

UFRRJ

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

TESE

**Modelagem Matemática e Computacional para
Movimentação Bovina em Sistemas Integrados
Lavoura-Pecuária-Floresta na Agricultura Familiar**

Vinicius Teixeira do Nascimento

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL PARA
MOVIMENTAÇÃO BOVINA EM SISTEMAS INTEGRADOS
LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AGRICULTURA FAMILIAR**

VINICIUS TEIXEIRA DO NASCIMENTO

Sob a Orientação do Professor
Angel Ramon Sanchez Delgado

e Coorientação dos Professores
Sergio Drumond Ventura e
Maria Claudia Rodríguez

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Curso de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, Área de Concentração Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

Seropédica, RJ
Novembro de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N244m

Nascimento, Vinicius Teixeira do, 1988-
Modelagem matemática e computacional para movimentação bovina em sistemas integrados lavoura pecuária-floresta na agricultura familiar/Vinicius Teixeira do Nascimento – Seropédica, 2024.
88 f.: il.

Orientador: Angel Ramon Sanchez Delgado.

Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, 2024.

1. Programação Linear Inteira. 2. Agricultura Familiar. 3. Sistemas Agroflorestais. 4. Otimização de Recursos. 5. Sustentabilidade. I. Delgado, Angel Ramon Sanchez, 1956-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO AGRÍCOLA



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 37 / 2024 - PPGCTIA (12.28.01.84)

Nº do Protocolo: 23083.069717/2024-84

Seropédica-RJ, 12 de dezembro de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO AGRÍCOLA

VINICIUS TEIXEIRA DO NASCIMENTO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

TESE APROVADA EM 28/11/2024.

Angel Ramon Sanchez Delgado. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Augusto Garcia Almeida. Dr. IFRJ

Catalina Bozzer Marini. Dra. UNRC

Eulina Coutinho Silva do Nascimento. Dra. UFRRJ

Pedro José Di Novella Cordero. Dr. UFBA

(Assinado digitalmente em 13/12/2024 13:17)
ANGEL RAMON SANCHEZ DELGADO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptM (12.28.01.00.00.63)
Matrícula: 1219231

(Assinado digitalmente em 13/12/2024 10:17)
EULINA COUTINHO SILVA DO NASCIMENTO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptM (12.28.01.00.00.63)
Matrícula: 6387358

(Assinado digitalmente em 17/12/2024 14:57)
CATALINA BOZZER
ASSINANTE EXTERNO
Passaporte: AAD457935

(Assinado digitalmente em 13/12/2024 10:30)
AUGUSTO GARCIA ALMEIDA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 019.390.807-70

(Assinado digitalmente em 25/09/2024 14:04)
PEDRO JOSÉ DI NOVELLA CORDERO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 053.723.847-60

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **37**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, datade emissão: **12/12/2024** e o código de verificação: **6fc0d5e93c**

DEDICATÓRA

Dedico esta tese a todos aqueles que foram essenciais em minha jornada de aprendizado e crescimento.

Aos meus pais, pela educação e valores que me transmitiram, pelo apoio constante e por acreditarem em mim desde o começo. Vocês são a base de tudo o que conquistei.

Ao meu filho, cuja presença enche meus dias de alegria e significado. Que este trabalho seja um exemplo de determinação e que ele possa sempre buscar seus próprios sonhos com coragem e perseverança. Cada esforço aqui investido é também para o seu futuro.

À minha namorada, pelo apoio, compreensão e amor ao longo de todos os desafios. Você esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, oferecendo palavras de encorajamento e me lembrando do propósito maior de toda essa dedicação. Sua presença foi essencial para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha família e amigos, pela paciência e carinho, e por entenderem as ausências e os momentos de silêncio. Saber que posso contar com vocês tornou a jornada mais leve.

Aos meus orientadores e professores, por suas orientações preciosas e por compartilharem seu conhecimento e experiência. Agradeço profundamente pelo comprometimento e confiança que depositaram em mim.

Por fim, dedico este trabalho a todos aqueles que buscam o conhecimento como meio de transformação. Que cada página deste trabalho sirva para inspirar e abrir novos caminhos.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta tese, me sinto profundamente grato a todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado e contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade. Sem o apoio e a compreensão de tantas pessoas especiais, este momento não seria possível.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu filho, que me trouxe uma motivação imensa para seguir em frente. Que esta conquista inspire o seu próprio caminho e que ele saiba que cada esforço aqui foi também pensando no seu futuro. Sua presença é uma fonte inesgotável de amor e energia em minha vida.

À minha namorada, que compartilhou comigo cada passo desta jornada, com paciência, incentivo e compreensão. Nos momentos mais difíceis, seu apoio foi fundamental, e suas palavras de encorajamento renovaram minhas forças para seguir adiante. Sou profundamente grato por seu carinho e companheirismo incondicional.

Aos meus pais, por terem me dado a base sólida que permitiu que eu chegasse até aqui. Obrigado pelo apoio inabalável, pela educação e pelos valores que me ensinaram e que guiaram cada escolha ao longo desta trajetória. Este trabalho é também reflexo de tudo o que vocês me ensinaram.

À minha família e amigos, pela compreensão e pela paciência durante os momentos de ausência, e por me lembrarem da importância do equilíbrio e da leveza nos dias mais intensos. Ter o apoio de vocês tornou os desafios mais fáceis de suportar.

Aos meus orientadores, por sua orientação, paciência e generosidade ao longo de todo o processo. Obrigado por acreditarem no meu potencial e por me ajudarem a crescer como pesquisador e como pessoa. Suas contribuições e ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, e o respeito e a admiração que tenho por cada um de vocês são imensos.

Aos colegas de pesquisa e professores, que compartilharam suas experiências, ideias e conhecimentos, contribuindo de maneira inestimável para meu aprendizado. A convivência com todos vocês enriqueceu esta jornada e me deu a chance de crescer em um ambiente colaborativo e inspirador.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, cruzaram o meu caminho ao longo desta jornada e contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um, meu mais sincero e profundo obrigado.

