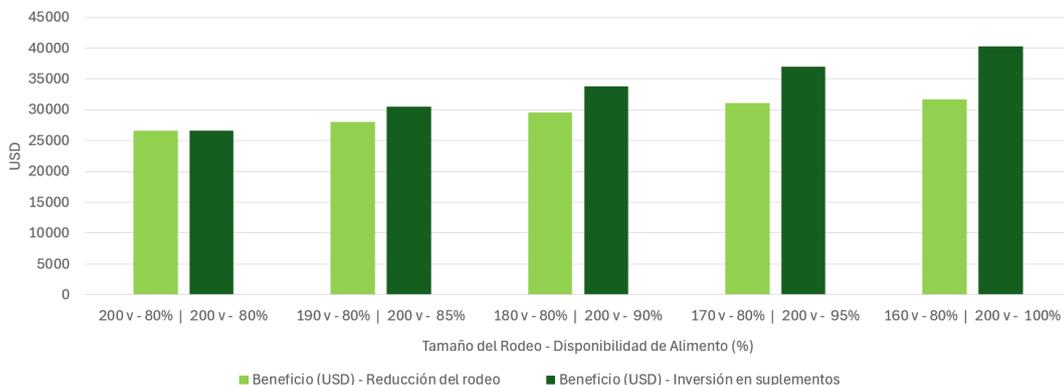


Figura 4.21: Comparación del beneficio económico total obtenido para la estrategia de reducción del tamaño del rodeo equitativa vs. inversión en suplementos equitativa

Conclusiones del Caso

Si se enfrenta una situación de escasez de alimento, como se observó en la [Subsección 4.2.2](#), mantener a las vacas mal alimentadas no es una estrategia viable, ya que afecta negativamente la producción y el beneficio económico y, lo que es aún más preocupante, compromete la salud animal. La mejor estrategia a adoptar dependerá de las condiciones específicas del sistema y del productor, así como de su capacidad para invertir en alimentación. Mantener el rodeo e invertir en suplementos permite mejorar el beneficio, pero esto requiere capital disponible. Además, manejar un mayor número de vacas implica costos adicionales en términos de logística y recursos.

En caso de no contar con los recursos para invertir, reducir la cantidad de vacas es una alternativa viable para evitar pérdidas y optimizar la rentabilidad dentro de las limitaciones del sistema. En el escenario analizado, con escasez de alimento, el beneficio total se redujo a 26560 USD, mientras que invirtiendo en suplementos para restablecer el 100% de la disponibilidad, el beneficio aumentó hasta 40265 USD. Por otro lado, reduciendo el rodeo a 160 vacas, se obtuvo un beneficio de 31624 USD. Estos resultados confirman que invertir en alimentación permite maximizar la rentabilidad, pero cuando esto no es posible, ajustar la cantidad de vacas sigue siendo una estrategia eficiente para mitigar el impacto de la escasez.

En resumen, si el capital lo permite, invertir en suplementos es la opción más rentable y eficiente para maximizar la producción y el beneficio económico. Sin embargo, en caso de restricciones financieras, reducir el número de vacas es una alternativa efectiva, aunque con un beneficio menor. La clave está en adaptarse a las condiciones económicas y de recursos del productor para elegir la estrategia más adecuada, sin comprometer la salud del sistema lechero.

4.2.6. Caso de Estudio 6: Evaluación del impacto ambiental en la producción lechera: análisis de emisiones de metano y su relación con la rentabilidad del sistema

La producción lechera genera emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el metano entérico el principal contribuyente como se vio en la [Sección 2.2.3](#).

En un contexto donde las regulaciones ambientales son cada vez más estrictas y la sostenibilidad es un factor clave en la competitividad del sector, resulta fundamental comprender la relación entre las emisiones de metano y la rentabilidad de los sistemas lecheros. Si bien una mayor producción de leche suele asociarse con un aumento en las emisiones absolutas de metano, la eficiencia alimentaria puede reducir la emisión por litro de leche producido, lo que permitiría encontrar estrategias para minimizar el impacto ambiental sin comprometer el beneficio económico.

Utilidad para el productor:

- Comprender el impacto económico de las normativas asociadas a las emisiones de metano.
- Analizar diferentes estrategias para reducir las emisiones sin comprometer el beneficio económico.

Objetivo 1: Evaluar las emisiones de metano obtenidas a partir del modelo económico con enfoque ambiental

Estudiar cómo los cambios en la cantidad de alimento disponible afectan las emisiones de metano.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario Base.
- Escenarios de escasez

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico con enfoque ambiental - **Metano**.

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable:
 - Alimento[z] (kg MS)
- Variables dependientes:
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)
- Variables controladas:
 - beneficio (USD)
 - Metano: Emisión de Metano total (kg CH₄).

Resultados y Análisis

El análisis de los datos obtenidos a partir del modelo utilizado permite evaluar cómo los cambios en la cantidad de alimento disponible impactan en las emisiones de metano en el sistema de producción lechera. A medida que la cantidad de alimento disponible disminuye, las emisiones totales de metano también disminuyen de manera proporcional. Cuando la disponibilidad de alimento es del 100 %, las emisiones de metano alcanzan 804.04 kg, pero conforme la disponibilidad de alimento se reduce al 45 %, las emisiones caen a 361.64 kg. En la [Tabla 4.27](#) se presentan los resultados obtenidos para cada escenario.

Disponibilidad de alimento (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Disponibilidad de alimento (kg MS)	113019	107369	101717	96067	90415	84764	79113	73463	67811	62160	56510	50859
Consumo Potencial Total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019	113019	113019	113019	113019	113019	113019	113019
Consumo Total (kg MS)	113019	107369	101717	96067	90415	84764	79113	73463	67811	62160	56510	50859
Beneficio (USD)	40606	37034	33547	30053	26560	23069	19575	16082	12591	9100	5582	2059
Metano (kg)	804.04	763.45	723.26	683.09	642.91	602.72	562.00	522.36	482.17	441.99	401.82	361.64
Metano por litro (kg/l)	0.0056	0.0057	0.0059	0.0061	0.0064	0.0067	0.0071	0.0077	0.0084	0.0095	0.0113	0.0147

Tabla 4.27: Relación entre disponibilidad de alimento disponible, consumo de alimento, beneficio económico y metano emitido

En la [Figura 4.22](#) se observa que, a medida que la disponibilidad de alimento disminuye, el consumo total del rodeo se reduce, como se vio en la [Subsección 4.2.2](#). Dado que las emisiones de metano están directamente relacionadas con la cantidad de alimento consumido, la reducción en la disponibilidad de alimento se traduce en una disminución de las emisiones totales de metano en el sistema. Esto confirma que el principal factor determinante en la producción de metano es la ingesta de materia seca y la cantidad de energía bruta (EB) obtenida por los animales.

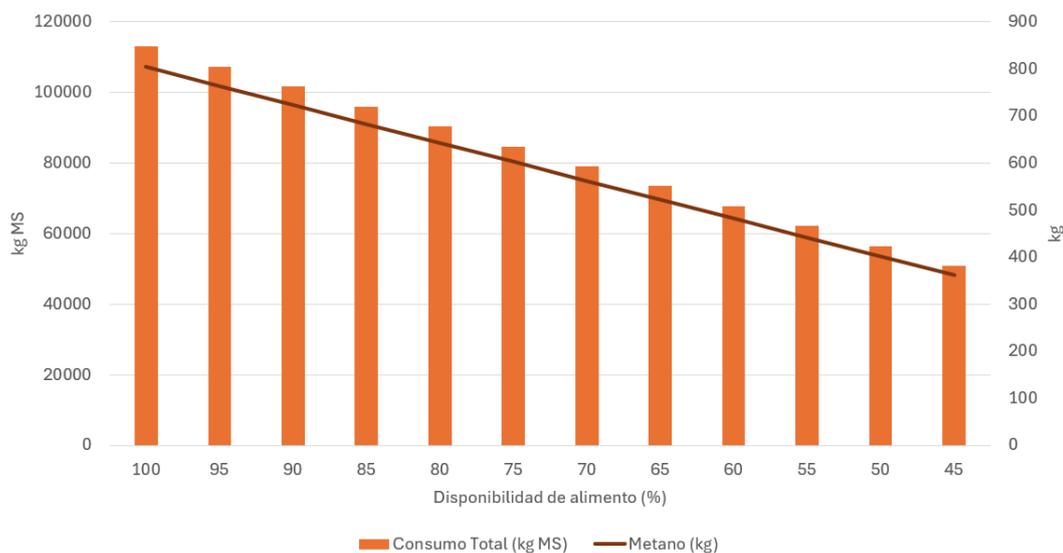


Figura 4.22: Relación entre las emisiones de metano y el consumo de alimento

Sin embargo, es importante notar que, si bien las emisiones totales bajan, esto no necesariamente implica una mejora en la eficiencia ambiental del sistema. La producción de leche también se ve afectada, lo que genera que las emisiones por litro de leche producido no disminuyan en la misma proporción. Cuando se analiza el metano por litro de leche, se observa un comportamiento diferente. A pesar de que las emisiones totales de metano disminuyen con menos alimento disponible, las emisiones de metano por litro de leche aumentan progresivamente. El comportamiento reflejado en la [Figura 4.23](#), demuestra que, con menor alimento disponible las vacas no pueden mantener la misma eficiencia productiva, lo que resulta en un mayor gasto de energía relativo para producir leche y, por lo tanto, un mayor metano emitido por litro de leche producido.

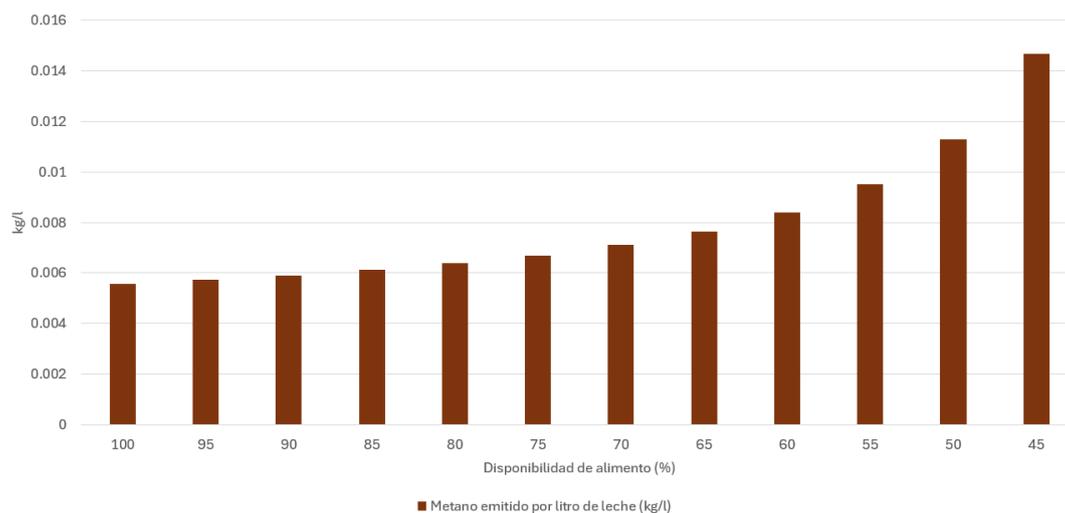


Figura 4.23: Emisión de metano por cada litro de leche producido

Objetivo 2: Evaluar las emisiones de metano obtenidas a partir de las estrategias de inversión en suplementación

Evaluar el impacto de las estrategias de suplementación presentadas en la [Subsección 4.2.3](#) sobre las emisiones de metano.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario Base.
- Escenario de escasez de alimento fijo en 80 % del Escenario Base.
- Escenarios de inversión en suplementación mediante tres estrategias distintas: Se analiza un aumento progresivo en la disponibilidad de alimento con respecto al Escenario Base, pasando de un 80 % como punto de partida, a un 85 %, luego a un 90 %, 95 % y finalmente 100 %. Este incremento se alcanzará a través de tres estrategias diferentes de suplementación:
 - Estrategia 1 - Inversión en forraje conservado.
 - Estrategia 2 - Inversión en concentrado.
 - Estrategia 3 - Inversión equitativa.

La [Tabla 4.16](#) detalla la composición de cada estrategia para todos los niveles de disponibilidad de alimento estudiados.

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico con enfoque ambiental - Metano.

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:
 - Alimento[z]
- Variables dependientes:
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)
 - producción (l)
 - beneficio (USD)
- Variable controlada:
 - Metano (kg)
 - Metano por litro (kg/l)

Resultados y Análisis

Cuando la disponibilidad de alimento es limitada y existe la posibilidad de invertir en forraje conservado o concentrados para acercar la oferta de alimento al consumo potencial total de las vacas del establecimiento, ya se demostró en la [Subsección 4.2.3](#) que todas las estrategias de inversión contribuyen a mejorar el beneficio económico, destacándose la inversión en concentrados como la opción que genera los mayores beneficios.

Por otro lado, desde el punto de vista ambiental, en la [Sección 4.2.6](#) se comprobó que las emisiones de metano están directamente relacionadas con la cantidad de alimento consumido. Por lo tanto, en los casos donde se incrementa la disponibilidad de alimento mediante la inversión en suplementación, se espera un aumento en las emisiones debido a la mayor ingesta de EB.

El análisis de resultados muestra que, si bien la inversión en suplementación para aumentar la disponibilidad de alimento genera un incremento en las emisiones totales de metano, la estrategia basada en el uso de concentrados se presenta como la alternativa más eficiente tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Dado que el consumo de alimento es similar en las tres estrategias evaluadas, la diferencia radica en la densidad energética de la dieta, siendo la suplementación con concentrados la que permite una mayor producción de leche. Como consecuencia, aunque las emisiones absolutas de metano sean mayores, la cantidad de metano emitida por litro de leche producido se reduce, lo que evidencia una mejora en la eficiencia del sistema. En la [Figura 4.24](#) se puede observar este comportamiento para la emisión de metano total, mientras que en la [Figura 4.25](#) se puede observar cómo se comporta la emisión de metano por litro según cada estrategia de inversión en suplemento. Esto confirma que evaluar las emisiones únicamente en términos absolutos puede ser insuficiente, y que un enfoque basado en la productividad permite identificar estrategias más sostenibles, en las que se optimiza la conversión del alimento en leche, maximizando el beneficio económico y reduciendo la huella ambiental por unidad de producto.

Sin embargo, si el presupuesto es limitado y el objetivo es mantener un sistema sostenible sin incurrir en altos costos, la estrategia 3 podría ser una opción intermedia viable. Ofrecer una mezcla equilibrada de forraje conservado y concentrados mejora la eficiencia de la conversión de alimento, manteniendo las emisiones de metano dentro de límites razonables.

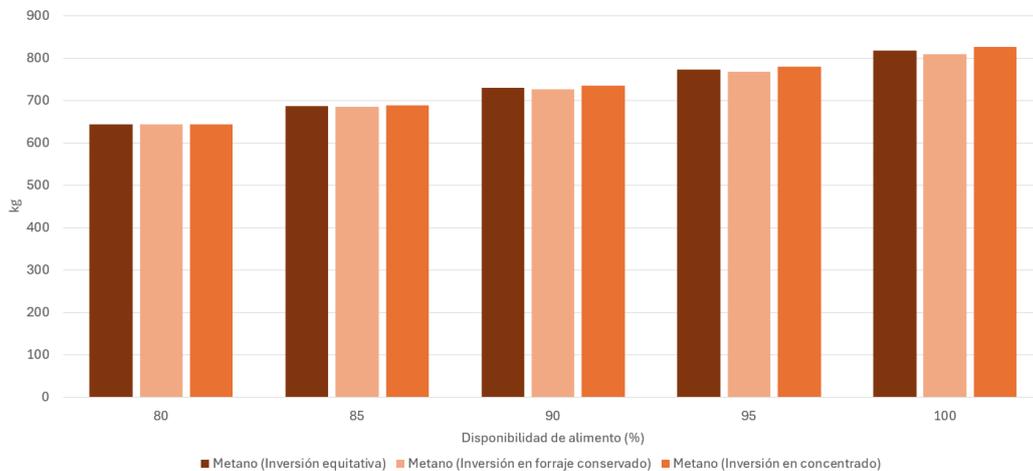


Figura 4.24: Emisión de metano según cada estrategia de inversión en suplementos

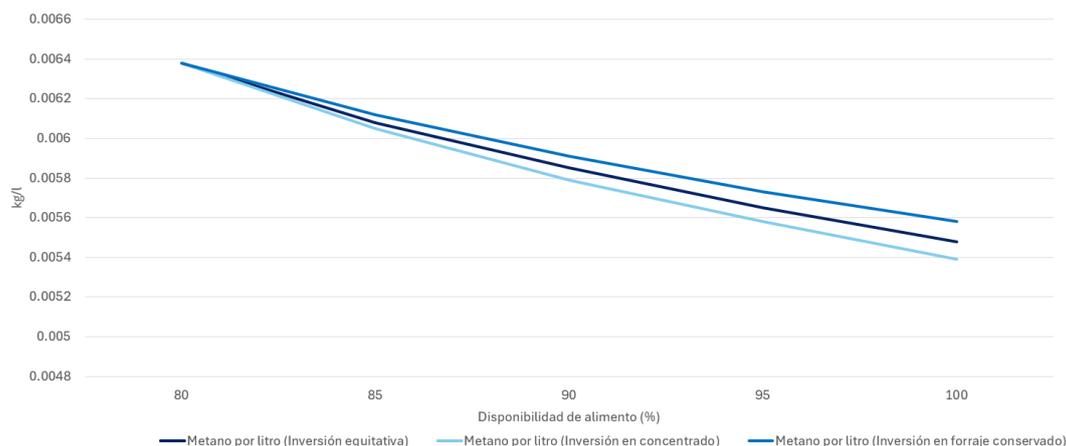


Figura 4.25: Emisión de metano por litro de leche producido según cada estrategia de inversión en suplementos

Objetivo 3: Evaluar las emisiones de metano obtenidas mediante las estrategias de reducción del rodeo

Analizar el impacto de las estrategias de reducción del rodeo presentadas en la [Subsección 4.2.4](#) sobre las emisiones de metano.

Diseño Experimental

1. Escenarios analizados

Para una disponibilidad de alimento fija, equivalente al 80% del consumo potencial total de la configuración base, se estudiaron tres estrategias de reducción del rodeo, explorando diferentes maneras de ajustar el tamaño del mismo. En cada caso, se evaluaron los tamaños de rodeo de 200, 190, 180, 170, 160 y 150 vacas en total. Cada estrategia considera ajustes específicos en las cantidades de los dos tipos de vacas presentes en el sistema, como se observa en la [Tabla 4.20](#).

- Estrategia 1 - Reducción equitativa: Se realizó una disminución uniforme, reduciendo simultáneamente 5 vacas del tipo 1 y 5 vacas del tipo 2 en cada iteración.
- Estrategia 2 - Reducción exclusiva del tipo 1: Se redujeron únicamente vacas del tipo 1, disminuyendo su cantidad en intervalos de 10 vacas por iteración, manteniendo constante la cantidad de vacas del tipo 2.
- Estrategia 3 - Reducción exclusiva del tipo 2: Se redujeron únicamente vacas del tipo 2, disminuyendo su cantidad en intervalos de 10 vacas por iteración, manteniendo constante la cantidad de vacas del tipo 1.

2. Modelos considerados

- Modelo Económico con enfoque ambiental - Metano.

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:
 - cantAnimales[t]
- Variables dependientes:
 - producción (l)
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)
 - beneficio (USD)
- Variable controlada:
 - Metano (Kg)
 - Metano por litro (kg/l)

Resultados y Análisis Desde un punto de vista de sostenibilidad, la reducción del rodeo podría representar una estrategia viable para disminuir la huella de carbono de la producción lechera sin comprometer significativamente la eficiencia del sistema.

En la [Tabla 5.103](#) del [Capítulo 13](#) se presentan los resultados de las emisiones de metano para las diferentes estrategias de reducción de rodeo. Se observa que, cuando el consumo potencial total de todas las vacas excede la disponibilidad de alimento, y en consecuencia se consume la totalidad del alimento disponible, las emisiones totales de metano permanecen constantes. Por el contrario, en los casos donde el consumo potencial total es menor que la oferta de alimento, las emisiones de metano se reducen. Esto se debe a que las emisiones están directamente relacionadas con la EB ingerida, es decir, con la cantidad de alimento efectivamente consumido, tal como se analizó en el [Sección 4.2.6](#). En la [Figura 4.26](#), se puede observar este comportamiento. Hasta las 160 vacas, se puede ver cómo se mantienen constantes las emisiones de metano sin importar la estrategia utilizada. Sin embargo, cuando se tienen 160 vacas, en dos de las estrategias presentadas, el consumo potencial total es menor que la oferta de alimento, lo que provoca una reducción en las emisiones de metano. En el caso de tener 150 vacas, las emisiones de metano se reducen en las tres estrategias.

