



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, 10 de abril de 2025

# 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 contruidos 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.