RESUMO

NASCIMENTO, Vinicius Teixeira do. **Modelagem matemática e computacional para movimentação bovina em sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta na agricultura familiar**. 2024. 88f. Tese (Doutorado em Ciência Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

A presente tese propõe uma modelagem matemática e computacional para otimizar a colheita bovina em sistemas integrados de Lavoura-Pecuária-Floresta, com foco na sustentabilidade e apoio à agricultura familiar, movimentos à integração harmoniosa entre lavoura, pecuária e floresta, promovendo um uso eficiente dos recursos e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. A modelagem desenvolvida fundamentalmente em programação matemática, aplicada para resolver problemas de otimização relativa ao trânsito e a alimentação dos bovinos, incorporando variáveis de decisão relacionadas ao ganho de peso dos animais, uso eficiente de recursos e restrições sobre o trânsito animal. A simulação computacional foi renovada no software GNU Octave, utilizando a biblioteca GNU Linear Programming Kit (GLPK) para resolver problemas de programação linear e programação inteira, e incorporando parâmetros específicos como número de animais, peso vivo, ganho de peso mensal, custos de adaptação das áreas e capacidade de suporte das pastagens. Essas configurações foram alimentadas no modelo com o objetivo de maximizar a produtividade e minimizar os custos. Além disso, foram empregados algoritmos de otimização para garantir que o modelo respeitasse as restrições impostas, garantindo soluções e cumprimentos aos objetivos de sustentabilidade e orientações econômicas da integração de Lavoura-Pecuária-Floresta. Os resultados da simulação demonstram a eficácia do modelo em prever planos de manejo ideal, fornecendo uma ferramenta estratégica para a tomada de decisões no setor agropecuário, com potencial de contribuição para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa. O objetivo geral da tese é desenvolver uma modelagem matemática e computacional para otimizar a movimentação bovina em sistemas integrados Lavoura-Pecuária-Floresta, visando a sustentabilidade e a eficiência dos recursos na agricultura familiar.

Palavras-chave: Programação Linear Inteira. Agricultura Familiar. Sistemas Agroflorestais. Otimização de Recursos. Sustentabilidade.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Vinicius Teixeira do. **Mathematical and computational modeling for cattle movement in integrated crop-livestock-forestry systems in family farming.** 2024. 88p. Thesis (Doctorate in Science, Technology and Innovation in Agriculture). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

This thesis proposes a mathematical and computational model to optimize cattle harvesting in integrated Crop-Livestock-Forestry systems, focusing on sustainability and support for family farming, movements towards harmonious integration between crops, livestock and forestry, promoting efficient use of resources and contributing to environmental sustainability. The modeling was developed fundamentally in mathematical programming, applied to solve optimization problems related to cattle movement and feeding, incorporating decision variables related to animal weight gain, efficient use of resources and restrictions on animal movement. The computational simulation was renewed in the GNU Octave software, using the GNU Linear Programming Kit (GLPK) library to solve linear programming and integer programming problems, and incorporating specific parameters such as number of animals, live weight, monthly weight gain, area adaptation costs and pasture carrying capacity. These configurations were fed into the model with the aim of maximizing productivity and minimizing costs. In addition, optimization algorithms were used to ensure that the model respected the imposed constraints, guaranteeing solutions and compliance with the sustainability objectives and economic guidelines of the Crop-Livestock-Forest integration. The simulation results demonstrate the effectiveness of the model in predicting ideal management plans, providing a strategic tool for decision-making in the agricultural sector, with the potential to contribute to the mitigation of greenhouse gas emissions. The general objective of the thesis is to develop a mathematical and computational model to optimize cattle movement in integrated Crop-Livestock-Forest systems, aiming at sustainability and resource efficiency in family farming.

Keywords: Integer Linear Programming. Family Farming. Agroforestry Systems. Resource Optimization. Sustainability.

RESUMEN AMPLIADO

NASCIMENTO, Vinicius Teixeira do. **Modelación matemática y computacional del movimiento de ganado en sistemas integrados cultivo-ganadería-bosque en la agricultura familiar.** 2024. Tesis 88h. (Doctorado en Ciencia, Tecnología e Innovación en Agricultura). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

1. Introducción

La ganadería vacuna es un sector destacado a nivel mundial, siendo Brasil el mayor exportador mundial de carne vacuna desde 2003. Este éxito se debe a factores como el control de la fiebre aftosa, la producción basada en pastos, la expansión territorial y el seguimiento de la carne para exportación, especialmente la Unión Europea. A pesar de esto, el sector enfrenta desafíos como la degradación de los pastos, prácticas agrícolas inadecuadas y altos costos de recuperación. Se han adoptado tecnologías como el Sistema de Plantación Directa y la Integración Cultivos-Ganadería-Bosque (ICGF) para promover la sostenibilidad y la eficiencia. El ICGF integra agricultura, ganadería y silvicultura, ofreciendo beneficios sociales, ambientales y económicos, pero requiere una planificación técnica detallada, como análisis de suelo, clima y selección de cultivos. Los avances tecnológicos, como la agricultura de precisión y la modelización matemática y computacional, han mejorado la optimización de estos sistemas, ayudando a reducir los impactos ambientales, mejorar la productividad y garantizar la sostenibilidad.

La modelación matemática, especialmente con programación lineal y entera, se aplica para optimizar la rotación de cultivos y el movimiento de ganado en sistemas ICGF, considerando factores como la eficiencia en el uso de recursos y la minimización de impactos ambientales. Las herramientas computacionales ayudan en la toma de decisiones simulando diferentes escenarios y prediciendo el rendimiento de los cultivos, la productividad animal y el crecimiento de los bosques. La tesis presentada propone un enfoque inédito, con modelamiento matemático y computacional para optimizar el movimiento de ganado en sistemas ICGF, con enfoque en la agricultura familiar. Busca maximizar la productividad y minimizar costos, promoviendo la sostenibilidad económica y ambiental, además de mitigar los gases de efecto invernadero. Esta metodología brinda apoyo estratégico a las decisiones en el sector agrícola, integrando prácticas innovadoras y sustentables.

2. Procedimientos Metodológicos

La revisión de la literatura destaca la relevancia de las prácticas agrícolas sostenibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y abordar los desafíos climáticos. Destaca la importancia de prácticas bajas en carbono, como la gestión eficiente de residuos, el uso de energías renovables y técnicas de agricultura de precisión. También destaca el impacto económico positivo de estas prácticas, con análisis de costo-beneficio que demuestran la viabilidad financiera. La tesis también explora el papel de las políticas públicas en la promoción de la agricultura sostenible, destacando los incentivos gubernamentales como fundamentales para la adopción de prácticas más ecológicas. La Agricultura 4.0 se presenta como una transformación del sector, integrando tecnologías como IoT, big data e inteligencia artificial para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la gestión agrícola. Además, se analiza la integración cultivos-ganadería-bosques como un enfoque sustentable, con beneficios ambientales, económicos y sociales. Se destaca el uso de modelos matemáticos y computacionales para optimizar los sistemas iLPF, incluida su aplicación en la gestión de

recursos, mitigación de riesgos y adaptación a diferentes contextos regionales y climáticos. Si bien los avances en sistemas integrados y tecnologías sostenibles son prometedores, persisten desafíos importantes, como la resistencia de los agricultores, la necesidad de desarrollar capacidades técnicas y obtener datos precisos para alimentar los modelos de optimización.