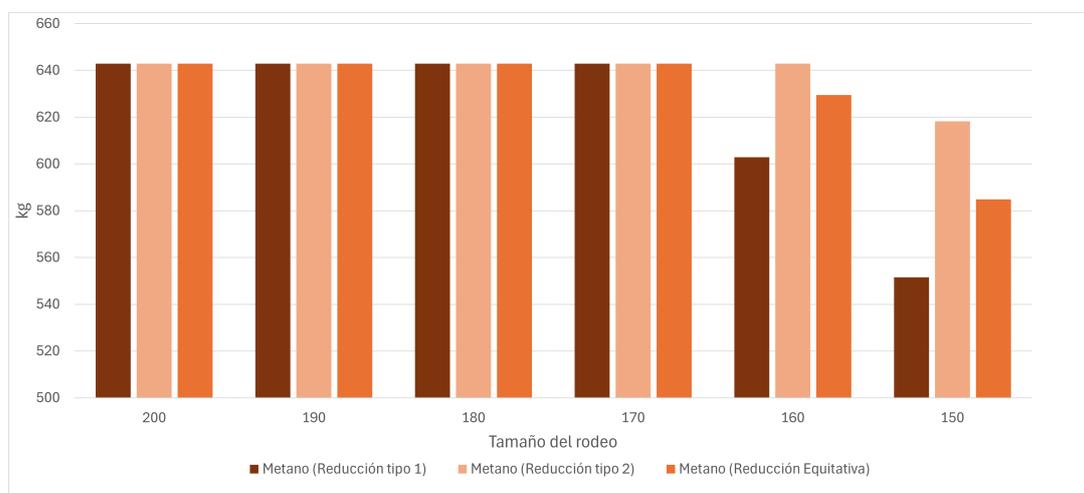


Figura 4.26: Emisión de metano (kg) por estrategia de reducción de rodeo

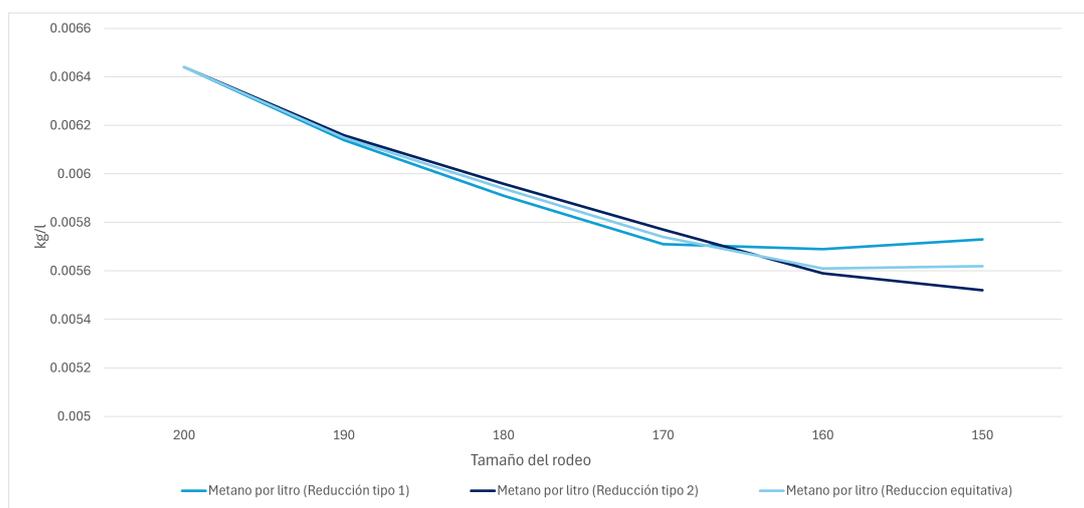


Figura 4.27: Emisión de metano por litro por estrategia de reducción de rodeo

La [Figura 4.27](#) muestra la relación entre el metano por litro de leche y el tamaño del rodeo bajo las tres estrategias de reducción de vacas. Se puede observar una disminución del metano por litro de leche a medida que se reduce el tamaño del rodeo, lo cual es esperado, ya que con menos vacas, la producción por vaca aumenta. Sin embargo, se puede notar que las estrategias de reducción de vacas del tipo 2

(Estrategia 3) y equitativa (Estrategia 1) muestran una reducción más pronunciada del metano por litro de leche, especialmente cuando el tamaño del rodeo baja por debajo de las 170 vacas. Esto sugiere que, cuando se busca minimizar las emisiones, eliminar vacas de un tipo específico o de manera equilibrada podría ser una opción más eficiente.

Objetivo 4: Comparar las emisiones de metano obtenidas a partir de la inversión en suplementos vs. la reducción del rodeo

El objetivo de este análisis es comparar las emisiones de metano generadas por dos enfoques diferentes para gestionar la producción lechera: la inversión en suplementos y la reducción del rodeo. Ambas estrategias buscan mejorar la eficiencia del sistema lechero, pero pueden tener un impacto distinto sobre las emisiones de metano. Se pretende identificar cuál de ellas resulta más eficaz desde una perspectiva ambiental, permitiendo tomar decisiones informadas sobre cómo equilibrar la sostenibilidad.

Resultados y Análisis

Al comparar ambos efectos, resulta evidente que al aumentar la disponibilidad de alimento por vaca, un mayor consumo conlleva un incremento en las emisiones de metano, como se vio en la [Sección 4.2.6](#). Sin embargo, según la estrategia adoptada, los efectos sobre la producción y la eficiencia del sistema pueden diferir, ya que cada enfoque impacta de manera particular en la relación entre alimentación, producción de leche y generación de emisiones.

En las figuras [Figura 4.28](#) y [Figura 4.29](#), se comparan las emisiones totales de metano y las emisiones de metano por litro de leche obtenidas a partir de ambas estrategias.

En cuanto a las emisiones totales de metano, la estrategia de reducción del rodeo presenta emisiones más bajas a medida que disminuye el número de vacas, ya que con menos animales hay una reducción en el consumo de alimento y, por lo tanto, en las emisiones de metano. Esta estrategia mantiene las emisiones más constantes, con una disminución progresiva a medida que se reduce el tamaño del rodeo. Por otro lado, en la estrategia de suplementación, se observa que las emisiones aumentan conforme se incrementa la disponibilidad de alimento. A medida que las vacas consumen más, debido a la suplementación, las emisiones de metano aumentan, ya que están ingiriendo más energía bruta. Sin embargo, las emisiones no aumentan de manera desproporcionada y se mantienen relativamente controladas.

En términos de emisiones de metano por litro de leche, ambas estrategias presentan una tendencia similar; sin embargo, la estrategia de suplementación parece ser más eficiente a medida que aumenta la inversión, como se aprecian en las tablas [Tabla 5.102](#) y [Tabla 5.103](#). Al aumentar la disponibilidad de alimento se genera un mayor consumo, lo cual deriva en un aumento de la producción de leche. Esto resulta en que las emisiones de metano por litro producido disminuyan a medida que aumenta la inversión, mejorando la eficiencia del sistema. En comparación, la estrategia de reducción de rodeo también contribuye a la disminución de las emisiones de metano por litro de leche, ya que al contar con un menor número de vacas, la producción de leche por animal aumenta. Sin embargo, su impacto no es tan significativo como el observado en la estrategia de inversión en suplementación, donde se obtienen valores más bajos.

En resumen, si bien ambas estrategias contribuyen a reducir las emisiones de metano por litro de leche, la estrategia de reducción del rodeo muestra mejores resultados en términos de emisiones totales de metano y metano por litro de leche. Sin embargo, la estrategia de suplementación también puede ser efectiva para mejorar la productividad del sistema, pero con mayor emisión de metano. La elección entre estas estrategias dependerá de los objetivos específicos del sistema lechero, ya sea reducir las emisiones o mejorar la producción de leche.

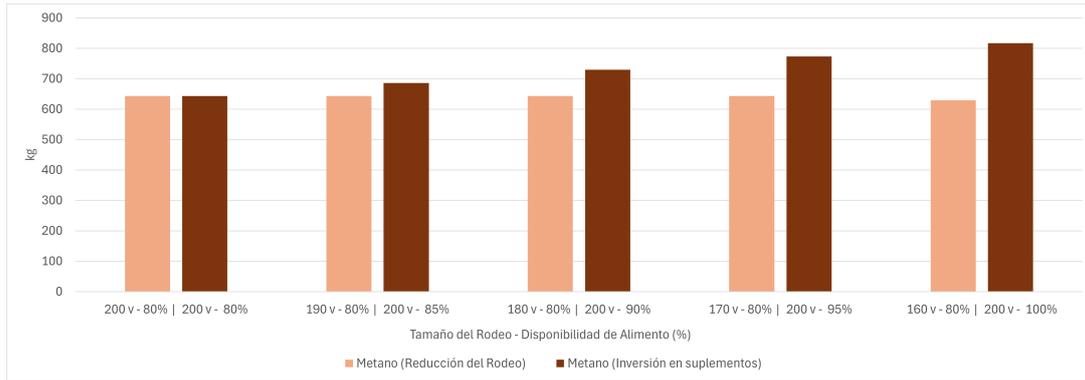


Figura 4.28: Comparación de las emisiones de metano para la estrategia de inversión vs. reducción de rodeo

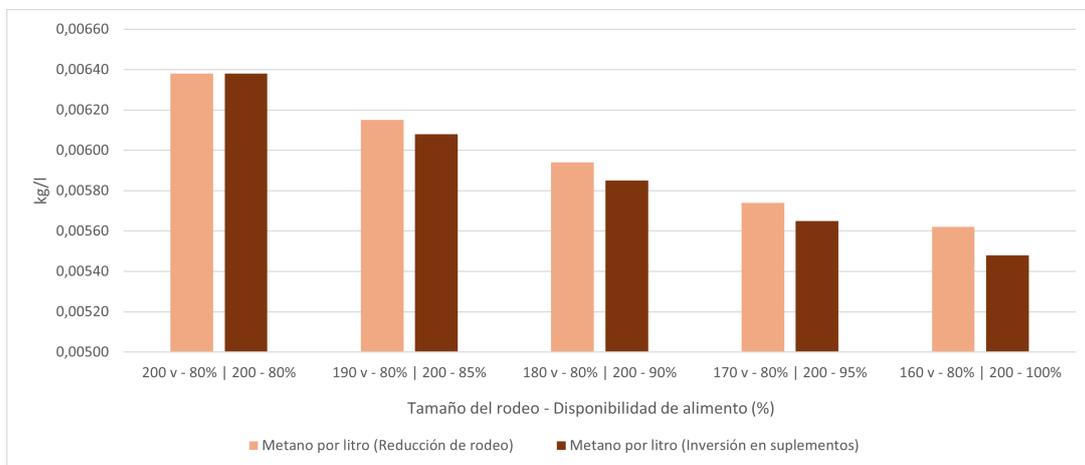


Figura 4.29: Comparación de las emisiones de metano por litro de leche producido para la estrategia de inversión en suplementos vs. reducción de rodeo

Objetivo 5: Estudiar el impacto de limitaciones en las emisiones del metano sobre el beneficio económico

Evaluar el impacto de la limitación de las emisiones totales de metano, analizando cómo la implementación de políticas ambientales destinadas a su reducción podría afectar la rentabilidad del sistema lechero.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario de escasez de alimento fijo en 80 % del Escenario Base.
- Escenarios de restricción de la emisión total de metano:
 - Escenario 1 - Se restringe el metano emitido un 5 %
 - Escenario 2 - Se restringe el metano emitido un 10 %
 - Escenario 3 - Se restringe el metano emitido un 15 %
 - Escenario 4 - Se restringe el metano emitido un 20 %

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico con enfoque ambiental - Metano limitado.

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:

- Metano (kg CH₄)
- Variables dependientes:
 - consTot (kg MS).
 - producción (l)
- Variables controladas:
 - beneficio (USD)

Limitación (%)	Máximo metano a emitir (kg)
5	609
10	578
15	546
20	514

Tabla 4.28: Valores de metano en kg. a limitar en cada escenario

Resultados y análisis

Los niveles de limitación se establecieron para reducir la emisión del escenario de escasez de alimento en un 80% respecto al Escenario Base, en el cual se emiten 642 kg de metano. Las limitaciones se aplicaron en incrementos del 5%, 10%, 15% y 20%, como se detalla en la [Tabla 4.28](#).

La limitación de las emisiones de metano implica una disminución en la producción de leche y el beneficio económico. En la [Figura 4.30](#) se observa que la producción de leche disminuye de manera lineal con cada nivel de limitación, registrando una caída del 8.9% en el escenario con un 5% menos de metano, y alcanzando una reducción del 34.3% en el escenario más exigente (reducción de emisiones de un 20%). De manera similar, el beneficio económico experimenta una disminución del 9.2% en la primera restricción y del 35.4% en la más estricta. En la [Tabla 4.29](#) se observa los valores obtenidos para los diferentes escenarios de limitación.

Limitación de emisiones (%)	0	5	10	15	20
Consumo (kg MS)	90416	85794.2	81426.7	77060.2	72702.8
ConsPot Total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019
Producción (l)	100793	91777	83254	74747	66206
Beneficio (USD)	26560	24112	21794	19483	17162
Metano (kg)	642.00	609.00	577.00	545.00	513.00
Reducción absoluta de producción (%)	-	8.9	17.4	25.8	34.3
Reducción absoluta del beneficio (%)	-	9.2	17.9	26.6	35.4

Tabla 4.29: Resultados para diferentes escenarios de limitación del metano emitido.

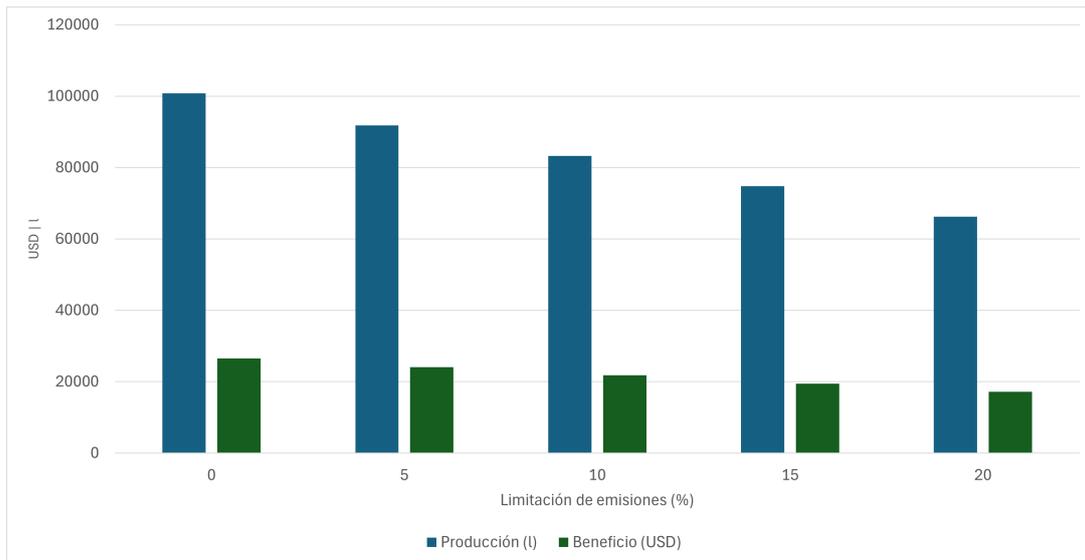


Figura 4.30: Producción y beneficio para los escenarios de limitación de emisiones de metano

Por otro lado, la [Figura 4.31](#) muestra la relación entre las restricciones de metano y la caída proporcional tanto en la producción como en el beneficio. La curva para la reducción de la producción sigue una trayectoria similar a la de reducción del beneficio, sugiriendo que, al reducir la producción de leche debido a las restricciones de metano, también se produce una disminución directa en la rentabilidad económica del sistema.

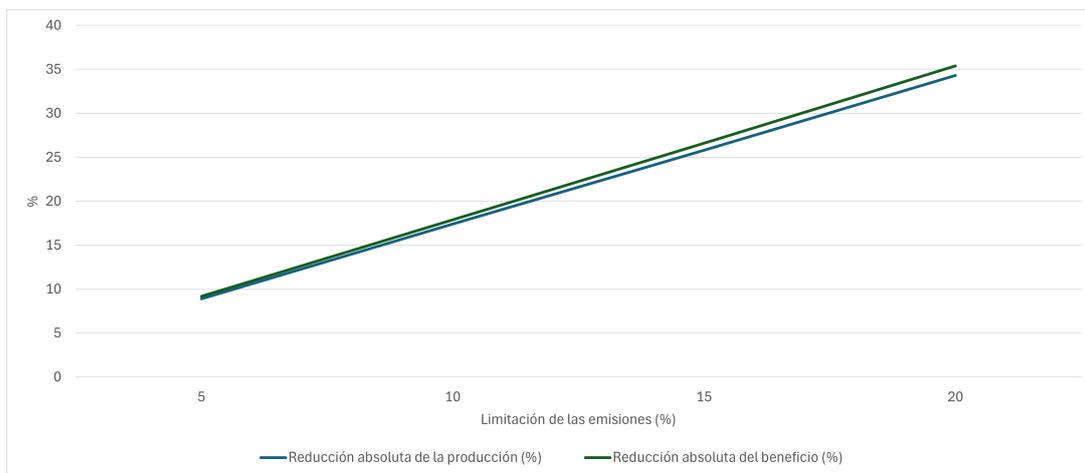


Figura 4.31: Reducción absoluta de la producción y el beneficio para los escenarios de limitación de emisiones de metano

Ante este escenario, resulta fundamental evaluar estrategias para mitigar el impacto económico de las restricciones. Una posible solución es la implementación de subsidios gubernamentales o incentivos para los productores que adopten prácticas más sostenibles. Estos subsidios podrían compensar la pérdida de ingresos derivada de la menor producción de leche y, al mismo tiempo, fomentar el desarrollo de tecnologías más eficientes en la reducción de emisiones. Otra estrategia viable sería el uso de créditos de carbono, en los cuales los productores que logren reducir sus emisiones de metano puedan generar créditos que puedan vender, obteniendo así una fuente adicional de ingresos. Este enfoque no solo beneficia económicamente a los productores, sino que también fomenta la inversión en tecnologías innovadoras que promuevan una producción más sostenible.

Por lo tanto, aunque estas restricciones son necesarias desde un punto de vista ambiental, su implementación debe ser cuidadosamente considerada, ya que tienen implicaciones económicas sustanciales. De no alcanzarse un balance adecuado entre producción y sostenibilidad ambiental, las políticas de reducción de metano podrían no ser sostenibles a largo plazo.

Conclusiones del Caso

En este caso se analizó el impacto de las emisiones de metano en la producción lechera y su relación con la rentabilidad del sistema. Los resultados mostraron que, aunque una mayor producción de leche generalmente conduce a un aumento de las emisiones de metano, la eficiencia alimentaria puede reducir la emisión de metano por litro de leche. Esto destaca la importancia de optimizar la conversión del alimento en leche para minimizar las emisiones de metano sin comprometer la rentabilidad.

En los escenarios analizados, la limitación de la disponibilidad de alimento resultó en una disminución en las emisiones totales de metano. Sin embargo, las emisiones por litro de leche aumentaron a medida que la disponibilidad de alimento disminuía, lo que refleja una menor eficiencia en la conversión de alimento en leche. A pesar de esto, las estrategias de inversión en suplementación, especialmente en concentrados, mostraron un balance más favorable entre rentabilidad y sostenibilidad ambiental, ya que permitieron incrementar la producción de leche sin un aumento desproporcionado en las emisiones de metano.

Además, las alternativas como la reducción del rodeo también demostraron ser efectivas en la reducción de las emisiones de metano, con una disminución más significativa de las emisiones por litro de leche. Sin embargo, aunque esta estrategia reduce las emisiones totales de metano, también disminuye la producción total de leche, lo que puede afectar negativamente el beneficio económico.

En resumen, la optimización de la alimentación y la adopción de estrategias de suplementación o reducción del rodeo son clave para encontrar un equilibrio entre la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad del sistema lechero. Es fundamental que los productores elijan las estrategias más adecuadas en función de sus recursos disponibles y sus objetivos a largo plazo.

4.2.7. Caso de Estudio 7: Evaluación de limitaciones asociadas a nutrientes - Nitrógeno

Las regulaciones ambientales orientadas a reducir las emisiones de nitrógeno derivadas de las heces y orina de los animales pueden tener un impacto significativo en la rentabilidad del sistema.

Utilidad para el productor:

- Comprender el impacto productivo y económico de eventuales normativas ambientales asociadas a la eliminación del nitrógeno.

Objetivo: Estudiar el impacto de limitaciones en las emisiones del nitrógeno sobre el beneficio y la producción

Este estudio tiene como objetivo evaluar los efectos de reducir la excreción de nitrógeno. Se busca analizar cómo la adopción de políticas ambientales que limiten la liberación de nitrógeno podría afectar la rentabilidad de un sistema lechero.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario de escasez de alimento fijo en 80 % del Escenario Base.
- Escenarios de restricción de la emisión total de nitrógeno:
 - Escenario 1 - Se restringe el nitrógeno eliminado un 5 %
 - Escenario 2 - Se restringe el nitrógeno eliminado un 10 %
 - Escenario 3 - Se restringe el nitrógeno eliminado un 15 %
 - Escenario 4 - Se restringe el nitrógeno eliminado un 20 %

2. Modelos considerados:

- Modelo económico con enfoque ambiental - Nitrógeno.

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:
 - Nitrógeno (kg)
- Variables dependientes:

- consTot (kg MS).
- producción (l)
- Variables controladas:
 - beneficio: Beneficio económico (USD)

Nitrógeno limitado (%)	Máximo Nitrógeno a eliminar (kg)
5	1047,7
10	992,5
15	937,4
20	882,2

Tabla 4.30: Valores de nitrógeno en kg a limitar en cada escenario

Resultados y Análisis

En la [Tabla 4.30](#) se presentan los valores utilizados para limitar la eliminación de nitrógeno en cada escenario, considerando distintos porcentajes de restricción en comparación con el caso inicial, en el que no se impuso una limitación al nitrógeno. En dicho escenario, se excretaron 1103 kg de nitrógeno en un período de 30 días, considerando la configuración base.

Los resultados muestran que la restricción de nitrógeno tiene un impacto significativo en la producción lechera y en el beneficio económico, como se observa en la [Tabla 4.31](#) y la [Figura 4.32](#). La reducción de nitrógeno conlleva una disminución progresiva en la producción, con una caída del 6.9% al aplicar una restricción del 5%, hasta alcanzar una reducción del 29.1% en el escenario más exigente (20% de restricción). De manera similar, el beneficio económico disminuye en un 7.0% en la primera restricción y hasta un 29.5% en la más estricta.

En términos de consumo, la cantidad total de alimento ingerido disminuye a medida que se intensifica la restricción de nitrógeno, pasando de 90416 kg en el escenario sin limitaciones a 77013 kg en el caso más restrictivo. Dado que el consumo potencial total permanece constante en todos los escenarios, la reducción en la ingesta de alimento responde a la limitante de nitrógeno establecida y no a cambios en la disponibilidad de recursos ni del rodeo. Es decir, para reducir las emisiones, al igual que en el caso de metano de la [Sección 4.2.6](#), se debe reducir o mejorar la alimentación.

Además, se observa que la cantidad de nitrógeno excretado por litro de leche producido tiende a aumentar a medida que se implementan restricciones, como se observa en la [Figura 4.33](#). En el escenario sin limitaciones, se excretan 10.94 kg/l, mientras que en el escenario con un 20% de restricción, este valor aumenta a 12.34 kg/l. Esto sugiere que, aunque la reducción en la excreción de nitrógeno es efectiva en términos absolutos, también puede comprometer la eficiencia del sistema productivo.

Limitación de emisiones (%)	Libre	5	10	15	20
Consumo (kg MS)	90416	87392	84416	81440	77013
Cons Pot Total (kg MS)	113019	113019	113019	113019	113019
Producción (l)	100793	93851	87000	80151	71490
Beneficio (USD)	26560	24712	22889	21066	18715
Nitrógeno (kg)	1103	1047	992	937	882
Nitrógeno por litro (kg/l)	10,94	11,16	11,40	11,69	12,34
Reducción absoluta de producción (%)	-	6,9	13,7	20,5	29,1
Reducción absoluta del beneficio (%)	-	7,0	13,8	20,7	29,5

Tabla 4.31: Resultados para diferentes escenarios de restricción de nitrógeno excretado.

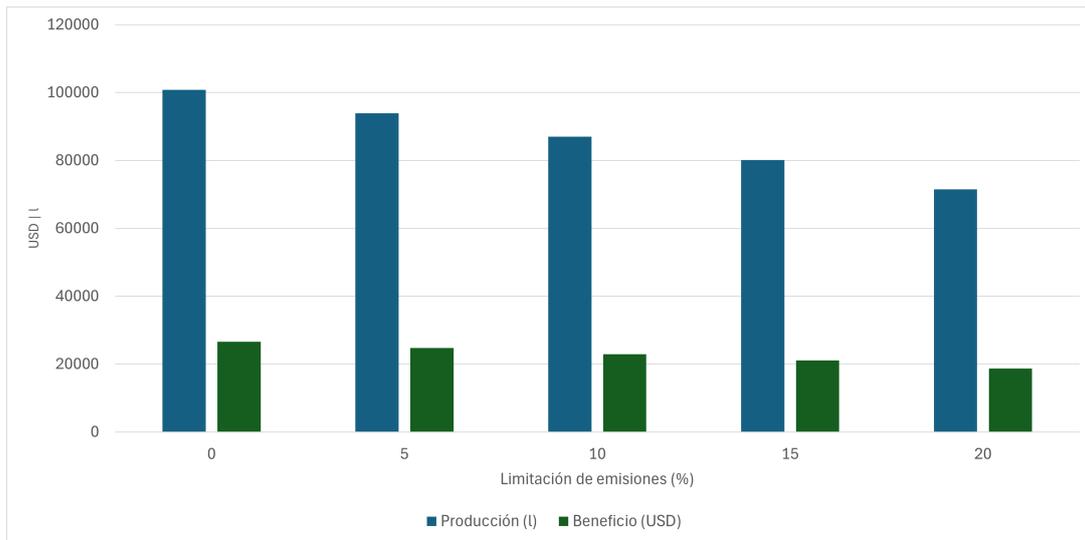


Figura 4.32: Producción y beneficio para los escenarios de regulación de emisiones de nitrógeno

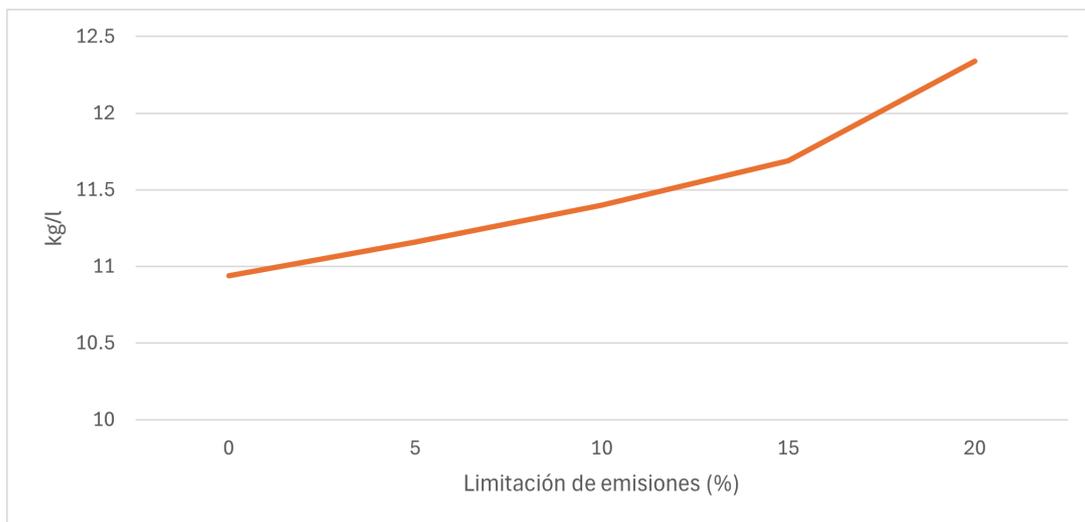


Figura 4.33: Nitrógeno excretado por litro de leche producido (kg/l) para los diferentes escenarios de restricción

Estos resultados destacan la complejidad de implementar políticas ambientales en sistemas lecheros. Si bien la reducción de la excreción de nitrógeno puede contribuir a la sostenibilidad ambiental, su impacto en la rentabilidad y eficiencia del sistema debe ser considerado cuidadosamente. Será necesario evaluar estrategias complementarias, como el ajuste de dietas o la mejora en la eficiencia del uso de nutrientes, para mitigar los efectos negativos en la producción y el beneficio económico.

4.2.8. Caso de Estudio 8: Sensibilidad del modelo económico con vacas variables al precio de la leche

El precio de la leche es un factor externo al sistema de producción, determinado por el mercado y sujeto a variaciones según la demanda y otros factores económicos. Además, no es uniforme, ya que depende del porcentaje de grasa presente en la leche, lo que impacta la rentabilidad de diferentes estrategias productivas. Estas fluctuaciones pueden influir en la preferencia por ciertos tipos de vacas dentro del rodeo, ya que su capacidad de producción de leche con distintos niveles de grasa afecta los ingresos del sistema. Analizar estos cambios permite comprender cómo los productores pueden optimizar la composición del rodeo para maximizar la rentabilidad en función de las condiciones del mercado, proporcionando información clave para la toma de decisiones estratégicas.

Utilidad para el productor:

- Anticiparse a las fluctuaciones de precios y ajustar la estrategia de producción en consecuencia.
- Evaluar la flexibilidad del sistema ante cambios en los factores externos, facilitando la adaptación a fluctuaciones del mercado.
- Identificar umbrales críticos de precio que puedan influir en la rentabilidad del establecimiento.

Objetivo: Evaluar cómo impacta el precio de la leche sobre la configuración del rodeo:

- Evaluar cómo las fluctuaciones en los precios de la leche para un cierto porcentaje de grasa afectan la preferencia de cada tipo de vaca.

Diseño Experimental

1. Escenarios Analizados

- Escenario Base: Precios de la leche constante para cierto porcentaje de grasa de cada tipo.
- Escenarios de sensibilidad: Para cierto porcentaje de grasa, se varía el precio de la leche y se evalúa cómo esto afecta la cantidad óptima de animales de cada tipo.

2. Modelos considerados:

- Modelo Económico con Vacas Variables

3. Variables y Parámetros

- Parámetro variable entre iteraciones:
 - Precio (USD/l): Precio del litro de leche para cada tipo de vaca
- Variables dependientes:
 - beneficio (USD)
 - producción (l)
- Variable controlada:
 - Cantidad de animales: cantidad de animales de cada tipo

Resultados y Análisis

El análisis de sensibilidad al precio de la leche permite evaluar cómo las fluctuaciones en el valor de mercado impactan la asignación óptima de los animales dentro del sistema. Esta evaluación es clave para comprender de qué manera estos cambios influyen en la rentabilidad y en la estructura productiva, proporcionando información relevante para la toma de decisiones estratégicas en la gestión del rodeo.

Para analizar la sensibilidad del modelo, se evaluaron distintos escenarios en los que se modifican los precios de la leche para cada tipo de vaca. En particular, las variaciones consideradas incluyen una disminución en el precio de la leche del tipo 1 y un incremento en el precio de la leche del tipo 2. Los resultados de estos escenarios, presentados en las tablas [Tabla 4.32](#) y [Tabla 4.33](#), permiten observar el impacto de estos cambios en la cantidad óptima de vacas asignadas, la producción total y el beneficio obtenido.

El análisis de la [Tabla 4.32](#) revela cómo se comporta el modelo a medida que el precio de la leche de las vacas del tipo 1 disminuye. En todos los casos, el precio de la leche de tipo 1 disminuye gradualmente, desde 0.37 USD por litro en el primer caso hasta 0.32 USD por litro en el último caso (Caso 6). En contraposición, el precio de la leche tipo 2 se mantiene constante en 0.4 USD por litro a lo largo de todos los casos.

Inicialmente, el modelo sigue favoreciendo las vacas de tipo 1, manteniendo una cantidad de 129 animales en los primeros cuatro casos, sin incorporar vacas de tipo 2. Sin embargo, en los casos 5 y 6, donde la reducción del precio es más significativa, la cantidad de vacas de tipo 1 disminuye a 60, y el modelo incorpora 43 vacas de tipo 2. Este ajuste refleja la estrategia del modelo para maximizar el beneficio: a medida que la rentabilidad de la producción con vacas de tipo 1 disminuye, se opta por incluir vacas de tipo 2, cuya leche, aunque en menor volumen, resulta más rentable debido a su mayor precio. Estos resultados se ven reflejados en la [Figura 4.34](#).

Un comportamiento similar se observa cuando, en lugar de disminuir el precio de la leche de tipo 1, este se mantiene constante y es el precio de la leche de tipo 2 el que aumenta. En este caso, la diferencia de precio entre ambos tipos debe ser mayor (0.08 USD) para que el modelo prefiera vacas de tipo 2. Como se observa en la [Tabla 4.33](#), en el caso 12, el modelo ajusta la asignación reduciendo la cantidad de vacas de tipo 1 a 60 e incorporando 93 vacas de tipo 2, priorizando así la producción con el tipo de leche más rentable. En los primeros casos (Casos 7 a 11), donde la diferencia de precio entre ambos tipos de leche es menor, el modelo sigue priorizando las vacas de tipo 1. Aunque el precio de la leche de tipo 2 aumenta, la diferencia aún no es lo suficientemente significativa como para justificar la sustitución de vacas de tipo 1 por vacas de tipo 2. Estos resultados se ven reflejados en la [Figura 4.35](#).

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	T1	T2	T1	T2								
Precio leche (USD)	0.37	0.4	0.36	0.4	0.35	0.4	0.34	0.4	0.33	0.4	0.32	0.4
Grasa (%)	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1
Cantidad de vacas	129	0	129	0	129	0	129	0	60	93	43	116
Producción (l)	122414	0	122414	0	122414	0	122414	0	60533	52845	42743	68297
Beneficio (USD)	33438	0	32534	0	31630	0	30727	0	12125	17731	7675	21870
Cons Pot (kg MS)	90493	0	90493	0	90493	0	90493	0	42090	48326	30164	60277
Cons Tot (kg MS)	90416	0	90416	0	90416	0	90416	0	42086	48326	30139	60277
Diferencia precio (USD)	0.03		0.04		0.05		0.06		0.07		0.08	

Tabla 4.32: Análisis de sensibilidad de la cantidad de vacas ante la reducción del precio de la leche del tipo 1, manteniendo constante el precio de la leche del tipo 2

	Caso 7		Caso 8		Caso 9		Caso 10		Caso 11		Caso 12	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Precio leche (USD)	0.37	0.4	0.37	0.41	0.37	0.42	0.37	0.43	0.37	0.44	0.37	0.45
Grasa (%)	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1	3.6	4.1
Cantidad de vacas	129	0	129	0	129	0	129	0	129	0	60	93
Producción (l)	122414	0	122414	0	122414	0	122414	0	122414	0	60533	52845.4
Beneficio (USD)	33438	0	33438	0	33438	0	33438	0	33438	0	13595	19947
Cons Pot (kg MS)	90493	0	90493	0	90493	0	90493	0	90493	0	42090	48326
Cons Tot (kg MS)	90416	0	90416	0	90416	0	90416	0	90416	0	42086	48326
Diferencia precio (USD)	0.03		0.04		0.05		0.06		0.07		0.08	

Tabla 4.33: Análisis de sensibilidad de la cantidad de vacas ante el aumento del precio de la leche del tipo 2, manteniendo constante el precio de la leche del tipo 1.

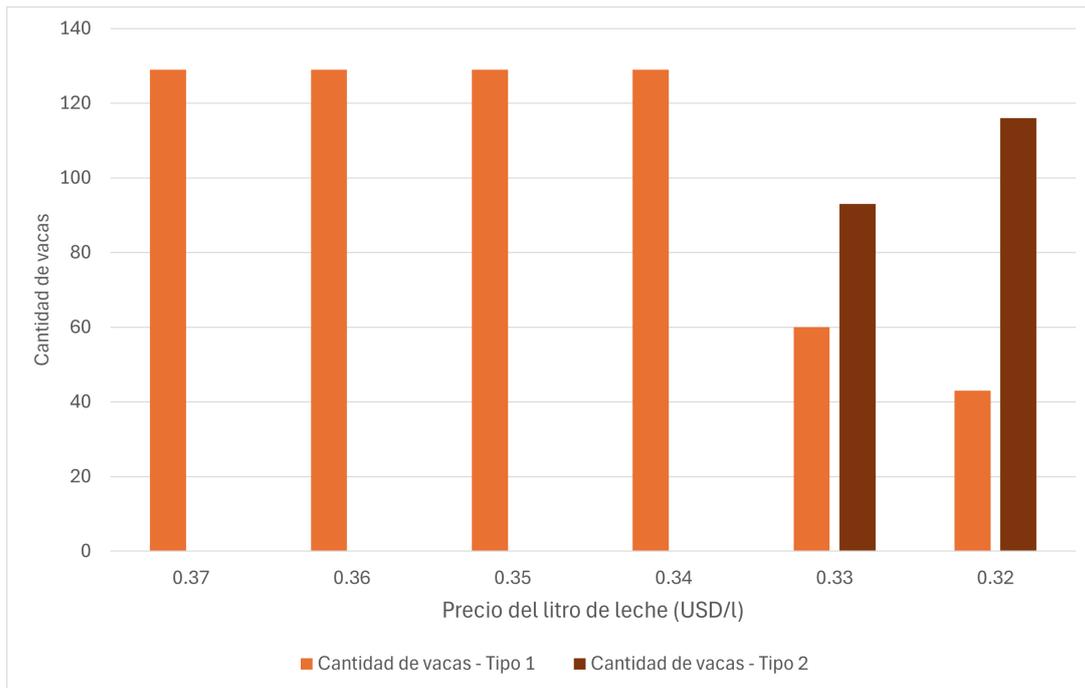


Figura 4.34: Cantidad de vacas por tipo al reducir el precio del litro de leche que se paga por las vacas del Tipo 1

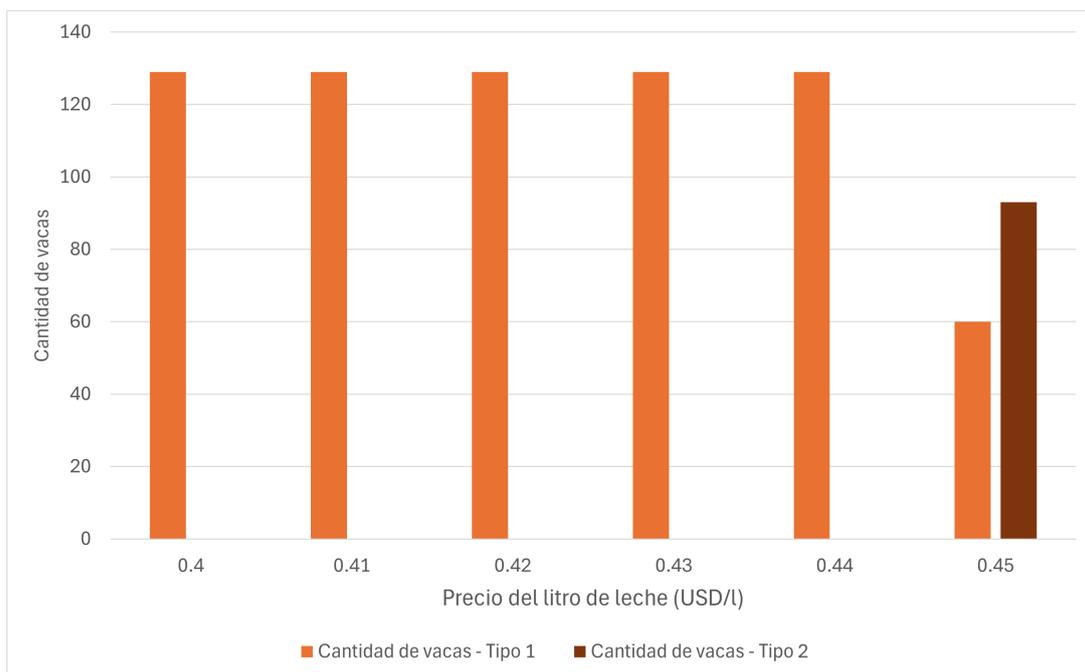


Figura 4.35: Cantidad de vacas por tipo al aumentar el precio del litro de leche que se paga por las vacas del Tipo 2

4.2.9. Caso de Estudio 9: Análisis anual con disponibilidades de alimento estacionales

Los sistemas de producción lechera en Uruguay están sujetos a variaciones estacionales que afectan tanto la disponibilidad de alimento como los requerimientos energéticos del ganado. A lo largo del año, se distinguen cuatro etapas correspondientes a las estaciones: verano (de diciembre a febrero), otoño (de marzo a mayo), invierno (de junio a agosto) y primavera (de septiembre a noviembre).

Cada una de estas estaciones presenta condiciones específicas que impactan en el desempeño productivo:

- Verano: Se caracteriza por temperaturas elevadas, lo que genera estrés calórico en las vacas, aumentando su gasto energético para mantener la termorregulación [112].
- Otoño: Se da una transición en la disponibilidad de alimento, con una leve reducción respecto al verano [113].
- Invierno: Las precipitaciones afectan la caminería, incrementando el gasto energético de los animales al desplazarse hacia las zonas de alimentación y ordeño. Además, la disponibilidad de alimento es menor en comparación con otras estaciones.
- Primavera: Se presenta la mayor oferta de alimento del año, lo que favorece la producción lechera.

Por otro lado, la disponibilidad de pasto varía considerablemente a lo largo del año debido a las fluctuaciones climáticas estacionales. Estas variaciones tienen un impacto directo en la producción lechera, ya que las vacas dependen de la cantidad y calidad del forraje disponible en cada estación.

- Verano: Durante el verano, las temperaturas alcanzan niveles elevados, con máximas promedio de 27°C en Montevideo y 32°C en el noroeste del país. Las precipitaciones disminuyen, lo que reduce la disponibilidad de pasto en muchas regiones [114].
- Otoño: En otoño, las temperaturas disminuyen gradualmente, con máximas promedio de 21°C en Montevideo y 24°C en el noroeste. Las precipitaciones aumentan, con un promedio trimestral que oscila entre 300 y 350 mm. Esto favorece el crecimiento del pasto, lo que permite una recuperación de las pasturas luego del estrés del verano, mejorando la disponibilidad de forraje [114].
- Invierno: El invierno se caracteriza por temperaturas frescas, con máximas promedio de 15°C en Montevideo y 18°C en el noroeste. Las precipitaciones son moderadas, con un promedio trimestral de 200 a 250 mm. Sin embargo, las bajas temperaturas y las lluvias constantes dificultan el acceso a las zonas de pastoreo, y el crecimiento de las pasturas se ralentiza debido al frío, lo que limita la disponibilidad de pasto [115].
- Primavera: Durante la primavera, las temperaturas oscilan entre 18°C y 27°C, y las precipitaciones aumentan gradualmente, con un promedio trimestral de 300 a 350 mm. Esta combinación de temperaturas moderadas y lluvias favorece el crecimiento óptimo del pasto, lo que resulta en una mayor disponibilidad de forraje para el ganado. La primavera es, por lo tanto, la estación más favorable para la producción lechera [115].

Utilidad para el productor:

- Planificación adaptada a las estaciones: Este modelo permite tener en cuenta las variaciones estacionales en la disponibilidad de alimento, clima y requerimientos energéticos del ganado, ayudando al productor a ajustar las estrategias de alimentación y manejo en función de cada estación.
- Gestión de costos: Durante los periodos de baja disponibilidad de pasto (como en invierno o el final del otoño), el productor puede utilizar el modelo para prever la necesidad de suplementación, optimizando los costos de alimentación y asegurando la rentabilidad durante todo el año.
- Mejora en la toma de decisiones: Este modelo proporciona información precisa sobre el desempeño del sistema en diferentes escenarios, lo que permite al productor tomar decisiones informadas sobre la inversión en suplementación, la estructura del rodeo, y el manejo del pasto.

Objetivo: Evaluar el impacto estacional en la producción y el beneficio económico en un sistema lechero

Evaluar cómo varían la producción de leche y el beneficio económico en función de las condiciones específicas de cada estación.

Diseño Experimental:

1. Escenarios Analizados

- Escenario sin efectos estacionales

- Escenario con efectos estacionales
2. Modelos considerados
- Modelo Económico con múltiples etapas
3. Variables y parámetros clave
- Parámetros variable entre escenarios:
 - alpha [e]: Representa el exceso de energía requerido debido a condiciones climáticas.
 - Variables dependientes:
 - consTot (kg MS)
 - consPotTot (kg MS)
 - producción (l)
 - Variables controladas:
 - beneficio (USD)

Resultados y análisis

Este modelo permitió evaluar la producción lechera y el beneficio económico a lo largo de un año, dividido en cuatro etapas: verano, otoño, invierno y primavera, considerando que cada una de ellas tiene una duración de 90 días. Cada etapa presentó diferentes disponibilidades de alimento y condiciones ambientales que afectaron la energía de movilidad de los animales, lo que, a su vez, impactó en la producción de leche y el beneficio económico del sistema. Para este análisis, se trabajó con un rodeo base y se utilizó solo una zona con pasto para poder evaluar como afecta la disponibilidad de este alimento variable en cada etapa, de acuerdo con lo explicado anteriormente. En la [Tabla 4.34](#) se pueden observar la disponibilidad de alimento asignados a cada etapa.

Las tablas [Tabla 4.34](#) y [Tabla 4.35](#) reflejan por un lado, la diferencia en el parámetro alpha entre ambas iteraciones, denominados efectos estacionales. En la primera, este valor se mantiene constante e igual a 1 en todas las etapas, mientras que en la segunda se decide incrementarlo durante el verano, otoño e invierno para representar condiciones desfavorables, ya sea por el estrés térmico o el deterioro de la caminería. Por otro lado, se presentan los valores obtenidos para el consumo, el beneficio y la producción en cada una de las cuatro etapas.

Estación del año	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
alpha	1	1	1	1
Consumo Potencial Total (kg MS)	339057	339057	339057	339057
Disponibilidad de alimento (kg MS) z_0	254293	237340	203434	322104
Consumo Total (kg MS)	254293	237340	203434	322104
Producción (l)	240944	207736	141521	373272
Beneficio (USD)	76912	64935	40981	124819
Beneficio Total (USD)	307647			

Tabla 4.34: Comportamiento a lo largo del año

Estación del año	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
alpha	1.2	1.05	1.15	1
Consumo Potencial Total (kg MS)	339057	339057	339057	339057
Disponibilidad de alimento (kg MS) z_0	254293	237340	203434	322104
Consumo Total (kg MS)	254293	237340	203434	322104
Producción (l)	233725	205956	136182	373272
Beneficio (USD)	74052	64220	38836	124819
Beneficio Total (USD)	301929			

Tabla 4.35: Comportamiento a lo largo del año con efectos estacionales

En la [Figura 4.36](#), se observa que la producción lechera alcanza su punto más bajo en invierno, lo que era esperable debido a que es la estación con menor disponibilidad de alimento. Además, el deterioro de

la caminería por el exceso de precipitaciones genera un gasto energético adicional, reduciendo aún más la energía disponible para la producción. Por el contrario, la primavera presenta los mejores niveles de producción, favorecidos por una mayor oferta de alimento. En verano, aunque el estrés térmico aumenta el gasto energético de las vacas, la disponibilidad de pasturas no se ve tan afectada en la simulación, ya que proviene de la abundancia primaveral. Sin embargo, en otoño, la reducción en la oferta de alimento comienza a hacerse más notoria, reflejando el impacto de posibles sequías y afectando negativamente la producción.