La tesis también aborda los fundamentos matemáticos y computacionales, centrándose en técnicas de programación lineal, entera, mixta y binaria aplicadas a la optimización de sistemas agrícolas integrados. La programación lineal se destaca como una poderosa herramienta para modelar problemas reales, transformándolos en ecuaciones lineales para maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a restricciones. Se discuten conceptos como el método Simplex y la eficiencia práctica de los algoritmos de puntos interiores, que permiten encontrar soluciones óptimas de manera eficiente. La programación entera, a su vez, se presenta como una extensión que trata con variables restringidas a valores enteros, siendo útil en problemas de decisión que involucran elecciones discretas, como la programación de tareas y la planificación de la producción. Técnicas como el método Branch-and-Bound se destacan como fundamentales, aunque computacionalmente intensivas. La programación mixta, que combina variables enteras y continuas, se utiliza en problemas más complejos, como la asignación de recursos y la planificación de proyectos, lo que permite una mayor flexibilidad en aplicaciones prácticas. Finalmente, se explora la programación binaria como una herramienta específica para modelar decisiones simples de "sí" o "no", con aplicación en optimizaciones combinatorias. Además de demostrar cómo estas técnicas matemáticas se integran en modelos computacionales para resolver problemas reales en sistemas agrícolas, destacando la importancia de los enfoques algorítmicos y computacionales en la búsqueda de soluciones optimizadas en escenarios agrícolas sostenibles.

El Sistema Integrado Cultivo-Ganadería-Bosque, estrategia que combina la integración de cultivos agrícolas, ganaderos y actividades forestales en una misma zona mediante consorcio, sucesión o rotación. Este enfoque promueve sinergias entre los componentes, lo que genera beneficios como la diversificación de los ingresos, la mejora de la calidad del suelo, la conservación de la biodiversidad, el bienestar animal y la reducción de los impactos ambientales. El ICGB es adaptable a diferentes realidades productivas y contribuye a la sostenibilidad a largo plazo, a una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales y a la mitigación del cambio climático. Se presentan cuatro modalidades principales del sistema: Integración Cultivo-Ganadería, Integración Cultivo-Bosque, Integración Ganadería-Bosque e Integración Cultivo-Ganadería-Bosque. A pesar de los beneficios, la adopción de ICGB enfrenta obstáculos, como la necesidad de una mayor integración entre instituciones, la formación de técnicos especializados y acciones de comunicación y marketing. Para superar estos desafíos, iniciativas como el Plan ABC (Agricultura Baja en Emisiones de Carbono) ofrecen incentivos, como crédito facilitado, para implementar sistemas integrados, promoviendo una agricultura más sostenible. El texto también destaca que el ICGB es una alternativa estratégica para satisfacer las demandas futuras de alimentos, fibras y biocombustibles, sin la necesidad de expandir áreas agrícolas hacia bosques nativos. Este enfoque, además de aumentar la productividad, promueve la sostenibilidad de la agricultura brasileña, demostrando ser una solución innovadora y eficiente para el sector.

La tesis presenta una visión integral de la agricultura argentina, centrándose en prácticas, especies y técnicas relevantes para los sistemas silvopastoriles. Inicialmente destaca la relevancia de razas bovinas como Hereford, Angus, Brangus, Braford y Criollo Argentino, elegidas por sus cualidades cárnicas y su adaptabilidad a las condiciones climáticas y de manejo local. Tales características son esenciales para el éxito de los sistemas integrados, que combinan sostenibilidad y productividad. También aborda la siembra directa, una práctica ampliamente difundida en Argentina, que cubre más del 90% de las áreas agrícolas del país. Esta técnica ha demostrado ser efectiva para conservar el suelo, aumentar la fertilidad y reducir costos, además

de contribuir a la mitigación del cambio climático. Además, se discute la diversidad de sistemas de engorde adaptados a las condiciones regionales en Argentina, como el engorde en pastos, sistemas mixtos y sistemas silvopastoriles. Dichos métodos varían según la geografía y los recursos locales, y buscan maximizar la eficiencia y la sostenibilidad. A pesar de enfrentar desafíos como el acceso limitado a la tecnología y el financiamiento, estos agricultores desempeñan un papel crucial en la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. El capítulo también destaca la importancia de las políticas públicas y la innovación tecnológica para fortalecer este sector. Finalmente, se presentan modelos matemáticos y computacionales aplicados a sistemas silvopastoriles, que optimizan la asignación de recursos, predicen impactos climáticos y promueven la sostenibilidad de estos sistemas. Dichos modelos ayudan a planificar y gestionar eficientemente la interacción entre árboles, pastos y ganado, contribuyendo al equilibrio ambiental y productivo.

En resumen, la tesis utiliza en su metodología un enfoque integral de modelación matemática y computacional para optimizar el movimiento del ganado en sistemas integrados Cultivo-Ganadería-Bosque, con un enfoque en la agricultura familiar y la sostenibilidad. Se basa en técnicas de programación lineal y entera, formulando modelos que integran variables como ganancia de peso de los animales, capacidad de soporte de las áreas de pasto y restricciones asociadas al movimiento de los animales para evitar una compactación excesiva del suelo. Las simulaciones se implementaron en el software GNU Octave utilizando el Kit de Programación Lineal GNU (GLPK), incorporando datos sobre número de animales, costos operativos y adecuación de las áreas. También se aplicaron algoritmos de optimización como Branch-and-Bound para refinar las soluciones. El estudio incluye la formulación de sistemas de apoyo a la decisión que simulen diferentes escenarios ambientales y operativos, considerando parámetros climáticos, propiedades del suelo y desempeño del sistema. Además, se empleó programación entera mixta para maximizar la eficiencia económica y ambiental, considerando interacciones dinámicas entre cultivos, ganado y silvicultura. Esta metodología no sólo aporta soluciones estratégicas para la planificación agrícola, sino que también contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, promover la sostenibilidad y optimizar el uso de los recursos naturales.

3. Resultados y Discusión

El Capítulo I de la tesis aborda el desarrollo e implementación de un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MIXP) para optimizar el Sistema Integrado Cultivo-Ganadero con Siembra Directa (SILPE-PD). Este sistema tiene como objetivo maximizar el aumento de peso de los animales, seleccionar los cultivos anuales más eficientes y reducir los costos de alimentación en áreas confinadas. La integración cultivos-ganadería está asociada a la siembra directa, promoviendo la sostenibilidad mediante la conservación del suelo, mejorando el ciclo de nutrientes y asegurando una producción eficiente tanto de la agricultura como de la ganadería. El capítulo presenta la estructura del SILPE-PD, que consta de tres áreas principales: cultivos anuales, pastos y confinamiento animal. El modelo matemático incluye variables como el peso de los animales, la productividad de los cultivos, los costos operativos y los límites de nutrientes. Las simulaciones realizadas utilizaron diferente número de animales (10, 50 y 100) para evaluar la eficiencia del sistema. Los resultados demostraron que SILPE-PD permite optimizar el movimiento y la alimentación de los animales, además de maximizar el uso de áreas de pasto, cultivo y confinamiento. Una característica importante del sistema es el uso de residuos de cultivos como alimento fuera de temporada, lo que reduce los costos y promueve la conservación del suelo. Sin embargo, debido a preocupaciones sobre la compactación del suelo, el número de animales por área es limitado. El modelo también identifica cultivos y períodos de siembra que maximizan los ingresos netos marginales

respetando al mismo tiempo las limitaciones de agua y suelo. En el aspecto computacional, el modelo MIXP demostró ser eficiente, con tiempos de ejecución viables incluso para simulaciones con un mayor número de animales. El análisis concluyó que SILPE-PD no sólo optimiza la producción ganadera y agrícola de manera sostenible, sino que también se destaca como una solución robusta para la conservación de los recursos naturales y la eficiencia productiva.