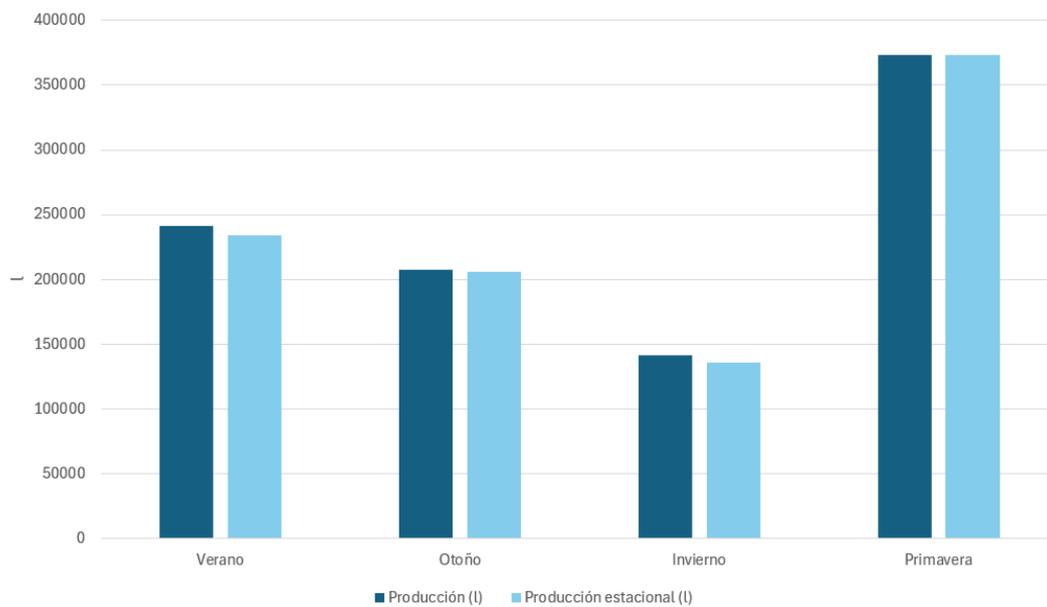


Figura 4.36: Producción sin considerar efectos estacionales vs. Producción estacional

En la [Figura 4.37](#), se observa que el beneficio económico sigue una tendencia similar a la producción lechera. Durante el invierno, el beneficio es el más bajo, ya que la menor disponibilidad de alimento, sumada al gasto energético representado por alpha, limita la producción y reduce los ingresos. En contraste, la primavera muestra el mejor desempeño económico, impulsado por una mayor oferta de alimento y una producción más eficiente.

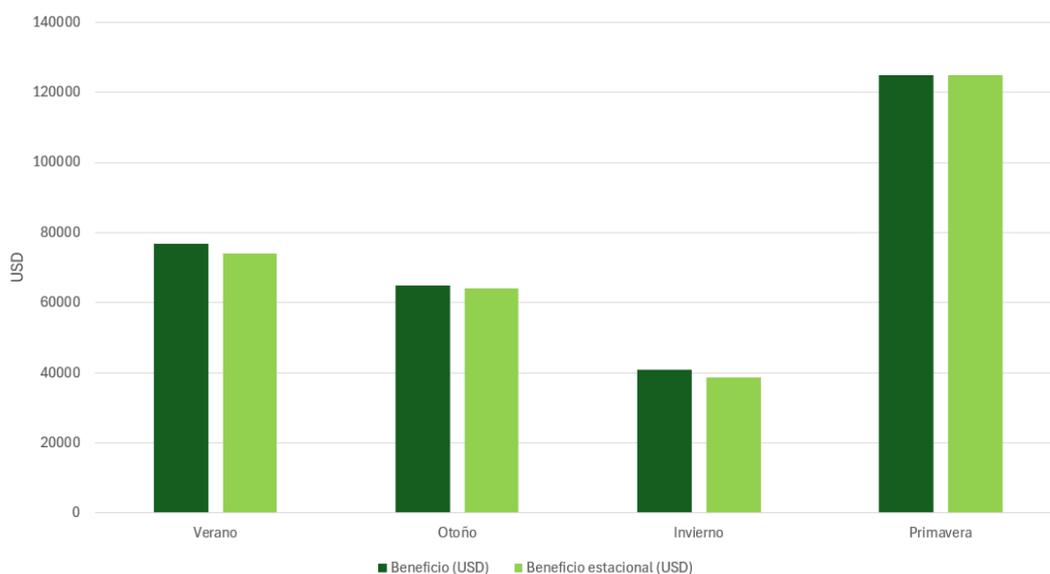


Figura 4.37: Beneficio económico sin considerar efectos estacionales vs. Beneficio económico estacional

Por lo tanto, se observa que el modelo responde de manera efectiva a los cambios en las condiciones

estacionales, ajustando tanto la producción como los beneficios asociados al manejo de las pasturas. Esto proporciona una herramienta útil para los productores, ya que permite anticiparse a los cambios estacionales y optimizar la gestión del recurso alimenticio y los costos operativos.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajo Futuro

5.1. Conclusiones

El presente trabajo abordó la optimización de la producción lechera en Uruguay mediante la aplicación de modelos matemáticos que consideran distintos factores productivos, económicos y ambientales. La producción lechera en Uruguay enfrenta múltiples desafíos relacionados con la rentabilidad, la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos, lo que hace indispensable el desarrollo de herramientas que permitan una gestión más eficiente del sistema productivo.

A lo largo del estudio, se desarrollaron y validaron diferentes modelos matemáticos que permitieron analizar estrategias de producción y evaluar su impacto en la rentabilidad del sistema lechero. Se compararon modelos que priorizan la maximización de la producción de leche con aquellos que buscan maximizar el beneficio económico, permitiendo comprender cómo la asignación de recursos influye en los resultados del sistema. Asimismo, se evaluó la variabilidad en la cantidad de vacas y la disponibilidad de alimento como factores clave en la eficiencia productiva y económica.

El análisis también permitió evaluar la estrategia utilizada para generar las soluciones. Dicha estrategia se basa en asignar la mayor cantidad posible de vacas a las zonas con mayor densidad energética o mayor rentabilidad económica. Aunque esta forma de distribución de recursos, basada en el agrupamiento y asignación de vacas a distintas áreas de pastoreo, parece lógica, los resultados obtenidos no siempre son intuitivos.

Los hallazgos sugieren que es clave proporcionar a cada vaca los recursos suficientes para alcanzar su consumo potencial, ya que cualquier restricción en la alimentación puede generar pérdidas significativas en la producción de leche y en las ganancias económicas. En los casos en los que los recursos disponibles no son suficientes para cubrir las necesidades de todo el rodeo, la estrategia óptima implica repartir los recursos entre todos los animales. Sin embargo, si la supervivencia de todas las vacas no fuera una restricción, sería más eficiente alimentar completamente a un grupo reducido y dejar sin alimentación al resto.

Los resultados obtenidos evidencian que la optimización en la asignación de vacas a diferentes zonas de alimentación puede generar beneficios significativos, tanto en términos de producción como de rentabilidad. Se identificó que ajustar el tamaño del rodeo en función de la disponibilidad de alimento mejora la eficiencia del sistema, al evitar gastos innecesarios en suplementación y asegurar una producción más estable en el tiempo. Este enfoque permitió confirmar que el beneficio económico está estrechamente vinculado al grado de aprovechamiento de los recursos disponibles, en particular los recursos alimenticios y la capacidad productiva del rodeo. Asimismo, se analizó el impacto de la suplementación estratégica sobre los costos y el rendimiento animal, observándose que una combinación adecuada de forraje y concentrado permite optimizar la conversión alimenticia y, por tanto, maximizar la producción de leche.

Otro aspecto relevante del estudio fue la incorporación de los modelos con enfoque ambiental, que consideraron el impacto de las emisiones de metano en el sistema lechero. Si bien la reducción de las emisiones de metano es un objetivo deseable desde el punto de vista ambiental, los resultados muestran que su implementación debe ser cuidadosamente planificada para evitar impactos negativos en la rentabilidad del sistema.

La inclusión de restricciones ambientales en el modelo permitió evaluar diferentes estrategias para minimizar las emisiones de metano sin comprometer la viabilidad económica del tambo, destacando la importancia de encontrar un equilibrio adecuado entre producción, rentabilidad y sostenibilidad ambien-

tal. Los resultados mostraron que, aunque una mayor producción de leche generalmente conduce a un aumento de las emisiones de metano, la eficiencia alimentaria puede reducir la emisión de metano por litro de leche. Esto resalta la importancia de optimizar la conversión del alimento en leche para minimizar las emisiones sin comprometer la rentabilidad. Además, se observó que la reducción en la disponibilidad de alimento genera una disminución en las emisiones totales de metano; sin embargo, esto se acompaña de un aumento en las emisiones por litro de leche debido a una menor eficiencia en la conversión de alimento. Estrategias como la inversión en suplementación, especialmente en concentrados, permitieron lograr un balance más favorable entre rentabilidad y sostenibilidad ambiental, al incrementar la producción de leche sin un aumento desproporcionado en las emisiones de metano. La reducción del rodeo demostró ser efectiva en la disminución de las emisiones totales de metano, aunque esto conllevó una reducción en la producción total de leche, lo que puede afectar la rentabilidad del sistema.

Por otro lado, la gestión del nitrógeno se presentó como un factor determinante en la eficiencia del sistema productivo. Los resultados evidenciaron que la imposición de restricciones en la excreción de nitrógeno afecta de manera significativa tanto la producción lechera como el beneficio económico. A medida que aumenta la restricción de nitrógeno, se observó que la producción de leche y la rentabilidad del sistema disminuyen de manera progresiva. Esto pone de manifiesto que cualquier estrategia orientada a la reducción de nitrógeno debe ser acompañada de medidas que compensen sus efectos sobre la productividad y la rentabilidad del sistema. Asimismo, la restricción en la eliminación de nitrógeno impacta el consumo de alimento, que disminuye a medida que se intensifica la limitación. Esto sugiere que la reducción de la excreción de nitrógeno no solo está relacionada con cambios en la dieta, sino también con la eficiencia de conversión de los nutrientes en leche. Por último, se observó que la cantidad de nitrógeno excretado por litro de leche tiende a aumentar con mayores restricciones. Esto indica que, aunque en términos absolutos se logra una reducción de la excreción de nitrógeno, la eficiencia del sistema se ve comprometida, lo que podría limitar el impacto positivo de estas medidas desde una perspectiva integral.

En síntesis, este estudio aporta una herramienta de optimización que permite evaluar diferentes estrategias de producción y manejo en sistemas lecheros, proporcionando información clave para la toma de decisiones informada. Los modelos desarrollados pueden ser utilizados por productores y asesores técnicos para mejorar la eficiencia de los tambos, maximizando la rentabilidad sin comprometer la sostenibilidad del sistema. Sin embargo, aún quedan diversas oportunidades para mejorar y expandir el modelo, lo que abre múltiples líneas de trabajo futuro.

5.2. Trabajo Futuro

A pesar de los avances logrados en este estudio, existen múltiples oportunidades para ampliar y mejorar los modelos de optimización desarrollados, con el fin de hacerlos aún más robustos y aplicables en distintos escenarios productivos. A continuación, se presentan algunas líneas de trabajo futuro que podrían contribuir al desarrollo de herramientas más precisas y adaptadas a la realidad del sector lechero uruguayo.

Los modelos actuales priorizan la maximización del beneficio económico o la producción de leche, pero en el futuro podrían ampliarse para considerar simultáneamente otros factores relevantes, como la reducción del impacto ambiental, la eficiencia en el uso del agua y el bienestar animal. La implementación de técnicas de optimización multiobjetivo permitiría obtener soluciones más equilibradas y sostenibles, adaptadas a las necesidades específicas de cada productor.

La implementación de normativas ambientales y políticas de incentivos económicos puede tener un impacto significativo en la rentabilidad del sector lechero. Un posible desarrollo futuro sería la simulación de distintos escenarios regulatorios para evaluar cómo afectarían a los productores las nuevas políticas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero o las restricciones sobre el uso de fertilizantes y efluentes. Esto permitiría generar recomendaciones basadas en datos para la formulación de políticas públicas más efectivas.

Finalmente, una aplicación práctica de este trabajo sería el desarrollo de una herramienta computacional interactiva que permita a los productores ingresar datos de su sistema productivo y recibir recomendaciones personalizadas basadas en el modelo de optimización. Esto facilitaría la adopción de estas tecnologías en el sector y contribuiría a la toma de decisiones basada en evidencia.

Bibliografía

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). *Portal lácteo- Composición de la leche*. 2025. <https://www.fao.org/dairy-production-products/products/milk-composition/es>. Acceso: 2025-03.
- [2] FAO. *Milk production*. <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/milk-production/en>. Acceso: 2024-06.
- [3] S.R. Fariña; J. Baudracco; F.Bargo. *Producción láctea en diversas regiones: América Latina*. <https://www.ocla.org.ar/noticias/17619609-produccion-lactea-en-diversas-regiones-america-latina>. Acceso 03-2025. 2020.
- [4] Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). *Portal INIA, Programa Nacional de Investigación Producción de Leche*. <https://www.inia.org.uy/online/site/335000I1.php>. Acceso: 2024-06.
- [5] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Anuario Estadístico Agropecuario. Reporte Técnico, Serie Trabajos Especiales*. 2018. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/informe_final_2018.pdf. Acceso: 2024-06.
- [6] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA) y Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA). *Estadísticas del Sector Lácteo 1998*. Boletín Informativo, Vol. 14. 1999. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/estadisticas_del_sector_lacteo_-_ano_1998_-_agosto_1999_-_no_14.pdf. Acceso: 2024-06.
- [7] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Estadísticas del Sector Lácteo 2015*. Serie Trabajos Especiales, Vol. 339. 2016. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/diea>. Acceso: 2024-06.
- [8] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Estadísticas del Sector Lácteo 2020*. Serie Trabajos Especiales, Vol. 368. 2021. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/diea>. Acceso: 2024-06.
- [9] P. Chilibroste. *Competitividad del sector primario de producción de leche: donde competimos bien y donde no*. 2021. https://www.inale.org/wp-content/uploads/2021/06/Produccion_primaria_de_leche_donde_competimos_bienydonde_noIng_Agr_Pablo_Chilibroste.pdf. Acceso: 2025-02.
- [10] Uruguay XXI. *Uruguay XXI: Informe Anual 2024 de Comercio Exterior*. 2024. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/db9efbc27476e87964777b14ad91155ba79bcd39.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [11] Ambito Financiero. *Buenas noticias para el sector lácteo: las exportaciones subieron un 39% interanual en febrero*. <https://www.ambito.com/uruguay/buenas-noticias-el-sector-lacteo-las-exportaciones-subieron-un-39-interanual-febrero-n6121406>. Acceso 03-2025. 2025.
- [12] Ceres. *El sector lácteo como motor del desarrollo económico y social del Uruguay*. 2021. https://ceres.uy/admin/uploads/slides/archivo_1669002285.pdf. Acceso: 2025-02.
- [13] A. Haro. *Disminución del impacto ambiental en granjas lecheras*. 2024. <https://dellait.com/es/disminucion-del-impacto-ambiental-en-granjas-lecheras/>. Acceso: 2024-09.

- [14] J. Bonilla y C. Lemus Flores. *Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático*. Revista mexicana de ciencias pecuarias, vol. 3, N° 2, págs. 157–177. 2012. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v3n2/v3n2a6.pdf>, Acceso: 2025-01.
- [15] D. Garin et al. *Do pasture-based mixed dairy systems with higher milk production have lower environmental impacts? A Uruguayan case study*. 2020. https://www.researchgate.net/publication/340804678_Do_pasture-based_mixed_dairy_systems_with_higher_milk_production_have_lower_environmental_impacts_A_Uruguayan_case_study. Acceso: 2024-09.
- [16] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). *Primer estudio de huella de carbono en tres cadenas agroexportadoras del Uruguay*. 2024. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/primer-estudio-huella-carbono-tres-cadenas-agroexportadoras-del-uruguay>. Acceso: 2024-09.
- [17] Food and Agriculture Organization (FAO). *El sector lechero mundial: Datos*. 2014. <http://www.dairydeclaration.org/Portals/153/FAO-Global-Facts-SPANISH-F.PDF?v=1>. Acceso: 2024-06.
- [18] El Observador. *Análisis del Mercado Lácteo en América Latina*. 2024. Publicado en América Economía. <https://www.americaeconomia.com>. Acceso: 2025-01.
- [19] M. Bertino y H. Tajam. *La agroindustria láctea en el Uruguay 1911–1943*. 2000. <https://iecon.fcea.udelar.edu.uy/images/publicaciones/87/dt-04-00.pdf>. Acceso: 2024-06.
- [20] J. Martí. «Mercado, políticas públicas y cooperativas de productores en la lechería uruguaya a comienzos del siglo XX». En: *Cooperativismo & Desarrollo* 28.116 (2020). <https://doi.org/10.16925/2382-4220.2020.01.02>. Acceso 2024-06, págs. 1-33. DOI: 10.16925/2382-4220.2020.01.02.
- [21] República Oriental del Uruguay. *Ley N° 9526, 15 de octubre de 1935, Créase la Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE)*. 1935. <https://www.impo.com.uy/bases/leyes-originales/9526-1935#:~:text=Cr%C3%A9ase%20la%20Cooperativa%20Nacional%20de,las%20usinas%20de%20la%20C.N.P.L>. Acceso: 2024-06.
- [22] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Anuario Estadístico Agropecuario 2019*. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2019/Anuario2019.pdf>. Acceso: 2024-06.
- [23] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Estadísticas del Sector Lácteo 2024*. Serie Trabajos Especiales, Vol. 368. 2021. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/diea/anuario2024>. Acceso: 2024-06.
- [24] Instituto Nacional de la Leche (INALE). *¿Qué es INALE?* <https://www.inale.org/acerca-de/>. Acceso: 2025-01.
- [25] Instituto Nacional de la Leche (INALE). *Estimación INALE en base a DIEA y FIL-IDF*. <https://www.inale.org/uruguay-lechero/>. Acceso: 2024-06.
- [26] Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). *Programa Nacional de Investigación Producción de Leche*. <https://www.inia.org.uy/online/site/335000I1.php>. Acceso: 2024-06.
- [27] República Oriental del Uruguay. *Ley N° 18.242: Lácteos. Se dictan normas relativas a la producción, fomento, desarrollo y regulación*. 2007. https://www.inale.org/wp-content/uploads/2020/07/Ley_18.242.pdf. Acceso: 2024-06.
- [28] América Retail. *La industria láctea uruguaya enfrenta un difícil panorama con caídas notables*. 2024. <https://america-retail.com/paises/uruguay/la-industria-lechera-uruguaya-enfrenta-un-dificil-panorama-con-caidas-notables/>. Acceso: 2025-03.
- [29] Ámbito. *El gobierno apoyará al sector lechero con 7M*. 2024. <https://www.ambito.com/uruguay/el-gobierno-apoyara-al-sector-lechero-us-7m-n5993230>. Acceso: 2025-03.
- [30] Agricultura y Pesca (MGAP) Ministerio de Ganadería. *Poder Ejecutivo asistirá con 7.000.000 de dólares para 1.600 productores lecheros*. 2024. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/poder-ejecutivo-asistira-7000000-dolares-para-1600-productores-lecheros>. Acceso: 2025-03.

- [31] La Mañana. *Diputados solicitó al BROU tomar medidas que alivien la situación de los productores rurales*. 2024. <https://www.xn--lamaana-7za.uy/agro/diputados-solicito-al-brou-tomar-medidas-que-alivien-la-situacion-de-los-productores-rurales/>. Acceso: 2025-03.
- [32] D. Cáceres. *La sustentabilidad de los sistemas campesinos analizada desde dos enfoques: Estados vs. Procesos*. 2008. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000800007&lng=es&tlng=es. Acceso: 2024-06.
- [33] Ámbito. *En Uruguay cierran casi 65 tambos al año*. 2024. <https://www.ambito.com/uruguay/en-cierran-casi-65-tambos-ano-n5915486>. Acceso: 2024-06.
- [34] A. Gorga y M. Mondelli. *Recambio Generacional en la Lechería Uruguaya*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Serie Técnica N° 15/04, 2015. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/e_15_04_recambio_generacional_lecheria_gorga-mondelli.pdf. Acceso: 2025-03.
- [35] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Anuario Estadístico Agropecuario 2022*. 2022. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2022>. Acceso: 2024-06.
- [36] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Anuario Estadístico Agropecuario 2023*. 2023. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2023>. Acceso: 2024-06.
- [37] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Anuario Estadístico Agropecuario 2021*. 2021. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2021>. Acceso: 2024-06.
- [38] Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). *Anuario Estadístico Agropecuario 2012*. 2012. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2012>. Acceso: 2024-06.
- [39] F. Carriquiry. *El sector lácteo enfrenta dificultades económicas: ¿Cuál es la situación actual? ¿Qué está pasando a nivel de precios?* En *Perspectiva*. <https://enperspectiva.uy/en-perspectiva-programa/analisis-exante/el-sector-lacteo-enfrenta-dificultades-economicas-cual-es-la-situacion-actual-que-esta-pasando-a-nivel-de-precios-analisis-de-florencia-carriquiry-exante/>. Acceso: 2025-03.
- [40] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) y Food and Agriculture Organization (FAO). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2020-2029*. 2020. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/59f4e57f-148a-4347-a38c-501e691f5647/content>. Acceso: 2024-06.
- [41] S. Fariña. *Desafíos Futuros para los sistemas de producción de leche de Uruguay*. 2016. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15284/1/JB2016-65-69.pdf>. Acceso: 2024-06.
- [42] L. Latrille, R. Smith y V. Moreira. *Caracterización de sistemas productivos lecheros en la X región de Chile mediante análisis multivariable*. *Agricultura Técnica*. Vol. 62, N° 3, pgs. 305-316. 2002. DOI: 10.4067/S0365-28072002000300004. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-28072002000300004. Acceso: 2024-12.
- [43] L. Latrille, V. Moreira y R. Smith. *Characterization of dairy productive systems in the Tenth Region of Chile using multivariate analysis*. 2002. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-28072002000300004. Acceso: 2024-07.
- [44] A. López. *Sistemas de Producción de Leche en la Argentina*. 2014. Área de Producción de Bovinos de Leche, Facultad de Ciencias Veterinarias, UBA. <https://produccionbovina.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/06/sistema-de-produccion-de-leche-en-la-argentina.pdf>. Acceso: 2024-12.
- [45] J. Parga. *Recomendaciones para la Planificación y Control del Pastoreo Durante el Otoño e Invierno*. *Revista PeruLactea*. 2018. <https://perulactea.com/recomendaciones-para-la-planificacion-y-control-del-pastoreo-durante-el-otono-e-invierno/>. Acceso: 2024-06.

- [46] F Lanuza. *Requerimientos de nutrientes según estado fisiológico en bovinos de leche*. Boletín INIA (Chile) - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, no. 148. 2006. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/produccion_bovina_leche/331-Requerimientos.pdf. Acceso: 2024-06.
- [47] N. Tadich. «Dairy cattle welfare». En: *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias Vol.24 N°3* (2011). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902011000300007. Acceso: 2025-01.
- [48] P. Chilibroste. *Fuentes comunes de error en la alimentación del ganado lechero en pastoreo: I. Predicción del consumo*. 1998. <https://bibliotecadigital.fvet.edu.uy/handle/123456789/634>. Acceso: 2025-01.
- [49] J. Rossi y S. García. *¿Cual es el “piso” de la producción pastoril?* <https://www.agro.uba.ar/sites/default/files/catedras/piso.pdf>. Acceso: 2024-06.
- [50] Y. Acosta. *Utilización de ensilajes, concentrados y pasturas para producción de leche*. Guía para la Alimentación de Rumiantes. Serie Técnica N° 5, INIA (Uruguay). La Estanzuela. 1991. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8345/1/111219220807114211-p.157-166.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [51] Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE). *Sistema de Gestión de Efluentes en el Tambo (SGET)*. 2018. <https://www.sustentable.eleche.com.uy/wp-content/uploads/2022/05/8-SGET-Marzo2018-FichaTecnicaNo13-EfluentesEnElTambo.pdf>. Acceso: 2024-08.
- [52] N. E. Cisneros Basualdo. *Diagnóstico ambiental de dos tambos en la cuenca Mar y Sierras, Tandil, Provincia de Buenos Aires*. 2024. <https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitstreams/6d2ad6bb-0240-4ddb-a760-5f0ea3cc8967/content>. Acceso: 2024-09.
- [53] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). *Agricultura, comercio y medio ambiente*. 2006. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264015906-sum-es.pdf?expires=1724720027&id=id&accname=guest&checksum=C17E3AECB41E358F69722D4C5EE04D19>. Acceso: 2024-09.
- [54] L. Finster. *La producción lechera: Fuente de gases de efecto invernadero*. 2008. https://bibliotecadigital.fvet.edu.uy/bitstream/handle/123456789/102/JB2008_92-93.pdf?equence=1&isAllowed=y. Acceso: 2024-09.
- [55] L. Astigarraga et al. *Huella de carbono parcial de la lechería uruguaya*. 2022. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/estudios/huella-carbono-parcial-lecheria-uruguaya>. Acceso: 2024-09.
- [56] Food and Agriculture Organization (FAO). *Enteric Methane: Background Information*. 2024, <https://www.fao.org/in-action/enteric-methane/background/about-enteric-methane/es>, Acceso: 2025-01.
- [57] Latin American & Caribbean Consortium of Engineering Institutions (LACCEI). *Impact of Climate on Enteric Methane Emissions*. 2023, https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/papers/Contribution_633_a.pdf, Acceso: 2025-01.
- [58] Universidad Politécnica de Madrid (UPM). *The Effect of High Digestibility Foods on Methane Emissions in Ruminants*. 2018, https://oa.upm.es/54818/1/INVE_MEM_2018_296591.pdf, Acceso: 2024-10.
- [59] H. Dong et al. *Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol*. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4. Capítulo 10. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. 2006. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf. Acceso: 2024-10.
- [60] M. A. Herrero. *Balances de nutrientes en tambos: El valor de los residuos*. 2015. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/instalaciones_tambo/34-Balances_Nutrientes.pdf. Acceso: 2024-09.
- [61] Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA). *Manual para la gestión ambiental de tambos*. 2016. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Manual_para_la_gestion_ambiental_de_tambos_-_WEB.pdf. Acceso: 2024-10.

- [62] Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE). *Tambo Sustentable: Sistema de Gestión de Efluentes en el Tambo*. 2024. <https://www.sustentable.eleche.com.uy/efluentes/>. Acceso: 2024-10.
- [63] Instituto Nacional de la Leche (INALE). *Certificación INALE*. 2024. <https://inale.org/certificacion/>. Acceso: 2024-10.
- [64] R. García-González et al. *Uso de metabolitos secundarios de las plantas para reducir la producción de metano ruminal*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. Vol 17. Pgs. 489–499. 2014. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/download/2061/919>. Acceso: 2024-10.
- [65] E. Molina Alcaide y D.R. Yáñez Ruiz. *Emisiones de metano en los animales rumiantes: influencia de la dieta*. *Archivos de Zootecnia*. Vol. 57. N° 220. 2008. Páginas 361–374. https://oa.upm.es/54818/1/INVE_MEM_2018_296591.pdf. Acceso: 2024-10.
- [66] A.N. Hristov. *Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options*. *Journal of Animal Science*. Vol. 91. N° 11. Pgs. 5045–5069. 2013. <https://academic.oup.com/jas/article/91/11/5045/4718212>. Acceso: 2024-10.
- [67] P.C. Beukes. *Stacking nitrogen mitigation strategies for future pasture-based dairy farms: impacts on leaching and profit*. *Frontiers in Animal Science*. Vol. 5. 2024. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fanim.2024.1277131/full>. Acceso: 2024-12.
- [68] S. De Campeneere et al. *Feeding measures to reduce nitrogen excretion in dairy cattle*. *Archives of Animal Nutrition*. Vol. 63. N° 2. Pgs. 87–103. 2009. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19489452/>. Acceso: 2024-10.
- [69] H. A. Taha. *Operations Research: An Introduction*. 2017. <https://zalamsyah.staff.unja.ac.id/wp-content/uploads/sites/286/2019/11/9-Operations-Research-An-Introduction-10th-Ed.-Hamdy-A-Taha.pdf>. Acceso: 2024-07.
- [70] F. S. Hillier y G. J. Lieberman. *Introduction to Operations Research*. 2010. https://dudasytareas.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/05/hillier_lieberman.pdf. Acceso: 2024-07.
- [71] C. A. Coello. *Programación Multiobjetivo*. 2017. <https://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/cursoemoo/clase2-emoo-2017.pdf>. Acceso: 2024-07.
- [72] H. Karloff. *The Simplex Algorithm*. Acceso: 2024-07. 2009. DOI: [10.1007/978-0-8176-4844-2](https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4844-2).
- [73] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali y C. M. Shetty. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. 2006. <https://zalamsyah.staff.unja.ac.id/wp-content/uploads/sites/286/2019/11/9-Operations-Research-An-Introduction-10th-Ed.-Hamdy-A-Taha.pdf>. Acceso: 2024-07.
- [74] M. Dell’Amico R. Burkard y S. Martello. *Assignment Problems*. Springer, 2009. URL: <https://books.google.com.uy/books?id=dyQR2ElvTTUC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- [75] A. Kelemen, G. E. Marginean y L. Vidu. *Mathematical Modelling and Optimisation Techniques Used in Dairy Farming*. 2015. <https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2015/Art50.pdf>. Acceso: 2024-07.
- [76] E. Jensen. *Input-Output Relationships in Milk Production*. 1942. <https://ageconsearch.umn.edu/record/169188/files/tb815.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [77] Huffman.C y Duncan.C. *The Nutritive Value of Alfalfa Hay. III. Corn as a Supplement to an All-Alfalfa Hay Ration for Milk Production1*. 1949. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030249920664>. Acceso: 2024-11. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(49\)92066-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(49)92066-4).
- [78] D.S. Balaine, R.E. Pearson y R.H. Miller. «Profit Functions in Dairy Cattle and Effect of Measures of Efficiency and Prices1, 2, 3». En: *Journal of Dairy Science* 64.1 (1981). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030281825325>. Acceso: 2025-02, págs. 87-95. ISSN: 0022-0302. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(81\)82532-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(81)82532-5).
- [79] W.R. Congleton y L.W. King. «Profitability of Dairy Cow Herd Life». En: *Journal of Dairy Science* 67.3 (1984). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203028481351X>. Acceso: 2025-02, págs. 661-674. ISSN: 0022-0302. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(84\)81351-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81351-X).

- [80] G. B. Jansen y J. W. Wilton. «Linear Programming in Selection of Livestock». En: *Journal of Dairy Science* 67.4 (1984). Acceso: 2025-02, págs. 897-901. DOI: [10.3168/jds.S0022-0302\(84\)73232-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)73232-5).
- [81] E. Schmisser y M.J. Gamroth. «DXMAS: An Expert System Program Providing Management Advice to Dairy Operators1». En: *Journal of Dairy Science* 76.7 (1993). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030293775384>. Acceso: 2025-02, págs. 2039-2049. ISSN: 0022-0302. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77538-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77538-4).
- [82] A. D. Sova et al. *Accuracy of total mixed rations fed on commercial dairy farms*. 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030213007492?via%3Dihub>. Acceso: 2024-10.
- [83] J. L. Kleen y R. Guatteo. «Precision Livestock Farming: What Does It Contain and What Are the Perspectives?» En: *Animals* 13.5 (2023). <https://doi.org/10.3390/ani13050779>. Acceso: 2025-02, pág. 779. DOI: [10.3390/ani13050779](https://doi.org/10.3390/ani13050779).
- [84] P. Chilibroste et al. *A simulation model “CTR Dairy” to predict the supply of nutrients in dairy cows managed under discontinuous feeding patterns*. 2008. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840107001678>. Acceso 2025-01.
- [85] M. Almhadi y otros. *Implementation of CTR Dairy Model Using the Visual Basic for Application (VBA) Language of Microsoft Excel*. 2018. <http://www.spluy.com/documentos/articulos/alimentacion/almhadietal2018.pdf>. Acceso 2025-01.
- [86] R. Mello. *Modelo dinámico de simulación orientado a facilitar la toma de decisiones a corto plazo en sistemas de producción de leche en Uruguay*. 2011. <http://www.spluy.com/documentos/tesis/RicardoMello.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [87] Gastón Notte. *Asignación de recursos de modelos pastoriles de producción de leche: investigación operativa*. 2014. <http://www.spluy.com/documentos/tesis/GastonNotte.pdf>. Acceso 04-2024.
- [88] Gastón Notte. *Feed resource allocation optimization in dairy systems*. Acceso 06-2024. 2023.
- [89] A. Castagna y otros. *Modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) en cuencas lecheras con objetivos productivos y ambientales*. 2023. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17123/1/Castagna-A.-et.al.-Capitulo-22.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [90] M. Matonte y S. Calcagno. *Optimización heurística de la rotación de cultivos en predios lecheros*. 2021. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29995>. Acceso: 2025-01.
- [91] E. Llanos et al. *OLE! Dairy Model: Description and evaluation of the biophysical components of a whole farm simulation model for pastoral-based dairy systems*. 2024. <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agr/v28nnspe1/2730-5066-agr-28-nspe1-e1202.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [92] Subcommittee on Dairy Cattle Nutrition et al. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 2001. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/9825/nutrient-requirements-of-dairy-cattle-seventh-revised-edition-2001> Acceso: 2024-06.
- [93] National Research Council. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th. Ecuación 1-2, p. 4. Washington, D.C.: National Academies Press, 2001. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/9825/chapter/3>.
- [94] L. Cassell. *Fat-Corrected Milk*. Virginia Cooperative Extension. 1992. <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/6f975a73-33ee-439b-b2b7-8c8fb2a4e7a6/content>. Acceso: 2024-12.
- [95] National Research Council. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th. Página 18. Washington, D.C.: National Academies Press, 2001. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/9825/chapter/3>.
- [96] Poder Ejecutivo de Uruguay. *Decreto 315/994: Reglamento de alimentación y control de establecimientos lecheros*. 1994. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-reglamento/315-1994/16>. Acceso: 2025-01.
- [97] National Research Council. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th. Ecuación 2-16, p. 19. Washington, D.C.: National Academies Press, 2001. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/9825/chapter/3>.

- [98] P. Belotti et al. *Mixed-integer nonlinear optimization*. 2013, https://www.researchgate.net/publication/259432162_Mixed-integer_nonlinear_optimization, Acceso: 2024-10. Acta Numerica, vol. 22, doi: 10.1017/S0962492913000032.
- [99] M.Á. Beltrán-Santoyo et al. *Emisión de metano en los sistemas de producción de leche bovina en el Valle de San Luis Potosí, México*. 2021. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. <https://www.uaslp.mx/>. Acceso: 2024-12.
- [100] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acceso: 2024-12.
- [101] ClimatePartner. *Factores de emisión*. 2023. <https://www.climatepartner.com/es/conocimientos/glosario/factores-de-emision>. Acceso: 2025-01.
- [102] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Capítulo 10, Tabla 10.12. 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acceso: 2024-11.
- [103] Yoana Dini et al. «Methane Emission and Milk Production of Dairy Cows Grazing Pastures Rich in Legumes or Rich in Grasses in Uruguay». En: *Animals* 2.2 (2012), págs. 288-300. DOI: 10.3390/ani2020288. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/2/2/288>.
- [104] Ministerio de Ambiente. *Huella ambiental de la ganadería uruguaya: Resultados de impacto ambiental y oportunidades de mejora. Informe Técnico N° 10*. 2022. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/reporte-final-huella-ganaderia-uruguay>. Acceso 05-2025.
- [105] Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente Ministerio de Vivienda. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Serie 1990–2014*. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/inventarios-nacionales-gases-efecto-invernadero-ingei>. Acceso 05-2025. 2017.
- [106] M.A. Herrero et al. *Eficiencia en el uso del nitrógeno en vacas lecheras*. Facultad de Ciencias Veterinarias - UBA. Vol. 8, N° 1. 2020. <https://www.fvet.uba.ar/fcvanterior/publicaciones/archivos/Volumen8N1/herrero28.pdf>. Acceso: 2025-01.
- [107] J. Elizondo Salazar. *El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche*. 2006. <https://www.redalyc.org/pdf/437/43717111.pdf>. Acceso: 2024-12.
- [108] GNU Project. *GNU Linear Programming Kit (GLPK)*. <https://www.gnu.org/software/glpk/>. Acceso: 2024-07.
- [109] NEOS Optimization Group. *NEOS Server for Optimization*. <https://neos-server.org/neos/>. Acceso: 2024-07.
- [110] Wikipedia contributors. *NEOS Server*. https://es.wikipedia.org/wiki/NEOS_Server. Acceso: 2024-07. 2024.
- [111] NEOS Server. *MINLP Solver for Mixed Integer Nonlinear Programming*. <https://neos-server.org/neos/solvers/minco:MINLP/AMPL.html>. Acceso: 2024-07.
- [112] J. W. West. *Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle*. 2003. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203020373803X>. Acceso: 2024-11. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X).
- [113] F. Formoso. *Alternativas tecnológicas para la mejora de la productividad de pasturas en sistemas de invernada bovina*. 2009. https://www.inia.org.uy/estaciones/la_estanzuela/actividades/documentos/publicaciongiprocar.pdf. Acceso: 2024-11. 2009.
- [114] WeatherSpark. *Clima en Uruguay: Estadísticas climáticas por mes*. 2025. <https://es.weatherspark.com/countries/UY>. Acceso: 2025-02.
- [115] Ministerio de Ambiente de Uruguay. *Producto 2: Estadísticas Climáticas de Uruguay*. 2025. <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Producto-2.pdf>. Acceso: 2025-02.

Anexo A: Validación

En esta sección se presentan los valores de los parámetros para cada caso de validación expuesto en la sección de Validación del modelo [Sección 3.5](#). También se pueden observar las salidas correspondientes para cada caso.

Para la validación del modelo, se utilizó GLPK. El tiempo de procesamiento para todos los casos de validación fue de 0,1 segundos, lo que indica una ejecución eficiente dada la cantidad de restricciones presentes en el modelo. Sin embargo, se tuvo en cuenta que el aumento de la complejidad de las restricciones podría incrementar los tiempos de resolución, lo que llevó a considerar mejoras y optimizaciones en futuras iteraciones del modelo.

1. Validación de Asignación de Lotes a Zonas (Asignación)

En este caso, se verifica que el lote (o los lotes) visite las zonas de alimentación el número adecuado de veces por etapa, calculado como el producto entre la cantidad de ordeños y la cantidad de días de cada etapa.

Un lote:

A continuación, se presentan los datos y resultados de la validación de los modelos con un único lote. En la [Tabla 5.1](#) se muestran los valores de los parámetros de entrada al modelo, mientras que en la [Tabla 5.2](#) se detallan los resultados esperados para cada escenario. Los resultados obtenidos para cada escenario del modelo económico se encuentran en las tablas, [Tabla 5.3](#), [Tabla 5.5](#) y [Tabla 5.7](#), y las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo se presentan en las tablas [Tabla 5.4](#), [Tabla 5.6](#) y [Tabla 5.8](#).

Conjuntos significativos:

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;
- set Lotes := l1;

Parámetros definidos en cada escenario:

Escenario	CantOrdenes	CantDias
1	2	1
2	2	10
3	2	100

Tabla 5.1: Parámetros de entrada

Resultado esperado:

Escenario	Resultado Esperado
1	2
2	20
3	200

Tabla 5.2: Resultados esperados

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	2	2
e1	l1	z1	0	
e1	l1	z2	0	

Tabla 5.3: Modelo económico Escenario 1

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	0	2
e1	l1	z1	0	
e1	l1	z2	2	

Tabla 5.4: Modelo productivo Escenario 1

En este escenario, con un único lote, el modelo económico asigna la zona 0 para ambos ordeños del único día que conforma la etapa, mientras que el modelo productivo opta por la zona 2.

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	6	20
e1	l1	z1	1	
e1	l1	z2	13	

Tabla 5.5: Modelo económico Escenario 2

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	2	20
e1	l1	z1	17	
e1	l1	z2	1	

Tabla 5.6: Modelo productivo Escenario 2

En este escenario, la etapa 1 tiene una duración de 10 días, por lo que el valor esperado para la suma de la variable $aLZ_{e,l,z}$ es 20, dado que hay 2 ordeños por día durante 10 días. Debido a la disponibilidad limitada de alimento en todas las zonas en ambos modelos, la asignación se distribuye entre las 3 zonas disponibles.

El modelo económico asigna el lote 6 veces a la zona 0, una vez a la zona 1 y 13 veces a la zona 2, sumando un total de 20, como se esperaba. Por otro lado, el modelo productivo asigna el lote 2 veces a la zona 0, 17 veces a la zona 1 y una vez a la zona 2, también alcanzando el total esperado de 20.

- Escenario 3:

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	117	200
e1	l1	z1	5	
e1	l1	z2	78	

Tabla 5.7: Modelo económico Escenario 3

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	59	200
e1	l1	z1	24	
e1	l1	z2	117	

Tabla 5.8: Modelo productivo Escenario 3

En esta validación, la etapa tiene una duración de 100 días. Dado que se consideran dos ordeños por día, el valor esperado para la suma de la variable $aLZ_{e,l,z}$ en todas las zonas, al trabajar con un único lote y una única etapa, es 200.

Como se muestra en las tablas [Tabla 5.7](#) y [Tabla 5.8](#), el modelo económico asigna el lote 117 veces a la zona 0, 5 veces a la zona 1 y 78 veces a la zona 2, sumando el esperado total de 200 asignaciones. Por otro lado, el modelo productivo distribuye el lote 59 veces en la zona 0, 24 veces en la zona 1 y 117 veces en la zona 2, también alcanzando el total esperado de 200.

Dos lotes:

Se presentan a continuación los datos y resultados de la validación de ambos modelos con dos lotes. Los parámetros de entrada al modelo y los resultados esperados en cada escenario son los mismos que en la validación con un único lote. Los resultados de cada escenario del modelo económico se encuentran en las tablas [Tabla 5.9](#), [Tabla 5.11](#) y [Tabla 5.13](#), mientras que las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo se presentan en las [Tabla 5.10](#), [Tabla 5.12](#) y [Tabla 5.14](#).

Conjuntos significativos:

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;

- set Lotes := l1 l2;
- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	2	2
e1	l1	z1	0	
e1	l1	z2	0	
e1	l2	z0	2	2
e1	l2	z1	0	
e1	l2	z2	0	

Tabla 5.9: Modelo económico Escenario 1

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	0	2
e1	l1	z1	0	
e1	l1	z2	2	
e1	l2	z0	0	2
e1	l2	z1	0	
e1	l2	z2	2	

Tabla 5.10: Modelo productivo Escenario 1

Al igual que en el primer escenario de validación con un único lote, la etapa *e1* consta de un solo día, por lo que se esperan dos asignaciones por lote. Dado que la disponibilidad de alimento es suficiente, el modelo económico asigna ambos lotes dos veces a la zona 0. El Modelo productivo sigue este mismo patrón, pero opta por la zona 2.

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	6	20
e1	l1	z1	1	
e1	l1	z2	13	
e1	l2	z0	11	20
e1	l2	z1	9	
e1	l2	z2	0	

Tabla 5.11: Modelo económico Escenario 2

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	2	20
e1	l1	z1	17	
e1	l1	z2	1	
e1	l2	z0	5	20
e1	l2	z1	4	
e1	l2	z2	11	

Tabla 5.12: Modelo productivo Escenario 2

La etapa *e1* fue definida con una duración de 10 días, y ambos modelos distribuyen los lotes de manera diferente entre las zonas. El modelo económico asigna el lote 1 6 veces a la zona 0 y el lote 2 11 veces a la misma zona. En la zona 1, el lote 1 es asignado una vez, mientras que el lote 2 lo es 9 veces. En cuanto a la zona 2, el lote 2 no la visita, mientras que el lote 1 lo hace en 9 ocasiones. Por otro lado, el Modelo productivo distribuye el lote 1 2 veces en la zona 0, 17 veces en la zona 1 y una vez en la zona 2. El lote 2, en cambio, es asignado 5 veces a la zona 0, 4 veces a la zona 1 y 11 veces a la zona 2. En ambos modelos, la suma total de asignaciones por lote alcanza las 20 asignaciones esperadas para la etapa.