El Capítulo II de la tesis analiza el Sistema Silvopastoril La Aguada (SSP-LA), desarrollado en la región de Córdoba, Argentina, como una solución innovadora para la integración de pastos, árboles y animales. El sistema busca promover la sostenibilidad en las actividades agrícolas mediante la combinación de la producción animal con la conservación del medio ambiente, trayendo beneficios ecológicos, sociales y económicos. El modelo destaca por su capacidad de ofrecer confort térmico al ganado, aumentar la eficiencia en el uso de los recursos naturales y contribuir a la mitigación del cambio climático. La estructura del SSP-LA se compone de cinco áreas principales: pastizales al norte y sur (sin árboles), áreas de confinamiento al norte y sur, y una zona silvopastoril central, que integra pastos con árboles. Esta configuración permite explorar las ventajas de diferentes combinaciones de recursos naturales y prácticas agrícolas. El confinamiento de animales se utiliza estratégicamente, sólo cuando es necesario, para reducir los costos de alimentación con concentrados y aprovechar los períodos de alta disponibilidad de pastos. El sistema incorpora árboles en las zonas de pasto, ofreciendo protección contra las inclemencias del tiempo y mejorando el confort térmico de los animales, lo que se traduce en un mejor rendimiento en el engorde y bienestar general. Además, los árboles ayudan a conservar el suelo, proteger contra la erosión y secuestrar carbono, factores que contribuyen a mitigar los impactos ambientales y crear un modelo productivo más sostenible. En el aspecto metodológico, la tesis utiliza un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MIXP) implementado en el software GNU Octave para optimizar el manejo animal. Este modelo toma en cuenta parámetros como el número de animales, ganancia de peso, composición de los alimentos, capacidad de carga de las áreas y costos operativos. La simulación por computadora es esencial para predecir el desempeño del sistema y proponer mejoras, permitiendo ajustar variables para maximizar la productividad y minimizar costos sin comprometer restricciones ambientales y económicas. Los resultados presentados demuestran que el modelo propuesto para SSP-LA es eficaz para optimizar el movimiento de animales y la asignación de recursos, asegurando ganancias económicas y ambientales. El capítulo concluye destacando el potencial del sistema para servir como referencia estratégica para la implementación de prácticas agrícolas integradas en otras regiones, especialmente en contextos donde la sostenibilidad es una prioridad.

4. Conclusiones

Brasil se destaca en el mercado mundial de carne vacuna por la solidez de su ganadería de carne, respaldada por prácticas como la alimentación con pasto, políticas sanitarias y medidas de seguridad alimentaria. Estos factores han permitido al país consolidar su liderazgo en el sector, al mismo tiempo que enfrenta desafíos como la necesidad de incrementar la producción para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos. Sin embargo, la intensificación de la producción requiere estrategias que equilibren la sostenibilidad ambiental con la eficiencia económica, especialmente en relación con la recuperación de áreas degradadas y la preservación de los recursos naturales. Así, la búsqueda de sistemas de producción sostenibles se ha vuelto crucial para mantener la competitividad del sector y su relevancia en los mercados internos y externos.

En este contexto, los sistemas integrados de producción agrícola, como el Sistema Integrado de Cultivos, Ganadería y Bosques, se destacan como soluciones prometedoras. La

aplicación de tecnologías avanzadas, como la Programación Lineal Entera Mixta, ha demostrado ser eficaz para optimizar estos sistemas, promover una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales y contribuir a la mitigación de las emisiones de carbono. Estos modelos permiten integrar prácticas agrícolas, ganaderas y forestales de forma armónica, favoreciendo la conservación del suelo, el bienestar animal y la sostenibilidad económica. Además, las técnicas matemáticas y computacionales ofrecen apoyo a las decisiones estratégicas, asegurando la viabilidad de sistemas integrados en diferentes contextos productivos, incluida la agricultura familiar, donde maximizar la eficiencia de los recursos es esencial.

Finalmente, estudios recientes, como los relacionados con el Sistema Silvopastoril La Aguada (SSP-LA) y el Sistema Integrado Cultivo-Ganadero con Siembra Directa (SILPE-PD), refuerzan la importancia de adoptar sistemas integrados para una agricultura sostenible. Estos sistemas no sólo optimizan el uso de insumos y promueven el equilibrio costo-beneficio, sino que también demuestran el potencial para mitigar el cambio climático y recuperar recursos naturales. La integración de tecnologías de optimización con prácticas agroforestales se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, como el hambre cero, la producción sostenible y la acción climática. La tesis concluye que la expansión y adaptación de estos sistemas en propiedades familiares representa un camino estratégico para fortalecer la sostenibilidad y resiliencia del sector agrícola global.

Palabras claves: Programación Lineal Entera. Agricultura Familiar. Sistemas Agroforestales. Optimización de Recursos. Sostenibilidad.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação Gráfica do trânsito animal no SILPE-PD. Fonte: Desenvolvido pelo Autor.....24
- Figura 2.** Representação Gráfica do Sistema Silvipastoril - La Aguada (SSP-LA). Fonte: Desenvolvido pelo Autor.....42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Solução de ótima para trânsito animal para a 1ª simulação com 10 animais.....	31
Tabela 2. Solução de ótima da parte agrícola para a 1ª simulação.	31
Tabela 3. Solução de ótima para composição da alimentação animal para a 1ª simulação.....	32
Tabela 4. Solução de ótima para trânsito animal para a 2ª simulação com 50 animais.....	33
Tabela 5. Solução de ótima da parte agrícola para a 2ª simulação.	34
Tabela 6. Solução de ótima para composição da alimentação animal para a 2ª simulação.....	35
Tabela 7. Solução de ótima para trânsito animal para a 3ª simulação com 100 animais.....	35
Tabela 8. Solução de ótima da parte agrícola para a 3ª simulação.	36
Tabela 9. Solução de ótima para composição da alimentação animal para a 3ª simulação.....	37
Tabela 10. Disponibilidade de alocação para 1ª simulação com 10 animais.....	51
Tabela 11. Solução ótima levando-se em conta disponibilidade para 1ª simulação com 10 animais.....	53
Tabela 12. Disponibilidade de alocação para 2ª simulação com 20 animais.....	54
Tabela 13. Solução ótima levando em conta disponibilidade para 2ª simulação com 20 animais.	55