- Escenario 3:

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	117	200
e1	l1	z1	5	
e1	l1	z2	78	
e1	l2	z0	0	200
e1	l2	z1	200	
e1	l2	z2	0	

Tabla 5.13: Modelo económico Escenario 3

Etapa	Lote	Zona	alZ	Suma en Zonas
e1	l1	z0	59	200
e1	l1	z1	24	
e1	l1	z2	117	
e1	l2	z0	2	200
e1	l2	z1	198	
e1	l2	z2	0	

Tabla 5.14: Modelo productivo Escenario 3

En esta validación, la etapa tiene una duración de 100 días, lo que implica un total de 200 asignaciones, considerando dos ordeños por día. En el modelo económico, el lote 1 visita la zona 0 en 117 ocasiones, la zona 1 en 5 ocasiones y la zona 2 en 78 ocasiones. Por su parte, el lote 2 es asignado exclusivamente a la zona 1, con un total de 200 visitas. En el Modelo productivo, el lote 1 se distribuye con 59 visitas a la zona 0, 24 a la zona 1 y 117 a la zona 2. En cuanto al lote 2, realiza 198 visitas a la zona 1, mientras que las 2 asignaciones restantes se dirigen a la zona 0.

2. Validación del Número Total de Vacas por Tipo (totalVacas)

En esta validación, se verifica que todas las vacas de tipo t sean asignadas a algún lote en cada etapa.

Un lote:

En la [Tabla 5.15](#) se presentan las entradas; en la [Tabla 5.16](#) la comparación entre los resultados esperados y los resultados obtenidos.

Conjuntos significativos:

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;
- set Lotes := l1;
- set TiposVacas:= t1 t2;

Parámetros definidos en cada Escenario:

El mínimo por lote en todos los escenarios se definió acorde a la cantidad total de animales.

Escenario	CantAnimales t1	CantAnimales t2
1	1	1
2	10	10
3	50	150

Tabla 5.15: Parámetros de entrada

Escenario	Cant por lote esperado	Cant por lote obtenido
1	2	2
2	20	20
3	200	200

Tabla 5.16: Resultados esperados vs Resultados obtenidos

En esta validación, al trabajar con un único lote, la cantidad total de vacas asignadas debe coincidir con la suma de los animales de tipo 1 y tipo 2, garantizando que todas las vacas estén correctamente distribuidas. Los resultados obtenidos en ambos modelos para los tres escenarios coinciden y se presentan en la [Tabla 5.16](#). En el primer escenario, donde hay una vaca de cada tipo, el lote 1 contiene exactamente 2 vacas, cumpliendo con lo esperado. En el segundo escenario, con 10 vacas de cada tipo, el lote 1 suma un total de 20 vacas. Finalmente, en el tercer escenario, el lote 1 está compuesto por 200 vacas, lo que concuerda con los valores definidos para este caso: 50 vacas de tipo 1 y 150 de tipo 2.

Dos lotes:

Los datos de entrada son los mismos que para el caso con un único lote. En las tablas [Tabla 5.17](#), [Tabla 5.19](#) y [Tabla 5.21](#) se detallan los resultados de cada escenario del modelo económico; y en las tablas [Tabla 5.18](#), [Tabla 5.20](#) y [Tabla 5.22](#) las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo.

Conjuntos significativos:

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;
- set Lotes := l1 l2;
- set TiposVacas:= t1 t2;
- Escenario 1:

Etapa	Lote	Tipo	vL	Suma en lote
e1	l1	t1	1	1
e1	l2	t1	0	
e1	l1	t2	0	1
e1	l2	t2	1	

Tabla 5.17: Modelo económico Escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL	Suma en lote
e1	l1	t1	0	1
e1	l2	t1	1	
e1	l1	t2	1	1
e1	l2	t2	0	

Tabla 5.18: Modelo productivo Escenario 1

En este caso, hay una vaca de cada tipo, y cada uno de los dos lotes está compuesto por una vaca, asegurando que la asignación se cumple correctamente.

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Tipo	vL	Suma en lote
e1	l1	t1	10	10
e1	l2	t1	0	
e1	l1	t2	9	10
e1	l2	t2	1	

Tabla 5.19: Modelo económico Escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL	Suma en lote
e1	l1	t1	1	10
e1	l2	t1	9	
e1	l1	t2	1	10
e1	l2	t2	9	

Tabla 5.20: Modelo productivo Escenario 2

En la segunda validación, con un total de 20 vacas (10 de cada tipo), el modelo económico asigna al lote 1 todas las 10 vacas de tipo 1 y 9 vacas de tipo 2. La vaca restante de tipo 2 es asignada al lote 2, cumpliendo con la asignación esperada.

- Escenario 3:

Etapa	Lote	Tipo	vL	Suma en lote
e1	l1	t1	0	50
e1	l2	t1	50	
e1	l1	t2	148	150
e1	l2	t2	2	

Tabla 5.21: Modelo económico Escenario 3

Etapa	Lote	Tipo	vL	Suma en lote
e1	l1	t1	50	50
e1	l2	t1	0	
e1	l1	t2	149	150
e1	l2	t2	1	

Tabla 5.22: Modelo productivo Escenario 3

En este tercer escenario, el modelo económico asigna las 50 vacas de tipo 1 al lote 2. De las 150 vacas de tipo 2, 148 son asignadas al lote 1 y las 2 restantes al lote 2, sumando así las 200 vacas esperadas y respetando la cantidad definida para cada tipo. El Modelo productivo también verifica la asignación esperada, distribuyendo las 50 vacas de tipo 1 en el lote 1, junto con 149 vacas de tipo 2, mientras que la vaca restante de tipo 2 es asignada al lote 2.

3. Validación de la Oferta Mínima de Alimento por Vaca (oferta1)

En esta validación, se busca asegurar que el consumo real de las vacas de cada tipo, en cada zona y en cada etapa, no supere su consumo potencial.

Un lote:

Los parámetros de entrada se reflejan en la [Tabla 5.23](#). En las tablas [Tabla 5.24](#), [Tabla 5.25](#), [Tabla 5.26](#), [Tabla 5.27](#), [Tabla 5.28](#), [Tabla 5.29](#), [Tabla 5.30](#), [Tabla 5.31](#) y [Tabla 5.32](#) los resultados de cada escenario del modelo económico; y en las tablas [Tabla 5.33](#) a [Tabla 5.41](#) las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo.

Ambos modelos para todos los escenarios se ejecutaron para una única etapa de un solo día.

Conjuntos significativos:

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;

- set Lotes := l1;
- set TiposVacas:= t1 t2;

Escenario	Alimento Disponible				Cantidad de vacas		Consumo Potencial		
	z0	z1	z2	Total	t1	t2	t1 (por vaca)	t2 (por vaca)	Total
1	110	110	110	330	10	10	15	20	350
2	350	350	350	1050	10	10	15	20	350
3	150	150	150	450	20	20	15	20	700

Tabla 5.23: Parámetros de entrada

Modelo económico:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	1

Tabla 5.24: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.25: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL * aLZ * ConsPot / 2$	cR
e1	z0	l1	t1	75	47
e1	z0	l1	t2	100	63
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	75	47
e1	z2	l1	t2	100	63

Tabla 5.26: Resultados cR y validación escenario 1

En este escenario, hay 10 vacas de cada tipo, todas asignadas a un único lote que visita una vez la zona 0 y una vez la zona 2. En ambas zonas, el consumo real de ambos tipos de vacas es inferior al límite permitido, que corresponde al consumo potencial por ordeño. Este límite se calcula como la mitad del consumo potencial diario por vaca (según su tipo), multiplicado por la cantidad de vacas de ese tipo y el número de asignaciones a esa zona. Para el tipo 1, el límite es de 75 kg MS en ambas zonas, mientras que el consumo real es de 47 kg MS. En el caso del tipo 2, el límite es de 100 kg MS, con un consumo real de 63 kg MS en cada zona, garantizando que no se supere el consumo potencial establecido.

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	2
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	0

Tabla 5.27: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.28: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	150	150
e1	z0	l1	t2	200	200
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	0	0
e1	z2	l1	t2	0	0

Tabla 5.29: Resultados cR y validación escenario 1

En este escenario del modelo económico, las 20 vacas (10 de cada tipo) están asignadas al lote 1, que visita la zona 0 en ambos ordeñes del único día que conforma la etapa 1. El consumo real en la zona 0 para ambos tipos de vacas es igual al consumo potencial por ordeño, alcanzando los 150 kg MS para el tipo 1 y 200 kg MS para el tipo 2, asegurando así el cumplimiento de los valores esperados.

- Escenario 3:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	1

Tabla 5.30: Resultados aLZ escenario 3

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	20
e1	l1	t2	20

Tabla 5.31: Resultados vL escenario 3

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	150	64.2857
e1	z0	l1	t2	200	85.7143
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	150	64.2857
e1	z2	l1	t2	200	85.7143

Tabla 5.32: Resultados cR y validación escenario 3

Cuando se duplica la cantidad de vacas de cada tipo, manteniendo el consumo potencial por tipo pero reduciendo la disponibilidad de alimento por zona, el modelo decide asignar las vacas una vez a la zona 0 y una vez a la zona 2. Los valores esperados por ordeño en cada zona se mantienen iguales a los del escenario dos, ya que la cantidad de asignaciones a la zona 0 se reduce a la mitad (de dos a una), mientras que la cantidad de vacas se duplica. En este caso, la disponibilidad de alimento en ambas asignaciones es significativamente menor que el consumo potencial, por lo que, incluso si las vacas consumen todo el alimento disponible en cada zona, este no supera el consumo potencial. Esto se evidencia en la [Tabla 5.32](#).

Modelo productivo:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	1

Tabla 5.33: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t1	10

Tabla 5.34: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	0	0
e1	z1	l1	t1	75	47.1429
e1	z1	l1	t2	100	62.8571
e1	z2	l1	t1	75	55.7143
e1	z2	l1	t2	100	54.2857

Tabla 5.35: Resultados cR y validación escenario 1

Para esta primera validación con el Modelo productivo, con un único lote, las 10 vacas de cada tipo están asignadas al mismo, y este visita una vez la zona 1 y una vez la zona 2. En la [Tabla 5.35](#) se puede observar que, en ningún caso, el consumo real supera el consumo potencial por ordeño, que es de 75 kg MS para el tipo 1 y 100 kg MS para el tipo 2, asegurando así el cumplimiento de los límites establecidos.

■ Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	2

Tabla 5.36: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.37: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	0	0
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	150	150
e1	z2	l1	t2	200	200

Tabla 5.38: Resultados cR y validación escenario 2

En este escenario, se mantienen las mismas condiciones que en el escenario 2 del modelo económico, pero, en este caso, el lote está asignado a la zona 2 en ambos ordeños de la etapa. Nuevamente, el consumo real coincide con el consumo potencial para cada tipo en esta zona, garantizando así el cumplimiento de los valores esperados.

■ Escenario 3:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	1

Tabla 5.39: Resultados aLZ escenario 3

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	20
e1	l1	t2	20

Tabla 5.40: Resultados vL escenario 3

En este último escenario de validación con un único lote, todas las vacas son asignadas al lote 1, el cual visita una vez la zona 1 y una vez la zona 2. Dado que la disponibilidad de alimento es sumamente limitada, el consumo real se mantiene por debajo del consumo potencial, asegurando que no se superen los valores establecidos.

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	0	0
e1	z1	l1	t1	150	64.2857
e1	z1	l1	t2	200	85.7143
e1	z2	l1	t1	150	70
e1	z2	l1	t2	200	80

Tabla 5.41: Resultados cR y validación escenario 3

Dos lotes:

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las validaciones con más de un lote, los parámetros de entrada son los mismos que los que se utilizaron en las validaciones con un lote. En las tablas [Tabla 5.42](#), [Tabla 5.43](#), [Tabla 5.44](#), [Tabla 5.45](#), [Tabla 5.46](#), [Tabla 5.47](#), [Tabla 5.48](#), [Tabla 5.49](#) y [Tabla 5.50](#) se presentan los resultados de cada escenario del modelo económico; y en las tablas [Tabla 5.51](#), [Tabla 5.52](#), [Tabla 5.53](#), [Tabla 5.54](#), [Tabla 5.55](#), [Tabla 5.56](#), [Tabla 5.57](#), [Tabla 5.58](#) y [Tabla 5.59](#) las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo.

Ambos modelos para todos los escenarios se ejecutaron para una única etapa de un solo día.

Conjuntos significativos:

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;
- set Lotes := l1 l2;
- set TiposVacas:= t1 t2;

Modelo económico:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	0
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	2

Tabla 5.42: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	2
e1	l1	t2	10
e1	l2	t1	8
e1	l2	t2	0

Tabla 5.43: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	15	14.3478
e1	z0	l1	t2	100	95.6522
e1	z0	l2	t1	0	0
e1	z0	l2	t2	0	0
e1	z1	l1	t1	15	15
e1	z1	l1	t2	100	95
e1	z1	l2	t1	0	0
e1	z1	l2	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	0	0
e1	z2	l1	t2	0	0
e1	z2	l2	t1	120	110
e1	z2	l2	t2	0	0

Tabla 5.44: Resultados cR y validación escenario 1

En estas validaciones, al trabajar con dos lotes, el modelo cuenta con mayor flexibilidad para optimizar el uso del alimento disponible, ya que puede ajustar el tamaño de cada lote y asignarlos a distintas zonas.

En este primer escenario, de las 10 vacas de tipo 1, 2 son asignadas al lote 1 junto con las 10 vacas de tipo 2, mientras que las 8 restantes se destinan al lote 2. Las asignaciones de cada lote se presentan en la [Tabla 5.42](#). El lote 1 visita una vez la zona 0 y una vez la zona 1, mientras que el lote 2 es asignado dos veces a la zona 2. El lote 2 está compuesto únicamente por vacas de tipo 2, las cuales consumen 110 kg MS, respetando el límite máximo de consumo potencial, que es de 120 kg MS. Por otro lado, en el lote 1, las vacas de tipo 1 consumen 14.3 kg MS en la zona 1 y 15 kg MS en la zona 2, con un umbral máximo de 15 kg MS en ambas zonas. Para las vacas de tipo 2 en este mismo lote, el umbral es de 100 kg MS, de los cuales se consumen 95 kg MS en cada zona, garantizando así el cumplimiento de la restricción de consumo.

■ Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	2
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	1
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	1

Tabla 5.45: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	5
e1	l1	t2	0
e1	l2	t1	5
e1	l2	t2	10

Tabla 5.46: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL \cdot aLZ \cdot \text{ConsPot} / 2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	0	0
e1	z0	l2	t1	37.5	37.5
e1	z0	l2	t2	100	100
e1	z1	l1	t1	75	75
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z1	l2	t1	0	0
e1	z1	l2	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	0	0
e1	z2	l1	t2	0	0
e1	z2	l2	t1	37.5	37.5
e1	z2	l2	t2	100	100

Tabla 5.47: Resultados cR y validación escenario 2

En este segundo escenario, las 10 vacas de tipo 1 se dividen equitativamente entre los dos lotes, mientras que las 10 vacas de tipo 2 son asignadas en su totalidad al lote 2. El lote 2 visita una vez la zona 0 y una vez la zona 2, mientras que el lote 1 es asignado dos veces a la zona 1. En esta última, las vacas de tipo 1 (las únicas presentes en este lote) consumen su consumo potencial de 75 kg MS. Las 5 vacas restantes de tipo 1, ubicadas en el lote 2, consumen 37.5 kg MS tanto en la zona 0 como en la zona 2, lo que coincide nuevamente con su consumo potencial. Para las vacas de tipo 2 en el lote 2, el consumo real también es igual al consumo potencial, alcanzando los 100 kg MS en ambas zonas.

■ Escenario 3:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	2
e1	l2	z0	1
e1	l2	z1	1
e1	l2	z2	0

Tabla 5.48: Resultados aLZ escenario 3

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	20
e1	l1	t2	5
e1	l2	t1	0
e1	l2	t2	15

Tabla 5.49: Resultados vL escenario 3

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL \cdot aLZ \cdot \text{ConsPot} / 2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	0	0
e1	z0	l2	t1	0	0
e1	z0	l2	t2	150	150
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z1	l2	t1	0	0
e1	z1	l2	t2	150	150
e1	z2	l1	t1	300	50
e1	z2	l1	t2	100	100
e1	z2	l2	t1	0	0
e1	z2	l2	t2	0	0

Tabla 5.50: Resultados cR y validación escenario 3

En la validación final del modelo económico para esta restricción, las 20 vacas de tipo 1 se asignan al lote 1 junto con 5 vacas de tipo 2, mientras que las 15 vacas restantes de tipo 2 conforman el lote 2, como se detalla en la [Tabla 5.49](#). Con esta distribución, el lote 1 se asigna dos veces a la zona 2, mientras que el lote 2 visita una vez cada una de las zonas restantes. En esta configuración, las vacas de tipo 1 consumen solo 50 kg MS de los 300 kg MS permitidos en la zona 2 debido a la escasa disponibilidad de alimento. En contraste, las vacas de tipo 2, priorizadas por este modelo, alcanzan su consumo potencial en todas las zonas y asignaciones, como se observa en la [Tabla 5.50](#).

Modelo productivo:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	0
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	2

Tabla 5.51: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	2
e1	l1	t2	10
e1	l2	t1	8
e1	l2	t1	0

Tabla 5.52: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	15	15
e1	z0	l1	t2	100	95
e1	z0	l2	t1	0	0
e1	z0	l2	t2	0	0
e1	z1	l1	t1	15	14.3478
e1	z1	l1	t2	100	95.6522
e1	z1	1	t1	0	0
e1	z1	l2	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	0	0
e1	z2	l1	t2	0	0
e1	z2	l2	t1	120	110
e1	z2	l2	t2	0	0

Tabla 5.53: Resultados cR y validación escenario 1

El modelo productivo, en este primer escenario con 10 vacas de cada tipo y dos lotes, distribuye los animales de la misma manera que el modelo económico en el mismo escenario, pero varía la asignación de los lotes a las zonas. El lote 1, compuesto por 2 vacas de tipo 1 y 10 vacas de tipo 2, se asigna una vez a la zona 0 y una vez a la zona 1. En tanto, el lote 2, conformado por las 8 vacas restantes de tipo 1, es enviado a la zona 2 en ambas oportunidades, como se muestra en las tablas [Tabla 5.51](#) y [Tabla 5.52](#). En la [Tabla 5.53](#) se detallan los consumos en cada asignación y los límites calculados. Las vacas de tipo 1 en el lote 1 alcanzan su consumo potencial de 15 kg MS en la zona 0, mientras que en la zona 1 consumen 14.3 kg MS, manteniéndose dentro del umbral permitido. Por otro lado, las vacas de tipo 1 en el lote 2 consumen 110 kg MS en la zona 2, sin superar el límite de 120 kg MS. En cuanto a las vacas de tipo 2, su consumo potencial en las zonas 0 y 1 es de 100 kg MS, pero su consumo real en ambas es de 95 kg MS, sin exceder el límite establecido.

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	2
e1	l2	z0	1
e1	l2	z1	1
e1	l2	z2	0

Tabla 5.54: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	0
e1	l2	t1	0
e1	l2	t1	10

Tabla 5.55: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL*aLZ*ConsPot/2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	0	0
e1	z0	l2	t1	0	0
e1	z0	l2	t2	100	100
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	0	0
e1	z1	l2	t1	0	0
e1	z1	l2	t2	100	100
e1	z2	l1	t1	150	150
e1	z2	l1	t2	0	0
e1	z2	l2	t1	0	0
e1	z2	l2	t2	0	0

Tabla 5.56: Resultados cR y validación escenario 2

En esta validación, el alimento disponible coincide exactamente con el consumo potencial total en cada una de las tres zonas. El lote 1 está compuesto exclusivamente por vacas de tipo 1, mientras que el lote 2 agrupa únicamente vacas de tipo 2. En cuanto a la asignación, el lote 2 visita una vez las zonas 0 y 1, mientras que el lote 1 es asignado dos veces a la zona restante. En cada visita del lote 2, el consumo real alcanza el consumo potencial de 100 kg MS. De manera similar, el lote 1 consume el máximo permitido de 150 kg MS en sus dos asignaciones a la zona 2, asegurando así el cumplimiento de las restricciones establecidas.

- Escenario 3:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	0
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	2

Tabla 5.57: Resultados aLZ escenario 3

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	0
e1	l1	t2	15
e1	l2	t1	20
e1	l2	t2	5

Tabla 5.58: Resultados vL escenario 3

Etapa	Zona	Lote	Tipo	$vL \cdot aLZ \cdot \text{ConsPot} / 2$	cR
e1	z0	l1	t1	0	0
e1	z0	l1	t2	150	150
e1	z0	l2	t1	0	0
e1	z0	l2	t2	0	0
e1	z1	l1	t1	0	0
e1	z1	l1	t2	150	150
e1	z1	l2	t1	0	0
e1	z1	l2	t2	0	0
e1	z2	l1	t1	0	0
e1	z2	l1	t2	0	0
e1	z2	l2	t1	300	51.1942
e1	z2	l2	t2	100	98.8058

Tabla 5.59: Resultados cR y validación escenario 3

En este escenario final, donde el alimento es limitado en todas las zonas, el modelo da prioridad al consumo de las vacas de tipo 2. Estas se distribuyen en 15 en el lote 1 y 5 en el lote 2, junto con las 20 vacas de tipo 1. Las vacas de tipo 1 en el lote 1, asignadas una vez a la zona 0 y una vez a la zona 1, consumen en ambas ocasiones su consumo potencial de 150 kg MS, como se muestra en la [Tabla 5.59](#). Las 5 vacas restantes de este tipo, ubicadas en el lote 2, consumen 98.8 kg MS de los 100 kg MS permitidos, debido a la restricción de alimento disponible. Por otro lado, las vacas de tipo 2, aunque podrían consumir hasta 300 kg MS según su consumo potencial, solo alcanzan un consumo real de 51 kg MS, reflejando la escasez de alimento en este escenario.

4. Validación de la Cantidad Máxima de Alimento Disponible por Zona (oferta2)

En esta validación, se busca asegurar que el consumo real de las vacas de cada tipo, en cada zona y en cada etapa, no supere la cantidad de alimento disponible.

Un lote:

Los parámetros de entrada se reflejan en la [Tabla 5.60](#). En las tablas [Tabla 5.61](#) a [Tabla 5.66](#) se exhiben los resultados de cada escenario del modelo económico con un lote. Asimismo, en las tablas [Tabla 5.67](#) a [Tabla 5.72](#), se presentan las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo con un lote.