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
AF	Agricultura Familiar
B&B	Branch-and-Bound
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEE	Gases de Efeito Estufa
IA	Inteligência Artificial
ICGF	Integración de Cultivos-Ganadería-Bosque
iLF	Sistema Integrado Lavoura-Floresta
iLP	Sistema Integrado Lavoura-Pecuária
iLPF	Sistema Integrado Lavoura-Pecuária-Floresta
INTA	Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária - Argentina
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
iPF	Sistema Integrado Pecuária-Floresta
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MDA	Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar
MIXP	Mixed Integer Linear Programming (Programação Linear Inteira Mista)
ML	Machine Learning
MMA	Ministério de Meio Ambiente e da Mudança Climática
ONU	Organização das Nações Unidas
PB	Programação Binária
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
SAF	Sistema Agroflorestal
SILPE-PD	Sistema Integrado Lavoura-Pecuária com Plantio Direto
SPD	Sistema de Plantio Direto
SSP	Sistema Silvipastoril
SSP-LA	Sistema Silvipastoril – La Aguada
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
UNRC	Universidad Nacional de Río Cuarto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL	5
2.1 Fundamentação Matemática e Computacional	8
2.2 Programação Linear	8
2.3 Algoritmo Simplex	9
2.4 Programação Inteira	10
2.5 Programação Inteira Mista	11
2.6 Programação Binária	12
2.7 Sistema Integrado Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)	12
2.8 Plano ABC	13
2.9 A Agricultura Familiar	14
3. AGROPECUÁRIA ARGENTINA	16
3.1 Espécies Mais Comuns para iLPF	16
3.2 O Plantio Direto	17
3.3 Sistemas de Engorda de Gado	18
3.4 A Pecuária em Diferentes Regiões da Argentina	18
3.5 A Agricultura Familiar	19
3.6 Modelos Matemáticos e Computacional Aplicados a Silvipastoris	20
4. CAPÍTULO I SISTEMA INTEGRADO LAVOURA-PECUÁRIA COM PLANTIO DIRETO (SILPE-PD)	21
4.1 RESUMO	22
4.2 ABSTRACT	23
4.3 INTRODUÇÃO	24
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	25
4.4.1 Índices	26
4.4.2 Parâmetros	26
4.4.3 Variáveis	27
4.4.4 Restrições	27
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.6 CONCLUSÕES	38
5. CAPÍTULO II SISTEMA SILVIPASTORIL - LA AGUADA (RIO CUARTO-CÓRDOBA- ARGENTINA)	39
5.1 RESUMO	40
5.2 ABSTRACT	41
5.3 INTRODUÇÃO	42

5.4 MATERIAL E MÉTODOS	44
5.4.1 Especificações do Sistema	44
5.4.2 Índices	45
5.4.3 Parâmetros.....	45
5.4.4 Variáveis	46
5.4.5 Restrições	46
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.6 CONCLUSÕES	56
6. CONCLUSÕES GERAIS	57
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
9. APÊNDICES	65

1. INTRODUÇÃO GERAL

A pecuária de corte ganhou destaque na economia nacional, também uma posição de liderança no mercado global de carnes. Segundo o último Censo Agropecuário (IBGE, 2017), o Brasil possui a maior indústria pecuária comercial do mundo, é o segundo maior produtor mundial de carne bovina com cerca de 8 milhões de toneladas e desde 2003, o país tornou-se o maior exportador mundial, com foco no comércio de carnes in natura e processadas. Vários fatores foram decisivos para ajudar o Brasil a se tornar líder no comércio internacional de carne bovina, em primeiro lugar podemos destacar as medidas desenvolvidas para erradicar a febre aftosa, que ajudam a melhorar a percepção da qualidade dos produtos nos países importadores, outra característica muito valorizada é a observação da produção segura de alimentos, já que a maior parte do rebanho brasileiro é alimentada a pasto, outros fatores como a terra, o clima e os recursos humanos criaram vantagens comparativas, juntamente com a expansão territorial, permitindo ao país fornecer carne bovina de alta qualidade aos mercados interno e externo a um preço razoável. As quantidades são crescentes e com preços competitivos, além desses fatores, as iniciativas de rastreamento da carne bovina destinada à exportação, especialmente para a União Europeia, têm contribuído significativamente para atender às expectativas dos consumidores internacionais em relação à segurança alimentar (LIMA et al., 2006).

No Brasil, estima-se que o crescimento da procura de alimentos conduza à necessidade de duplicar a produção de leite e carne até 2050, este cenário resulta no aumento da pressão sobre os sistemas de produção (FERREIRA et al, 2010). O aumento da produção pode ser um dos motivos da intensificação dos sistemas produtivos ou abertura de novas áreas agrícolas, a intensificação dos sistemas de produção não é trivial, devido à elevada degradação e altos custos de recuperação, além disso, é muito comum observarmos a existência de práticas agrícolas inadequadas, que levam a uma perda de produtividade econômica (PIRES et al., 2010).

A destruição de pastagens é um fator que ameaça a sustentabilidade da produção pecuária, podendo ocorrer pelo processo de degradação ou declínio relativo da vegetação. A circulação arbitrária de animais e as dificuldades em respeitar a reposição de nutrientes são razões prioritárias importantes no que diz respeito à destruição de pastagens. Áreas pecuárias sobrelotadas, tecnologia de apoio inadequada, fertilizantes e manutenção insuficientes são fatores que promovem a degradação das pastagens. As deficiências na sustentabilidade da produção foram superadas através do uso de tecnologias-chave, como o Sistema de Plantio Direto (SPD), que envolve não apenas o preparo mínimo do solo, mas também práticas de rotação de culturas e sistemas integrados de produção agropecuária. (MACEDO et al., 1993; ZIMMER et al, 1986).

A produção agrícola tradicional é baseada principalmente na monocultura e um dos motivos são os baixos custos operacionais e a facilidade de implementação. Contudo, na realidade, isto levou a uma série de perdas, como a existência de pragas e patógenos se espalha facilmente necessitando na aplicação de pesticidas tóxicos, que por sua vez são muito prejudiciais ao meio ambiente. Conforme apontado pela EMBRAPA (KLUTHCOUSKI et al, 2011), a monocultura esgota o solo no longo prazo, levando ao uso de doses crescentes de fertilizantes químicos, sem contar que esta medida pode levar ao empobrecimento dos pequenos produtores e a redução da qualidade dos produtos agrícola. A escolha de culturas adequadas na rotação de culturas também promove o aumento da produtividade, aliado a muitos aspectos que contribuem para a redução de custos nas atividades agrícolas e aumento da renda dos produtores. E assim, a propriedade pode continuar suas operações. Portanto, a rotação de culturas é extremamente importante para controlar adequadamente pragas e ervas daninhas na agricultura, bem como para estabilizar a produção (GONÇALVES et al., 2007).