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;
- set Lotes := l1 ;
- set TiposVacas:= t1 t2;

Escenario	Alimento Disponible				Cantidad de vacas	
	z0	z1	z2	Total	t1	t2
1	120	110	120	350	10	10
2	100	120	120	340	10	10

Tabla 5.60: Parámetros de entrada

Modelo económico:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	1

Tabla 5.61: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.62: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	51.4286	120	120
e1	z0	l1	t2	68.5714		
e1	z1	l1	t1	0	0	110
e1	z1	l1	t2	0		
e1	z2	l1	t1	51.4286	120	120
e1	z2	l1	t2	68.5714		

Tabla 5.63: Resultados cR y validación escenario 1

En esta y las siguientes validaciones con un único lote, todas las vacas son asignadas a él, ya que, como se comprobó en validaciones previas, la restricción de asignación siempre se respeta. El consumo real de los animales puede estar limitado por su consumo potencial (según el tipo de vaca) o por la disponibilidad de alimento (según la zona). En todos los casos de esta validación, la relación entre el consumo potencial de cada tipo y la cantidad de vacas garantiza que el consumo potencial supere la disponibilidad de alimento, permitiendo así validar esta restricción.

En este escenario, el lote se asigna una vez a la zona 0 y otra a la zona 1 (Tabla 5.61). Ambas zonas cuentan con 120 kg MS disponibles, los cuales son completamente consumidos sin excederse, ya que el consumo real en cada caso es de 120 kg MS (Tabla 5.63).

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	1

Tabla 5.64: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.65: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	42.8571	100	100
e1	z0	l1	t2	57.1429		
e1	z1	l1	t1	0	0	120
e1	z1	l1	t2	0		
e1	z2	l1	t1	51.4286	120	120
e1	z2	l1	t2	68.5714		

Tabla 5.66: Resultados cR y validación escenario 2

Cuando la disponibilidad de alimento se reduce aún más, la asignación del lote se mantiene: una vez a la zona 0 y otra a la zona 2. Sin embargo, en la primera, el consumo se ajusta a 100 kg MS, limitado por la disponibilidad, mientras que en la segunda permanece en 120 kg MS, ya que la cantidad disponible no varía respecto al escenario anterior.

Modelo productivo:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	1

Tabla 5.67: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.68: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	51.4286	120	120
e1	z0	l1	t2	68.5714		
e1	z1	l1	t1	0	0	110
e1	z1	l1	t2	0		
e1	z2	l1	t1	51.4286	120	120
e1	z2	l1	t2	68.5714		

Tabla 5.69: Resultados cR y validación escenario 1

El modelo productivo conserva la asignación definida por el modelo económico, priorizando las dos zonas con mayor disponibilidad y asegurando que todo el alimento disponible en ambas sea consumido sin excederse, como se muestra en las tablas [Tabla 5.67](#) y [Tabla 5.69](#).

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	1

Tabla 5.70: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	10

Tabla 5.71: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	0	0	100
e1	z0	l1	t2	0		
e1	z1	l1	t1	51.4286	120	120
e1	z1	l1	t2	68.5714		
e1	z2	l1	t1	45.7143	120	120
e1	z2	l1	t2	74.2857		

Tabla 5.72: Resultados cR y validación escenario 2

Como se puede observar en la [Tabla 5.69](#), en este escenario el lote es asignado una vez a la zona 1 y una vez a la zona 2, al igual que el escenario anterior, elige las zonas con mayor disponibilidad, la diferencia es que en el caso anterior estas era n la zona 0 y la zona 2 y en el presente son las zonas 1 y 2. En ambas, como se refleja en la [Tabla 5.72](#) el consumo es de 120 kg MS igualando la disponibilidad.

2 lotes

En este caso, se emplean los mismos parámetros de entrada que en las validaciones realizadas con un único lote. Los resultados de cada escenario del modelo económico se presentan en las tablas [Tabla 5.73](#) a [Tabla 5.78](#), mientras que las salidas correspondientes a cada escenario del modelo productivo se encuentran en las tablas [Tabla 5.79](#) a [Tabla 5.84](#).

- set Zonas := z0 z1 z2;
- set Etapas:= e1;
- set Lotes := l1 l2;
- set TiposVacas:= t1 t2;

Modelo económico:

- Escenario 1:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	2
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	1
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	1

Tabla 5.73: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	2
e1	l1	t2	4
e1	l2	t1	8
e1	l2	t2	6

Tabla 5.74: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	0	120	120
e1	z0	l1	t2	0		
e1	z0	l2	t1	60		
e1	z0	l2	t2	60		
e1	z1	l1	t1	30	110	110
e1	z1	l1	t2	80		
e1	z1	l2	t1	0		
e1	z1	l2	t2	0		
e1	z2	l1	t1	0	120	120
e1	z2	l1	t2	0		
e1	z2	l2	t1	60		
e1	z2	l2	t2	60		

Tabla 5.75: Resultados cR y validación escenario 1

La existencia de más de un lote en el sistema aumenta la flexibilidad del modelo, permitiendo distribuir el consumo en distintas zonas y acercar el consumo total al potencial. En este caso, el primer lote está compuesto por 2 vacas de tipo 1 y 4 de tipo 2, mientras que el segundo lote incluye 8 vacas de tipo 1 y 6 de tipo 2. La asignación de los lotes a las zonas de alimentación varía en cada ordeño: el primer lote es enviado en ambas oportunidades a la zona 1, mientras que el segundo lote se asigna una vez a la zona 0 y otra a la zona 2. Cuando se analiza el consumo real en cada zona, se observa que, dado que las tres zonas son visitadas y el alimento disponible es menor al consumo potencial, la cantidad total consumida en cada zona, considerando la suma del consumo de cada tipo de vaca en ambos lotes, coincide con la disponibilidad de alimento en esa zona.

■ Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	1
e1	l2	z0	2
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	0

Tabla 5.76: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	5
e1	l2	t1	0
e1	l2	t2	5

Tabla 5.77: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	0	100	100
e1	z0	l1	t2	0		
e1	z0	l2	t1	0		
e1	z0	l2	t2	100		
e1	z1	l1	t1	75	120	120
e1	z1	l1	t2	45		
e1	z1	l2	t1	0		
e1	z1	l2	t2	0		
e1	z2	l1	t1	70	120	120
e1	z2	l1	t2	50		
e1	z2	l2	t1	0		
e1	z2	l2	t2	0		

Tabla 5.78: Resultados cR y validación escenario 2

En este escenario, la disponibilidad de alimento es aún más restringida. Las 10 vacas de tipo 1 se agrupan en el lote 1, junto con 5 vacas de tipo 2. Este lote es asignado en una oportunidad a la zona 1 y en otra a la zona 2. Por otro lado, el segundo lote, compuesto exclusivamente por 5 vacas de tipo 2, es enviado en ambas ocasiones a la zona 0. Al analizar el consumo en cada zona, se observa que, al igual que en el caso anterior, la cantidad total consumida coincide con la disponibilidad de alimento en cada zona, como se muestra en la [Tabla 5.78](#).

Modelo productivo:

■ Escenario 1:

En este primer escenario, el modelo productivo mantiene la misma asignación determinada en el modelo económico. El lote 1 está conformado por 2 vacas de tipo 1 y 4 de tipo 2, mientras que el lote 2 incluye 8 vacas de tipo 1 y 6 de tipo 2. La distribución espacial de los lotes también se conserva: el primer lote es enviado en ambas ocasiones a la zona 1, mientras que el segundo lote se asigna una vez a la zona 0 y otra a la zona 2. El consumo real en cada zona coincide con la disponibilidad de alimento, asegurando que no se supere el límite establecido, tal como se busca verificar en esta validación.

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	2
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	1
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	1

Tabla 5.79: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	2
e1	l1	t2	4
e1	l2	t1	8
e1	l2	t2	6

Tabla 5.80: Resultados vL escenario 1

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	0		
e1	z0	l1	t2	0		
e1	z0	l2	t1	60	120	120
e1	z0	l2	t2	60		
e1	z1	l1	t1	30		
e1	z1	l1	t2	80		
e1	z1	l2	t1	0	110	110
e1	z1	l2	t2	0		
e1	z2	l1	t1	0		
e1	z2	l1	t2	0		
e1	z2	l2	t1	60	120	120
e1	z2	l2	t2	60		

Tabla 5.81: Resultados cR y validación escenario 1

- Escenario 2:

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	1
e1	l2	z0	2
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	0

Tabla 5.82: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	10
e1	l1	t2	5
e1	l2	t1	0
e1	l2	t1	5

Tabla 5.83: Resultados vL escenario 2

Etapa	Zona	Lote	Tipo	cR por tipo	cR por zona	Alimento disp
e1	z0	l1	t1	0		
e1	z0	l1	t2	0		
e1	z0	l2	t1	0	100	100
e1	z0	l2	t2	100		
e1	z1	l1	t1	75		
e1	z1	l1	t2	45		
e1	z1	l2	t1	0	120	120
e1	z1	l2	t2	0		
e1	z2	l1	t1	75		
e1	z2	l1	t2	45		
e1	z2	l2	t1	0	120	120
e1	z2	l2	t2	0		

Tabla 5.84: Resultados cR y validación escenario 2

En este caso, dado que la disponibilidad de alimento es menor al consumo potencial, el modelo productivo arroja los mismos resultados que el modelo económico. Se mantiene tanto la composición de los lotes como su asignación a las distintas zonas. Además, el consumo en cada zona coincide con la disponibilidad de alimento, replicando exactamente el comportamiento observado en el modelo económico.

5. Validación de mínimo por lote (MinLote)

En este caso, se verifica que la cantidad de vacas asignadas a cada lote sea mayor al mínimo definido (minLote).

En la [Tabla 5.85](#) se exponen los datos de entrada utilizados para esta validación. En las tablas [Tabla 5.86](#) y [Tabla 5.87](#) las salidas correspondientes al escenario 1, en [Tabla 5.88](#) y [Tabla 5.89](#) las salidas correspondientes al escenario 2, y en [Tabla 5.90](#) y [Tabla 5.91](#) las salidas correspondientes al escenario 3.

Escenario	CantAnimales t1	CantAnimales t2	MinLote
1	1	1	1
2	10	10	10
3	10	10	9

Tabla 5.85: Parámetros de entrada

■ Escenario 1

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	0
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	2
e1	l2	z0	0
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	2

Tabla 5.86: Resultados aLZ escenario 1

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	0
e1	l1	t2	1
e1	l2	t1	1
e1	l2	t2	0

Tabla 5.87: Resultados vL escenario 1

En este escenario, se considera un total de dos vacas, una de cada tipo, distribuidas en dos lotes. Dado que el número mínimo por lote es 1, la solución esperada es que cada vaca sea asignada a un lote distinto. Como se observa en la [Tabla 5.87](#), este es precisamente el resultado obtenido: la vaca de tipo 2 es asignada al lote 1, mientras que la vaca de tipo 1 es asignada al lote 2.

■ Escenario 2

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	1
e1	l1	z1	1
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	0
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	2

Tabla 5.88: Resultados aLZ escenario 2

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	0
e1	l1	t2	10
e1	l2	t1	10
e1	l2	t2	0

Tabla 5.89: Resultados vL escenario 2

Cuando el mínimo por lote se establece en 10 vacas y hay 10 vacas de cada tipo, el modelo asigna todas las vacas de tipo 2 al lote 1 y todas las vacas de tipo 1 al lote 2, cumpliendo así con la restricción mínima por lote definida.

■ Escenario 3

Etapa	Lote	Zona	aLZ
e1	l1	z0	2
e1	l1	z1	0
e1	l1	z2	0
e1	l2	z0	2
e1	l2	z1	0
e1	l2	z2	0

Tabla 5.90: Resultados aLZ escenario 3

Etapa	Lote	Tipo	vL
e1	l1	t1	4
e1	l1	t2	5
e1	l2	t1	6
e1	l2	t2	5

Tabla 5.91: Resultados vL escenario 3

A diferencia de los escenarios anteriores, en este caso, donde hay 10 vacas de cada tipo y el mínimo por lote es 9, el modelo opta por distribuir ambos tipos de vacas en ambos lotes. Como resultado, el lote 1 queda conformado por 9 vacas (4 de tipo 1 y 5 de tipo 2), mientras que el lote 2 tiene 11 vacas (6 de tipo 1 y 5 de tipo 2).

6. Validación del modelo vacas variables

La validación del modelo se realizó comparándolo con el de vacas fijas para evaluar su capacidad de optimización del beneficio.

Se ejecutó permitiendo que la cantidad de vacas de cada tipo se ajuste según la disponibilidad de alimento, obteniendo mejores resultados en rentabilidad y eficiencia productiva en comparación con el modelo de vacas fijas, el cual se configuró de manera que su consumo potencial total igualara el alimento disponible. Además, se analizaron distintos escenarios de restricción alimentaria.

Como verificación adicional, se comparó con el modelo de vacas fijas, ajustando la cantidad total de vacas a la determinada por el modelo de vacas variables, pero variando la proporción entre los tipos. Esto permitió confirmar que el modelo variable selecciona la combinación óptima de vacas para maximizar los resultados.

Los parámetros de entrada se reflejan en la [Tabla 5.92](#). En la [Tabla 5.93](#) los resultados de cada escenario del modelo vacas variables; y en las tablas [Tabla 5.94](#) y [Tabla 5.95](#) las comparaciones de resultados entre el modelo con vacas variables y el modelo de vacas fijas.

Escenario	Alimento Disponible			
	z0	z1	z2	Total
1	120	110	120	350
2	350	350	350	1050

Tabla 5.92: Parámetros de entrada

Escenario	Cantidad de vacas		Cons Pot		Cons Total	Producción	Beneficio
	t1	t2	t1	t2			
1	0	18	0	360	350	501.951	126.95
2	0	53	0	1060	1050	1519.15	385.02

Tabla 5.93: Resultados obtenidos modelo Vacas Variables

Escenario 1:

Modelo	Cantidad de vacas		Cons Pot		Cons Total	Producción	Beneficio
	t1	t2	t1	t2			
vacas variable	0	18	0	360	350	501.95	126.95
vacas fijas	10	10	150	200	350	451.77	106.79
vacas fijas	18	0	270	0	270	299.67	65.97
vacas fijas	9	9	135	180	315	409.40	98.64

Tabla 5.94: Resultados obtenidos vacas fijas vs vacas variables escenario 1

En este primer escenario, el alimento disponible total es de 350 kg MS distribuidos entre las tres zonas. El modelo de vacas libres determinó que el beneficio se maximiza con un rodeo compuesto por 18 vacas de tipo 2 y ninguna de tipo 1. Al comparar este resultado con tres configuraciones diferentes en el modelo económico con vacas fijas, se observa que tanto el beneficio como la producción son superiores en la configuración determinada por el modelo de vacas libres. Las tres configuraciones evaluadas en el modelo de vacas fijas fueron: (1) una en la que el consumo potencial total iguala la disponibilidad de alimento, (2) otra en la que se invierte la proporción de vacas determinada por el modelo de vacas libres, y (3) una en la que la cantidad de vacas se mantiene, pero se distribuye equitativamente entre ambos tipos.

Escenario 2:

Modelo	Cantidad de vacas		Cons Pot		Cons Total	Producción	Beneficio
	t1	t2	t1	t2			
vacas variable	0	53	0	1060	1050	1519.15	385.02
vacas fijas	10	45	150	900	1050	1464.45	363.05
vacas fijas	53	0	795	0	795	880.11	192.37
vacas fijas	27	26	405	520	925	1198.68	287.97
vacas fijas	26	27	390	540	930	1211.37	291.80

Tabla 5.95: Resultados obtenidos vacas fijas vs vacas variables escenario 2

Cuando la disponibilidad total de alimento es de 1050 kg MS, el modelo de vacas libres determina que la configuración óptima del rodeo está compuesta por 53 vacas de tipo 2 y ninguna de tipo 1, maximizando así el beneficio. Al comparar este resultado con cuatro configuraciones distintas en el modelo económico con vacas fijas, se observa que en todos los casos, tanto el beneficio como la producción son menores en relación con el modelo de vacas libres. Las configuraciones evaluadas fueron: (1) una en la que el consumo potencial total iguala la disponibilidad de alimento, (2) otra en la que se invierte la proporción de vacas determinada por el modelo de vacas libres, y (3) y (4) combinaciones en las que se mantiene la cantidad total de vacas, pero se distribuyen equitativamente entre ambos tipos, considerando ambas variantes posibles (27/26 y 26/27).

Anexo B: Modelos Matemáticos

En este anexo se presenta el código utilizado para programar las formulaciones matemáticas definidas en la sección 4.3.

1. Modelo Económico - 1 lote

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param ENl;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var consTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var produccion >=0;

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} precioLeche *
((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/ENl) - (costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t]));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}:
```

```

sum{l in Lotes} vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot =
sum{e in Etapas,t in TiposVacas} consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. Produccion: produccion = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 68000 z1 34000 z2 12000;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

set Lotes := l1;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;

solve;

```

```
display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, beneficio;
end;
```

2. Modelo Productivo - 1 lote

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

/*Parámetros de Zonas*/
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param ENl;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/

var consTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var beneficio >= 0;

maximize produccion: sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];
```

```

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot: consTotal = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot = sum{e in Etapas,t in TiposVacas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. Beneficio: beneficio = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 68000 z1 34000 z2 12000;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param EN1 := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir minimo por lote*/
set Lotes := l1;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

param precioLeche:= 0.39;

solve;

display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, beneficio;
end;

```

3. Modelo Económico - 2 lotes

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param minlote;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var consTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var produccion >=0;

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes} vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot =
sum{e in Etapas,t in TiposVacas} (consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];
```

```

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion: produccion = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

/* Definir Distancia del establo a las zonas*/
param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 68000 z1 34000 z2 12000;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir minimo por lote*/
set Lotes := l1 l2;
param minlote := 50;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;

solve;

display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, beneficio;
end;

```

4. Modelo Económico - 2 lotes y costo de oportunidad

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

/*Parámetros de Zonas*/
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};
param CostoOportunidad;

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param minlote;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var consTotal>= 0;
var consPotTot>= 0;
var produccion>= 0;

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t] + CostoOportunidad*Alimento[z])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes} vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];
```

```

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot =
sum{e in Etapas,t in TiposVacas} (consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion: produccion = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 0 z1 119700 z2 0;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho:= 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param minlote := 50;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;
param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param CostoOportunidad:= 0.01;

solve;
display aLZ, cR, vL, consPotTot, consTotal, produccion, beneficio, Metano, EF, GE;
end;

```

5. Modelo Productivo - 2 lotes

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

/*Parámetros de Zonas*/
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param ENl;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param minlote;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/

var consTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var beneficio >= 0;

maximize produccion: sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];
```

```

s.t. ConsumoPot: consPotTot =
sum{e in Etapas,t in TiposVacas} (consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Beneficio: beneficio = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/ENl) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 68000 z1 34000 z2 12000;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir minimo por lote*/
set Lotes := l1 l2;
param minlote := 50;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

param precioLeche:= 0.39;

solve;

display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, beneficio;
end;

```

6. Modelo con Vacas Variables

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param cantZonas;
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};

param cal{z in Zonas};
param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;

param cantOrdenes;

param cantTiposVacas;
param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param costoAlimento {z in Zonas};

param cantLotes;
param minlote;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/

var cantAnimales{t in TiposVacas} >=0, integer;

var consTotal{t in TiposVacas} >= 0;
var consPotTot{t in TiposVacas} >= 0;
var produccion{t in TiposVacas} >= 0;

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes} vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
```

```

cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot{t in TiposVacas}: consTotal[t] =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot{t in TiposVacas}: consPotTot[t] = sum{e in Etapas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion{t in TiposVacas}: produccion[t] = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 54249 z1 27125 z2 9042 ;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas := e1;
param cantDias := e1 30;
param cantOrdenes:= 2;

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param minlote := 25;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas := t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;
param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

solve;

display aLZ, cR, vL, cantAnimales, consTotal, consPotTot, produccion, EF,GE, Metano, beneficio;
end;

```

7. Modelo con Vacas Variables con parámetros dependiente del tipo

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param cantZonas;
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};

param cal{z in Zonas};
param nroViajes;
param aux;
param rho;

param cantOrdenes;

param cantTiposVacas;
param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};

param precioLeche{t in TiposVacas};
param costoAlimento {z in Zonas};

param grasa{t in 1..cantTiposVacas};
param proteina{t in 1..cantTiposVacas};
var EN1 {t in 1..cantTiposVacas};
param paramgrasa;
param paramproteina;
param paramEN1;

param cantLotes;
param minlote;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */

var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */

var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/

var cantAnimales{t in TiposVacas} >=0, integer;

var consTotal{t in TiposVacas} >= 0;
var consPotTot{t in TiposVacas} >= 0;
var produccion{t in TiposVacas} >= 0;

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche[t]* (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1[t]) -
```

```

(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t]));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot{t in TiposVacas}:
consTotal[t] = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot{t in TiposVacas}: consPotTot[t] = sum{e in Etapas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. MinAnimales{t in 1..cantTiposVacas}: cantAnimales[t] >= 0;

s.t. EnergiaEqXLitro{t in 1..cantTiposVacas}:
ENl[t] = paramgrasa*grasa[t] + paramproteina*proteina[t] + paramENl;

s.t. Produccion{t in TiposVacas}: produccion[t] = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl[t]*rho);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 54249 z1 27125 z2 9042 ;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param rho := 1.03;

set Etapas := e1;
param cantDias := e1 30;
param cantOrdenes:= 2;

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param minlote := 25;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas := t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;

```

```
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;

param precioLeche:= 1 0.39 2 0.41;

param grasa := 1 3.9 2 4.1;
param proteina := 1 3.1 2 3.1;
param paramgrasa := 0.0929;
param paramproteina := 0.0547;
param paramEN1 := 0.192;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

solve;

display aLZ, cR, vL, cantAnimales, consTotal, consPotTot, produccion, EF, GE, Metano, beneficio;
end;
```

8. Modelo económico con enfoque ambiental - Metano

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

/*Parámetros de Zonas*/
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param minlote;

param Ym {z in Zonas};
/*1 cal= 4184J*/

param AuxEF1; /*MJ/kg CH4 */
param AuxGE; /* conversión de Mcal a MJ: 1 Mcal=4,184 MJ */

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var constTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var produccion >= 0;

/*Metano*/
var EF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Factor de emisión de metano por etapa, zona y tipo de vaca */
var GE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Ingesta de energía bruta por etapa, zona y tipo de vaca, MJ convertidos a kg de MS */
var Metano >=0; /*Metano liberado total por etapa*/

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));
```

```

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot = sum{e in Etapas,t in TiposVacas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion: produccion = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

s.t. CalculoGE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas}:
GE[e,z,t] = sum{l in Lotes} (cR[e,z,l,t] * cal[z] * AuxGE);
/* alimento consumido multiplicado por el valor calórico, en MJ*/

s.t. CalculoEF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas}:
EF[e,z,t] = (GE[e,z,t] * (Ym[z] / 100))/ AuxEF1 ; /*en kg CH4*/

s.t. MetanoTotal{e in Etapas}:
Metano = sum{z in Zonas, t in TiposVacas} (EF[e,z,t]);

/*s.t. MaxMetano{e in 1..cantEtapas}:
Metano <= 702.0804;*/

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 68000 z1 34000 z2 12000;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho:= 1.03;

set Etapas:= e1;