Segundo, Gonzaga et al. (2023), o novo panorama das propriedades rurais, a Agropecuária 4.0, representa uma transformação significativa no setor agrícola e pecuário, incorporando tecnologias avançadas como IoT (Internet of Things / Internet das Coisas), análise de dados, inteligência artificial, métodos matemáticos, automação, modelagem matemática, modelagem computacional e blockchain. Essas inovações permitem uma gestão mais eficiente e sustentável, com a coleta de dados em tempo real, análise preditiva e automação de processos. A integração dessas tecnologias visa aumentar a produtividade, melhorar a eficiência no uso de recursos e garantir a rastreabilidade na cadeia de suprimentos, contribuindo para um setor agropecuário mais resiliente e inovador.

A sustentabilidade ambiental está a sendo promovida na investigação acadêmica, principalmente devido à necessidade de otimizar os recursos naturais e evitar ao máximo o desperdício, o que na maioria dos casos também leva a uma maior produtividade devido à redução dos custos de produção. Além disso, a população mundial cresce continuamente, levando a uma crescente procura de alimentos, que por outro lado, observamos a redução das áreas para desenvolvimento agrícola e produção pecuária, devido a problemas climáticos e falta de recursos, inviabilizando a produção em algumas áreas.

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) é uma alternativa adotada entre os elementos tecnológicos disponíveis, onde se destacam as sinergias entre a produção agrícola, pecuária e atividade florestal, apresentando benefícios sociais e ambientais. Como o uso do iLPF é complexo, os produtores rurais devem planejar as etapas que tomarão ao adotar esse procedimento para implementá-lo com sucesso. Por meio de avanços tecnológicos como agricultura de precisão, sistemas de gestão de terras e melhoramento genético, é possível aumentar a produção e reduzir o impacto ambiental. Sendo de fundamental importância a assistência técnica que deve levar em conta as condições do solo, as propriedades químicas e físicas do solo, a seleção de culturas, o clima, o comportamento animal e outros fatores que influenciam direta e indiretamente para o planejamento das atividades rurais.

A modelagem matemática e computacional desempenha um papel crucial na compreensão e aprimoramento do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, uma técnica da agropecuária que aborda a produção agrícola de maneira sustentável que combina cultivos, criação de animais e florestas em uma mesma área, essas ferramentas são essenciais para planejar e gerenciar eficientemente os sistemas integrados, considerando diversos aspectos. Pela modelagem matemática, são desenvolvidos modelos que representam o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas, a dinâmica nutricional, o comportamento dos animais e o ciclo de vida das árvores, estes modelos estão sendo fundamentais para compreender as interações complexas entre os componentes do iLPF e otimizar a utilização de recursos como solo, nutrientes e água (NASCIMENTO et al, 2019a).

A modelagem matemática, especificamente utilizando técnicas de programação inteira, oferece uma abordagem eficaz para otimizar a rotação de culturas, maximizando os benefícios agrônômicos e econômicos. Ao aplicar esse método à rotação de culturas, é possível considerar diversos fatores, como os requisitos nutricionais específicos de cada cultura, as propriedades do solo, as condições climáticas e a viabilidade econômica. Em um modelo matemático de programação inteira para rotação de culturas, as variáveis de decisão representam as escolhas de quais culturas plantar em cada temporada. As restrições são formuladas para garantir que as práticas agrônômicas desejadas sejam atendidas, como a minimização da depleção de nutrientes do solo, a prevenção de doenças e pragas específicas, e a maximização da eficiência do uso da água. A função objetivo do modelo busca maximizar ou minimizar determinados indicadores, como a produtividade total, a rentabilidade econômica ou a redução do uso de insumos químicos. A programação inteira permite encontrar soluções ótimas para esses problemas complexos, considerando as restrições específicas do sistema agrícola em questão. (OLIVEIRA et al., 2017)

Na modelagem computacional, são criados softwares e sistemas de suporte à decisão que ajudam na tomada de decisões relacionadas ao manejo do iLPF, essas ferramentas possibilitam a simulação de diferentes cenários, permitindo avaliar o desempenho do sistema sob diversas condições climáticas e de manejo, além disso, contribui para a avaliação dos impactos ambientais, incluindo a qualidade do solo, emissões de gases de efeito estufa e conservação da biodiversidade. A integração de dados é outra vantagem proporcionada pela modelagem computacional, unindo informações sobre clima, solo, culturas e animais para oferecer uma visão abrangente do sistema ILPF, essa abordagem facilita a análise e a gestão eficiente, garantindo a sustentabilidade a longo prazo.

A implementação prática desse modelo envolve a coleta de dados relevantes, como características do solo, histórico de cultivos, dados climáticos e custos associados. Com base nessas informações, o modelo de programação inteira é alimentado para gerar planos de rotação de culturas que otimizam o desempenho agrônômico e econômico ao longo do tempo. A combinação de modelagem matemática com programação inteira oferece uma ferramenta valiosa para os agricultores, permitindo-lhes planejar estrategicamente a rotação de culturas, promovendo a sustentabilidade do solo e melhorando a eficiência geral do sistema agrícola.

A movimentação adequada do gado dentro do sistema iLPF é crucial para garantir a eficiência na utilização dos recursos e promover a sustentabilidade, programação linear é uma ferramenta poderosa para esta otimização. A função objetivo pode visar maximizar a produtividade da pecuária, levando em conta fatores como ganho de peso do gado e eficiência no uso das áreas do sistema, onde, as restrições relacionadas às necessidades nutricionais do gado podem ser incorporadas, considerando a composição da forragem disponível em cada área. Com base nos dados coletados, o modelo matemático de programação linear é formulado para representar as interações dinâmicas entre a movimentação do gado e as características das áreas de pastagem, este modelo deve ser ajustado e refinado continuamente com a inclusão de novos dados e informações, garantindo que ele permaneça relevante e preciso ao longo do tempo (NASCIMENTO et al, 2019b).

Os modelos de iLPF possibilitam prever rendimentos de culturas, produtividade animal e crescimento florestal, contribuindo para o planejamento estratégico da produção, ao representar e analisar as interações complexas entre lavoura, pecuária e floresta, os modelos apoiam a tomada de decisões informadas e a adaptação do sistema às mudanças ambientais e de mercado. A modelagem também desempenha um papel vital na promoção da sustentabilidade ambiental, auxiliando na avaliação do impacto ambiental do sistema iLPF e na implementação de práticas agrícolas sustentáveis, a aplicação de modelagem impulsiona a inovação tecnológica, contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas agrícolas mais eficientes.

O objetivo geral da tese é desenvolver uma modelagem matemática e computacional para otimizar a movimentação bovina em sistemas integrados Lavoura-Pecuária-Floresta, visando a sustentabilidade e a eficiência dos recursos na agricultura familiar. Já os objetivos específicos são: promover a sustentabilidade econômica e ambiental; maximizar a produtividade por meio do uso eficiente dos recursos (como solo e água); reduzir custos operacionais; evitar impactos ambientais negativos, como a compactação excessiva do solo; contribuir para a mitigação de gases de efeito estufa.

A tese inova ao propor uma modelagem matemática e computacional para a movimentação bovina em sistemas integrados de Lavoura-Pecuária-Floresta, um enfoque que busca atender às necessidades de agricultura familiar com ênfase na sustentabilidade e otimização de recursos. Esse trabalho é inédito ao abordar de maneira integrada as dinâmicas entre lavoura, pecuária e floresta, aplicando programação linear e inteira para modelar a

movimentação e a alimentação de bovinos, algo pouco explorado até então em modelos convencionais de iLPF. Além disso, a tese desenvolve uma metodologia que permite prever rendimentos e impactos ambientais, favorecendo a sustentabilidade ao reduzir o uso de insumos e melhorar a gestão de recursos como água e nutrientes. Essa abordagem computacional fornece uma ferramenta estratégica para a tomada de decisões no setor agropecuário, especialmente ao considerar variáveis ambientais e econômicas que impactam diretamente a produção sustentável e a mitigação de gases de efeito estufa.

2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL

Diversos estudos destacam a relevância de reduzir as emissões de carbono na atividade rural para enfrentar os desafios climáticos e alcançar metas de sustentabilidade, pesquisas frequentemente enfatizam a contribuição significativa do setor agrícola para as emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE), destacando a importância de estratégias que minimizem esse impacto. Isso inclui práticas agrícolas de baixo carbono, como a gestão eficiente de resíduos, o uso de energias renováveis, a adoção de práticas de cultivo de precisão e a otimização do uso de insumos, além do papel crucial da mitigação de emissões no contexto da segurança alimentar (LOPES et al, 2012).

Estudos apontam para a necessidade de equilibrar as práticas agrícolas sustentáveis com a produção de alimentos em quantidade suficiente para atender a demanda global crescente, destacando a importância de práticas que reduzam as emissões sem comprometer a produtividade. O impacto econômico da transição para atividades rurais com baixa emissão de carbono, destacando oportunidades de investimento e benefícios financeiros associados a práticas agrícolas sustentáveis. Avaliações de custo-benefício e análises de retorno sobre investimento, gerando os incentivos econômicos para a adoção dessas práticas (GLIESSMAN, 2001).

A discussão sobre políticas públicas e regulamentações que incentivem a agricultura de baixo carbono, exploradas como políticas governamentais podem desempenhar um papel crucial na promoção de práticas agrícolas sustentáveis, seja por meio de incentivos financeiros, regulações ambientais ou programas de extensão. Os benefícios ambientais, econômicos e sociais de atividades rurais com baixa emissão de carbono, porém há desafios e obstáculos à sua implementação, como a resistência à mudança, falta de conscientização e barreiras tecnológicas são exploradas como desafios a serem superados para alcançar uma agricultura mais sustentável em termos de emissões de carbono (GOMES, 2005).

Na nova revolução do setor do campo, a Agropecuária 4.0, é impulsionada pela integração de tecnologias avançadas e inovações digitais, essa abordagem visa transformar radicalmente as práticas tradicionais, promovendo eficiência, sustentabilidade e produtividade, no centro dela está a Internet das Coisas (IoT), com sensores e dispositivos conectados sendo implantados em fazendas e instalações pecuárias, formando uma rede de dispositivos que fornece dados em tempo real, abrangendo desde condições climáticas até a saúde dos animais, esse monitoramento detalhado oferece uma base sólida para a tomada de decisões informada (DOS SANTOS et al, 2022; GONZAGA et al., 2023; MASSUHÁ et al, 2017).

A análise de dados desempenha um papel crucial, utilizando técnicas de Big Data para processar as vastas quantidades de informações coletadas, possibilitando a identificação de padrões, previsão de tendências e otimização de operações, contribuindo para a eficiência na gestão rural (LACHMAN et al, 2022). Os algoritmos desta tecnologia analisam dados históricos e em tempo real, fornecendo avaliações importantes para melhorar a eficiência operacional, que pode desde otimizar o plantio e a colheita até prever doenças e gerenciar rebanhos (FERRAZ et al, 2017).

Por outro lado, são desenvolvidas também técnicas para mitigação dos problemas da agropecuária, que é o caso dos sistemas integrados Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) é uma alternativa adotada entre os elementos tecnológicos disponíveis, onde se destacam a interação entre a produção agrícola, pecuária e atividade florestal, apresentando benefícios sociais, econômicos e ambientais (DIAS et al, 2021). Essa tecnologia foi desenvolvida, no final dos anos 1990 no Projeto de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da Embrapa, que introduziu pastagens utilizando o Sistema Santa Fé, que mistura a produção agrícola anual com ração para evitar perdas de produtividade anual da agricultura, garantindo uma produção pecuária fora de época de alta qualidade (COBUCCI et al, 2001).

A literatura sobre Sistemas Integrados de Lavoura, Pecuária e Floresta abrange uma variedade de aspectos relacionados a essa prática agrícola sustentável, refletindo a crescente importância dessa abordagem na agricultura contemporânea, estudos destacam os benefícios ambientais do iLPF, ressaltando a capacidade desse sistema em promover a conservação do solo, reduzir a erosão e melhorar a biodiversidade, o que contribui para a sustentabilidade a longo prazo (LEITE et al, 2010; TONINI et al, 2016). Além disso, aborda questões relacionadas à produtividade agrícola, evidenciando como a integração de diferentes culturas, práticas pecuárias e florestais podem resultar em ganhos de eficiência e diversificação da produção, estudos específicos exploram a otimização do uso de recursos, incluindo água e nutrientes do solo, por meio de modelos matemáticos e simulações computacionais (OLIVEIRA, 2017).

Outro ponto de destaque sobre o iLPF é a gestão integrada de pragas e doenças, pesquisas demonstram como a combinação de atividades por consórcio, sucessão ou rotação pode reduzir a incidência de pragas, minimizando a necessidade de produtos químicos, alinhando a produção a práticas agrícolas mais sustentáveis (FERREIRA et al, 2019). A análise econômica também tem sido objeto de estudo, destacando os impactos financeiros e a viabilidade econômica desse sistema, avaliações de custo-benefício e análises de retorno sobre investimento oferecem um panorama otimista para proprietários rurais e decisores políticos que geralmente optam pela adoção do iLPF (BALBINO et al, 2011). Sendo relevante citar, a adaptação do iLPF a diferentes contextos regionais e climáticos, diversos estudos exploram como as práticas de manejo e as escolhas de culturas podem variar para maximizar os benefícios do iLPF em diferentes regiões (FREIRE et al, 2022). Embora sempre sejam destacados os benefícios do iLPF, alguns estudos também abordam desafios e obstáculos à sua implementação, principalmente no que se relaciona as questões relacionadas à gestão integrada e à aceitação por parte dos agricultores (GARRETT et al, 2019).