```

```

param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param minlote := 50;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;
param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

/*parámetros Metano*/
param Ym := z0 6.5 z1 6.5 z2 6.5;

param AuxEF1 := 55.65;
param AuxGE := 4.184;

solve;
display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, EF,GE, Metano, beneficio;
end;

```

9. Modelo Económico con enfoque ambiental - Nitrógeno

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

/*Parámetros de Zonas*/
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param minlote;

param PC {z in Zonas}; /* Porcentaje de Proteína Cruda en la dieta*/
param AuxPC;
param NretF; /*fraccion de retencion de N (sin unidades)*/

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var constTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var produccion >=0;

/*Nitrógeno*/
var cRN {z in Zonas} >= 0; /*N consumido por tipo por zona en kg*/
var Nitrogeno {z in Zonas} >=0; /*N excretado*/

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];
```

```

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot = sum{e in Etapas,t in TiposVacas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion: produccion = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

/*Nitrógeno*/
s.t. NitrogenoConsumido {z in Zonas}: cRN [z] =
sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t]*PC[z]/AuxPC;

s.t. NitrogenoExcretado {z in Zonas}: Nitrogeno[z] = cRN [z]*(1-NretF);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 68000 z1 34000 z2 12000;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho:= 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir minimo por lote*/
set Lotes := l1 l2;
param minlote := 50;

/*Definir tipos de vacas*/

set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;

```

```
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

param precioLeche:= 0.39;

/*parámetros para el Nitrógeno*/
param NretF:= 0.23;
param PC:= z0 0.09 z1 0.10 z2 0.15; /*Proteina Cruda*/

param AuxPC:= 6.25; /* en kg (16g N en 100g de Proteína)*/

solve;

display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, beneficio, cRN, Nitrogeno;
end;
```

10. Modelo Económico con alimento variable por etapa

```

set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{e in Etapas, z in Zonas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;

param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param minlote;

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var consTotal >= 0;
var consPotTot >= 0;
var produccion >=0;

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{e in 1..cantEtapas,z in Zonas}:
sum{ l in 1..cantLotes, t in 1..cantTiposVacas} cR[e,z,l,t] <= Alimento[e,z];

s.t. ConsumoTot: consTotal =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot: consPotTot =

```

```

sum{e in Etapas,t in TiposVacas} (consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion: produccion = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl*rho);

data;

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento : z0 z1 z2 :=
1 67344 33672 11224
2 63135 31567 10522
3 58926 29463 9821

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param ENl := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas:= e1;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := e1 30;

/*Definir minimo por lote*/
set Lotes := l1 l2;
param minlote := 50;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;

solve;

display aLZ, cR, vL, consTotal, consPotTot, produccion, beneficio;
end;

```

11. Modelo Económico para varias etapas con consideraciones ambientales

```

set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

/*Parámetros de Zonas*/
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas , e in Etapas};
param costoAlimento {z in Zonas};
param cal{z in Zonas};
param alpha{e in Etapas};

param cantDias{e in Etapas};
param cantOrdenes;

param nroViajes;
param aux;
param EN1;
param rho;
param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};
param cantAnimales{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param mingrup;

param Ym {z in Zonas};
/*1 cal= 4184J*/

param AuxEF1; /*MJ/kg CH4 */
param AuxGE; /* conversión de Mcal a MJ: 1 Mcal=4,184 MJ */

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/
var consTotal {e in Etapas} >= 0;
var consPotTot {e in Etapas} >= 0;
var produccion {e in Etapas} >= 0;
var beneficioetapa {e in Etapas} >= 0;

/*Metano*/
var EF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Factor de emisión de metano por etapa, zona y tipo de vaca */
var GE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Ingesta de energía bruta por etapa, zona y tipo de vaca, MJ convertidos a kg de MS */
var Metano >=0; /*Metano liberado total por etapa*/

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*alpha[e]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -

```

```

(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t]));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes} vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas, e in Etapas}:
sum{l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t] <= Alimento[z,e];

s.t. ConsumoTot{e in Etapas}: consTotal[e]=
sum{z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot{e in Etapas}: consPotTot[e]=
sum{t in TiposVacas} (consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinGrupo{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= mingrup;

s.t. Produccion{e in Etapas}: produccion[e] = sum{t in TiposVacas, z in Zonas, l in Lotes}
(((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*alpha[e]*nroViajes*aux*PV[t]))/(EN1*rho);

s.t. beneficioporetapa {e in Etapas}: beneficioetapa[e] =
sum{z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} precioLeche *
((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*alpha[e]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t]));

data;

/* DATOS DEL MODELO PLANTEADO */

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0;

param Distancia := z0 1.5;

set Etapas:= verano otonio invierno primavera;
param cantOrdenes := 2;
param cantDias := verano 90 otonio 90 invierno 90 primavera 90;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento : verano otonio invierno primavera :=
z0 254293 237340 203434 322104;

param alpha := verano 1.2 otonio 1.05 invierno 1.15 primavera 1.0;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 ;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param EN1 := 0.696;
param rho:= 1.03;

```

```

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param mingrup := 50;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas:= t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;
param cantAnimales := t1 50 t2 150;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;
param costoAlimento:= z0 0.20;

/*parámetros Metano*/
param Ym := z0 6.5;

param AuxEF1 := 55.65;
param AuxGE := 4.184;
solve;

display aLZ, cR, vL, consPotTot, consTotal, produccion,beneficioetapa, beneficio;
end;

```

12. Modelo con Vacas Variables y enfoque ambiental - Metano

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param cantZonas;
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};

param cal{z in Zonas};
param nroViajes;
param aux;
param ENl;
param rho;

param cantOrdenes;

param cantTiposVacas;
param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};

param precioLeche;
param costoAlimento {z in Zonas};

param cantLotes;
param minlote;

param Ym {z in Zonas};
/*1 cal= 4184J*/

param AuxEF1; /*MJ/kg CH4 */
param AuxGE; /* conversión de Mcal a MJ: 1 Mcal=4,184 MJ */

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */
var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */
var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/

var cantAnimales{t in TiposVacas} >=0, integer;

var consTotal{t in TiposVacas} >= 0;
var consPotTot{t in TiposVacas} >= 0;
var produccion{t in TiposVacas} >= 0;

/*Metano*/
var EF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Factor de emisión de metano por etapa, zona y tipo de vaca */
var GE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Ingesta de energía bruta por etapa, zona y tipo de vaca, MJ convertidos a kg de MS */
```

```

var Metano >=0; /*Metano liberado total por etapa*/

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche * (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/EN1) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes} vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot{t in TiposVacas}: consTotal[t] =
sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot{t in TiposVacas}: consPotTot[t] = sum{e in Etapas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. Produccion{t in TiposVacas}: produccion[t] = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes}
((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(EN1*rho);

s.t. CalculoGE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas}:

GE[e,z,t] = sum{l in Lotes} (cR[e,z,l,t] * cal[z] * AuxGE);
/* alimento consumido multiplicado por el valor calórico, en MJ*/

s.t. CalculoEF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas}:
EF[e,z,t] = (GE[e,z,t] * (Ym[z] / 100))/ AuxEF1 ; /*en kg CH4*/

s.t. MetanoTotal{e in Etapas}:
Metano = sum{z in Zonas, t in TiposVacas} (EF[e,z,t]);

data;

/* DATOS DEL MODELO PLANTEADO */

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 54249 z1 27125 z2 9042 ;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;

```

```

param EN1 := 0.696;
param rho := 1.03;

set Etapas := e1;
param cantDias := e1 30;
param cantOrdenes:= 2;

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param minlote := 25;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas := t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;

/*parámetros para el beneficio*/
param precioLeche:= 0.39;
param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;
/*parámetros Metano*/
param Ym := z0 6.5 z1 5.5 z2 5.0;

param AuxEF1 := 55.65;
param AuxGE := 4.184;

solve;

display aLZ, cR, vL, cantAnimales, consTotal, consPotTot, produccion, EF,GE, Metano, beneficio;
end;

```

13. Modelo con Vacas Variables con parámetros dependiente del tipo y enfoque ambiental - Metano

```
set Zonas;
set Etapas;
set TiposVacas;
set Lotes;

param cantZonas;
param Distancia{z in Zonas};
param Alimento{z in Zonas};

param cantDias{e in Etapas};

param cal{z in Zonas};
param nroViajes;
param aux;
param rho;

param cantOrdenes;

param cantTiposVacas;
param PV{t in TiposVacas};
param reqBasal{t in TiposVacas};
param consPot{t in TiposVacas};

param precioLeche{t in TiposVacas};
param costoAlimento {z in Zonas};

param grasa{t in 1..cantTiposVacas};
param proteina{t in 1..cantTiposVacas};
var EN1 {t in 1..cantTiposVacas};
param paramgrasa;
param paramproteina;
param paramEN1;

param cantLotes;
param minlote;

param Ym {z in Zonas};
/*1 cal= 4184J*/

param AuxEF1; /*MJ/kg CH4 */
param AuxGE; /* conversión de Mcal a MJ: 1 Mcal=4,184 MJ */

var vL{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0, integer;
/* cantidad de vacas por tipo por zona */

var cR{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas} >= 0;
/* consumo real de alimento (en MS) por tipo por zona */

var aLZ{e in Etapas, l in Lotes, z in Zonas} >= 0, integer;
/*Cantidad de veces que el lote L va a la zona Z en la etapa E*/

var cantAnimales{t in TiposVacas} >=0, integer;
```

```

var consTotal{t in TiposVacas} >= 0;
var consPotTot{t in TiposVacas} >= 0;
var produccion{t in TiposVacas} >= 0;

/*Metano*/
var EF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Factor de emisión de metano por etapa, zona y tipo de vaca */
var GE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas} >= 0;
/* Ingesta de energía bruta por etapa, zona y tipo de vaca, MJ convertidos a kg de MS */
var Metano >= 0; /*Metano liberado total por etapa*/
/*podria no depender de la etapa y ser el total*/

maximize beneficio:sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes, t in TiposVacas}
precioLeche[t]* (((((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/ENl[t]) -
(costoAlimento[z]*cR[e,z,l,t])));

s.t. Asignacion{e in Etapas, l in Lotes}: sum{z in Zonas} aLZ[e,l,z] = 2*cantDias[e];

s.t. totalVacas{e in Etapas, t in TiposVacas}: sum{l in Lotes}
vL[e,l,t] = cantAnimales[t];

s.t. oferta1{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas, l in Lotes}:
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*(consPot[t]/2) >= cR[e,z,l,t];

s.t. oferta2{z in Zonas}: sum{e in Etapas, l in Lotes, t in TiposVacas}
cR[e,z,l,t] <= Alimento[z];

s.t. ConsumoTot{t in TiposVacas}:
consTotal[t] = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes} cR[e,z,l,t];

s.t. ConsumoPot{t in TiposVacas}: consPotTot[t] = sum{e in Etapas}
(consPot[t]/2)*cantAnimales[t]*cantOrdenes*cantDias[e];

s.t. MinLote{e in Etapas, l in Lotes}: sum{t in TiposVacas} vL[e,l,t] >= minlote;

s.t. MinAnimales{t in 1..cantTiposVacas}: cantAnimales[t] >= 0;

s.t. EnergiaEqXLitro{t in 1..cantTiposVacas}:
ENl[t] = paramgrasa*grasa[t] + paramproteina*proteina[t] + paramENl;

s.t. Produccion{t in TiposVacas}: produccion[t] = sum{e in Etapas, z in Zonas, l in Lotes}
(((cR[e,z,l,t]*cal[z]) - (vL[e,l,t] * (reqBasal[t]/2)*aLZ[e,l,z] +
vL[e,l,t]*aLZ[e,l,z]*Distancia[z]*nroViajes*aux*PV[t]))/(ENl[t]*rho);

s.t. CalculoGE{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas}:
GE[e,z,t] = sum{l in Lotes} (cR[e,z,l,t] * cal[z] * AuxGE);
/* alimento consumido multiplicado por el valor calórico, en MJ*/

s.t. CalculoEF{e in Etapas, z in Zonas, t in TiposVacas}:
EF[e,z,t] = (GE[e,z,t] * (Ym[z] / 100))/ AuxEF1 ; /*en kg CH4*/

s.t. MetanoTotal{e in Etapas}:
Metano = sum{z in Zonas, t in TiposVacas} (EF[e,z,t]);

/*s.t. MaxMetano{e in Etapas}:
Metano <= ;*/

```

```

data;

/* DATOS DEL MODELO PLANTEADO */

/* Definir las zonas */
set Zonas := z0 z1 z2;

param Distancia := z0 1.5 z1 2 z2 0;

/* Definir Alimento por zona*/
param Alimento := z0 54249 z1 27125 z2 9042 ;

/* Definir Calorias por zona */
param cal := z0 1.4 z1 1.5 z2 1.65;

param nroViajes := 2;
param aux := 0.00045;
param rho := 1.03;

set Etapas := e1;
param cantDias := e1 30;
param cantOrdenes:= 2;

/*Definir lotes*/
set Lotes:= l1 l2;
param minlote := 25;

/*Definir tipos de vacas*/
set TiposVacas := t1 t2;
param PV := t1 600 t2 500;
param reqBasal := t1 9.698474 t2 8.45897;
param consPot := t1 23.38326 t2 17.321;

param precioLeche:= 1 0.39 2 0.41;

param grasa := 1 3.9 2 4.1;
param proteina := 1 3.1 2 3.1;
param paramgrasa := 0.0929;
param paramproteina := 0.0547;
param paramEN1 := 0.192;

param costoAlimento:= z0 0.20 z1 0.65 z2 0.80;

/*parámetros Metano*/
param Ym := z0 6.5 z1 5.5 z2 5.0;

param AuxEF1 := 55.65;
param AuxGE := 4.184;

solve;

display aLZ, cR, vL, cantAnimales, consTotal, consPotTot, produccion, EF,GE, Metano, beneficio;
end;

```

Anexo C: Casos de Estudio

1. Caso de Estudio 4: Estrategias de reducción del tamaño y configuración del rodeo

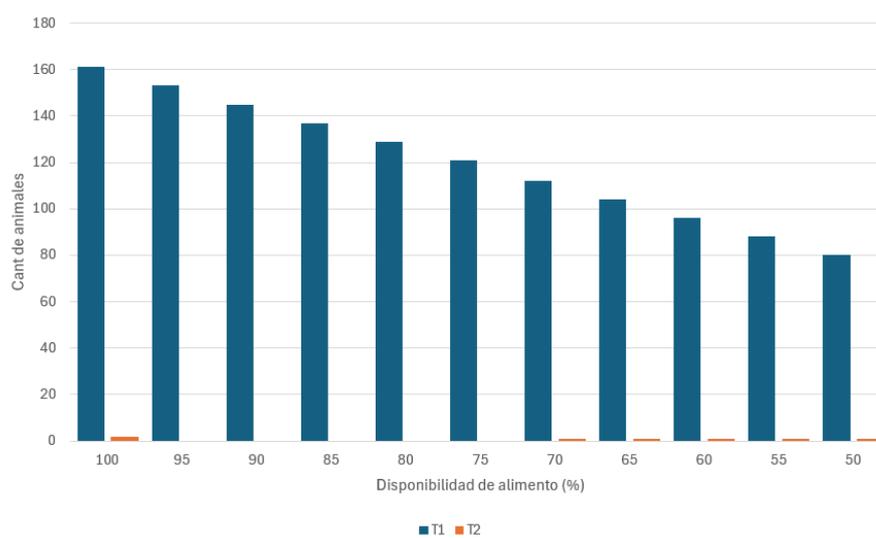


Figura 5.1: Cantidad de animales por tipo según la disponibilidad de alimentos

Cantidad total de vacas Tipo de vaca	200		190		180		170		160		150	
	t1 (grandes)	t2 (chicas)										
Cantidad total de vacas (por tipo)	50	150	45	145	40	140	35	135	30	130	25	125
ConsumoPotTotal (por tipo)	35074.89	77944.50	31567.40	75346.35	28059.91	72748.20	24552.42	70150.05	21044.93	67551.90	17537.44	64953.75
ConsumoTotal (por tipo)	35049.30	55406.74	31524.20	58891.80	28046.81	62369.11	24023.72	66357.23	21044.98	67551.50	17537.41	64953.81
ConsumoPotTotal		113019		106914		100808		94702.5		88596.8		82491.2
ConsumoTotal		90416		90416		90416		90416		88596.5		82491.2
Producción (lt)		100793		104543		108296		112044		112247		104089
Beneficio (USD)		26560		28066		29574		31079		31624		29891

Tabla 5.96: Resultados del análisis para diferentes combinaciones de cantidad de vacas y tipos, con reducciones equitativas de ambos tipos.

Cantidad total de vacas Tipo de vaca	200		190		180		170		160		150	
	t1 (grandes)	t2 (chicas)										
Cantidad total de vacas (por tipo)	50	150	40	150	30	150	20	150	10	150	0	150
Consumo Potencial Total (por tipo)	35074.89	77944.50	28059.91	77944.50	21044.93	77944.50	14029.96	77944.50	7014.98	77944.50	0	77944.50
Consumo Total (por tipo)	35049.30	55406.74	25687.39	64728.67	20750.51	69665.54	13816.12	50871.75	7014.98	77944.17	0	77944.10
Consumo Potencial Total		113019		106004		98989.4		91974.5		84959.5		77944.5
Consumo Total		90416		90416		90416		90416		84959.1		77944.1
Producción (lt)		100793		104746		108710		112665		105991		96293.9
Beneficio (USD)		26560		28148		29740		31329		30031		27914

Tabla 5.97: Resultados del análisis para diferentes combinaciones de cantidad de vacas y tipos, con reducciones de vacas del tipo 1.

Total de vacas Tipo de vaca	200		190		180		170		160		150	
	T1 (grandes)	T2 (chicas)										
Cantidad de vacas (por tipo)	50	150	50	140	50	130	50	120	50	110	50	100
ConsumoPotTotal (por tipo)	35,074.89	77,944.50	35,074.89	72,748.20	35,074.89	67,551.90	35,074.89	62,355.60	35,074.89	57,159.30	35,074.89	51,963.00
ConsumoTotal (por tipo)	35,049.30	55,406.74	34,719.88	55,696.10	34,555.31	55,860.69	34,473.30	55,942.57	34,434.40	55,981.54	35,074.90	51,963.00
ConsumoPotTotal		113,019.39		107,823.09		102,627.09		97,430.49		92,234.19		87,037.89
ConsumoTotal		90,416.04		90,416.00		90,416.00		90,416.00		90,416.00		87,037.90
Producción (lt)		100,793		104,331		107,868		111,405		114,959		111,913
Beneficio (USD)		26,560		27,981		29,401		30,823		32,250		31,881

Tabla 5.98: Resultados del análisis para diferentes combinaciones de cantidad de vacas y tipos, con reducciones de vacas del tipo 2.

Disponibilidad de alimento (%)	100		95		90		85		80		75		70		65		60		55		50			
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2		
Tipo de vaca																								
Cantidad de vacas (por tipo)	161	2	153	0	145	0	137	0	129	0	121	0	112	1	104	1	96	1	88	1	80	1		
ConsumoPotTotal (por tipo)	112941	1039	107329	0	101717	0	96105	0	90493	0	84881	0	78568	520	72956	520	67344	520	61732	520	56120	0		
ConsumoTotal (por tipo)	112941	1039	107329	0	101717	0	96067	0	90416	0	84764	0	78468	520	72944	519	62710	517	61664	496	56016	494		
ConsumoPotTotal	113980		107329		101717		96105		90493		84881		79087		73475		62251		56639		50846			
ConsumoTotal	113980		107329		101717		96067		90416		84764		78987		73463		63228		62160		56510			
Producción (lt)	154507		145367		137767		130093		122416		114737		107057		99434		91756		84078		76403			
Beneficio (USD)	44403		41864		39672		37459		35246		33032		30824		28626		26412		24198		21986			

Tabla 5.99: Resultados del análisis para diferentes combinaciones de cantidad de vacas y tipos, con reducciones de vacas del tipo 2.

Disponibilidad de alimento (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
ConsumoPotencialIndividual	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565
ConsumoIndividual	565	537	509	480	452	424	396	367	339	311	283
Producción Individual (l)	722	667	613	558	513	450	395	341	287	232	178
Beneficio Individual (USD)	203	185	168	150	133	115	98	80	63	46	28

Tabla 5.100: Resultados del análisis por vaca a partir del modelo económico con vacas fijas

Disponibilidad de alimento (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
ConsumoPotencialIndividual	699	701	701	701	701	701	699	699	699	699	699
ConsumoIndividual	699	701	701	701	701	701	700	700	699	698	698
Producción Individual (l)	948	950	950	950	949	948	947	947	946	945	943
Beneficio Individual (USD)	272	274	274	273	273	273	273	273	272	272	271

Tabla 5.101: Resultados del análisis por vaca a partir del modelo económico con vacas variables

2. Caso de Estudio 6: Evaluación del impacto ambiental en la producción lechera: análisis de emisiones de metano y su relación con la rentabilidad del sistema

	80 %	85 %			90 %			95 %			100 %		
Estrategia	1, 2 y 3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Producción (l)	100793	111823	113794	112802	122844	126806	124831	133847	139730	136844	144875	153169	149018
Beneficio (USD)	26560	29558	30020	29786	32553	33483	33020	35540	36923	36249	38529	40488	39512
Metano (kg)	642.9	684.32	688.5	686.4	725.8	734.0	729.9	767.2	779.3	773.4	808.6	825.9	817.2
Metano por litro (kg/l)	0.0064	0.00612	0.00605	0.00608	0.00591	0.0579	0.00585	0.00573	0.00558	0.00565	0.00558	0.00539	0.00548

Tabla 5.102: Relación entre disponibilidad de alimento, producción, beneficio y metano según estrategia de inversión

Cant. vacas	200	190			180			170			160			150		
Cant. vacas T1/T2	50/150	40/150	50/140	45/145	30/150	50/130	40/140	20/150	50/120	35/135	10/150	50/110	30/130	0/150	50/100	25/125
Metano (kg)	642.9	642.9	642.9	642.9	642.9	642.9	642.9	642.9	642.9	642.9	602.9	642.9	629.5	551.5	618.2	584.8
Metano por litro (kg/l)	0.00638	0.00614	0.00616	0.00615	0.00591	0.00596	0.00594	0.00571	0.00577	0.00574	0.00569	0.00559	0.00561	0.00573	0.00552	0.00562

Tabla 5.103: Emisiones de metano por estrategia de reducción del tamaño del rodeo.