Sobre modelagem matemática e computacional nos Sistemas iLPF, há uma gama significativa de estudos que enfatizam a importância dessas ferramentas para a otimização, planejamento e gestão eficiente desses sistemas agropecuários sustentáveis. Os estudos frequentemente destacam a aplicação de modelos matemáticos para a previsão de rendimentos de culturas, produtividade animal e crescimento florestal. Essas abordagens oferecem ferramentas valiosas para a tomada de decisões estratégicas e o planejamento a longo prazo e curto prazo, permitindo aos proprietários rurais antecipar desafios e identificar oportunidades para melhorias, a otimização do uso de recursos, como água, nutrientes do solo e insumos agrícolas, é consistentemente nesses estudos. (NASCIMENTO et al, 2020).

De acordo com Cerqueira et al. (2020), os modelos computacionais desempenham um papel crucial na simulação de diferentes cenários e na identificação de práticas mais eficientes, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental e econômica do iLPF, outro ponto destacado é a capacidade dos modelos em analisar a interação complexa entre os componentes do sistema, incluindo lavoura, pecuária e floresta, isso proporciona uma compreensão mais profunda das sinergias entre esses elementos e auxilia na elaboração de estratégias de manejo integrado.

A literatura também enfatiza a contribuição da modelagem para a gestão de riscos, permitindo a avaliação de fatores climáticos, epidemiológicos e econômicos, essa capacidade de antecipar e mitigar riscos é crucial para a resiliência e sustentabilidade do sistema iLPF. Os estudos são revisados frequentemente e abordam as inovações tecnológicas, destacando como a aplicação de modelagem matemática e computacional impulsionando o desenvolvimento de tecnologias avançadas, como sistemas de sensoriamento remoto, monitoramento de culturas e automação agrícola, contribuindo para a modernização e eficiência do iLPF, também são reconhecidos desafios, como a necessidade de dados precisos para alimentar os modelos e a importância de considerar as variabilidades regionais. (OLIVEIRA et al, 2023; FERREIRA et al, 2021).

Costa et al. (2012) argumenta que a programação linear é frequentemente empregada para resolver problemas de alocação de recursos, maximizando ou minimizando uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições, tornando-se uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões. Neste contexto, a aplicação da programação linear para soluções de problemas modelados matematicamente oriundos dos iLPF, ganha destaque para otimizar o planejamento e a gestão eficientes desses sistemas agrícolas complexos. Estudos têm explorado a aplicação da programação linear para otimizar a alocação de terras para diferentes atividades, como cultivos agrícolas, atividade pecuária e destinadas à floresta, contribuindo para maximizar a produtividade global do sistema, considerando as interações entre os componentes.

Vale destacar a programação linear como uma ferramenta eficaz na maximização dos rendimentos econômicos, levando em conta os custos associados às diferentes práticas rurais, sendo crucial para garantir a viabilidade econômica do sistema, considerando as flutuações nos preços dos produtos agropecuários e florestais e as variações nos custos de insumos. Ainda, a programação linear é aplicada para otimizar o uso de recursos hídricos, fertilizantes e outros insumos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a minimização do desperdício e a eficiência na utilização de recursos são objetivos frequentes na formulação de modelos de programação linear para sistemas integrados.

Estudos específicos também abordam a adaptação da programação linear a diferentes contextos regionais, levando em consideração variações climáticas e características específicas do solo, ressaltando a flexibilidade dessa abordagem na modelagem de sistemas agrícolas que podem variar significativamente em diferentes localidades, não menos importante citar que alguns trabalhos exploram os desafios associados à modelagem por programação linear em sistemas agrícolas dinâmicos, destacando a necessidade de considerar incertezas e variações sazonais para obter resultados mais realistas (NETO et al., 2021).

A modelagem matemática também é utilizada para lidar com questões relacionadas à gestão de riscos na agricultura familiar, considerando variáveis climáticas, preço de commodities e outras incertezas. A programação linear permite aos agricultores explorar estratégias de tomada de decisão que minimizem os riscos financeiros e operacionais associados, contribuindo para a viabilidade econômica do iLPF, um fator crucial para a sustentabilidade a longo prazo da agricultura familiar. A literatura também aborda desafios específicos enfrentados pela agricultura familiar na implementação de sistemas integrados, como a disponibilidade de capital inicial, acesso a crédito e capacitação técnica, onde os modelos matemáticos e computacionais podem ser utilizados para avaliar estratégias de mitigação dessa implementação. É importante notar que a literatura ainda apresenta lacunas, especialmente em relação à aplicabilidade prática desses modelos em contextos específicos de agricultura familiar, pesquisas podem se concentrar em validar esses modelos por meio de estudos de caso e colaborações diretas com agricultores familiares, garantindo que as soluções propostas sejam adaptáveis e eficazes em condições do mundo real (SOUZA et al, 2019).

2.1 Fundamentação Matemática e Computacional

A Programação Linear (PL) é uma poderosa técnica matemática aplicada extensivamente na modelagem matemática e computacional para resolver problemas de otimização. Essa abordagem permite a representação sistemática e precisa de relações entre variáveis e restrições, transformando problemas do mundo real em formulações matemáticas que podem ser resolvidas eficientemente por algoritmos específicos. A programação linear é amplamente utilizada em diversas áreas, como logística, economia, engenharia, planejamento de produção e muitas outras, proporcionando uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões baseada em evidências quantitativas. Ao formular problemas de otimização linearmente, é possível explorar a interseção entre a teoria matemática, a modelagem computacional e a resolução eficiente, promovendo soluções ótimas ou aproximadas para desafios complexos enfrentados em ambientes práticos e multidisciplinares.

2.2 Programação Linear

Do ponto de vista matemático, o termo otimização (também conhecido como programação matemática) refere-se a problemas em que se procura minimizar ou maximizar uma função, escolhendo sistematicamente valores de variáveis reais ou inteiros em um conjunto viável. Ao otimizar as decisões, é necessário escolher a política de produção mais eficaz que atenda aos objetivos e às condições viáveis. Decisões baseadas no julgamento e na intuição podem ser apropriadas quando o problema envolve poucos fatores e as relações entre eles são claras. Porém, quando esse número começa a aumentar, é necessário recorrer a modelos matemáticos capazes de representar ou simular situações da vida real. A programação linear (PL) é uma das técnicas de otimização mais importantes e amplamente utilizadas e é um subcampo da programação matemática. A simplicidade do modelo e a utilização do método Simplex, desenvolvido por Dantzig em 1963 e programável em computador, tornam sua aplicação muito acessível. Esta técnica é amplamente utilizada porque pode lidar com problemas de decisão grandes e complexos.

Matematicamente, a Programação Linear é um tipo de problema de otimização que busca maximizar ou minimizar uma função linear, conhecida como função objetivo. Essa função é representada por uma equação ou inequação linear, e deve respeitar um conjunto de restrições lineares (ANDRADE et al., 2010). Essas restrições normalmente são limitações dos recursos disponíveis ou requisitos que devem ser atendidos obrigatoriamente no problema. As restrições do modelo delimitam uma área conhecida como conjunto de soluções viáveis, e a solução viável mais adequada é aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo, sendo chamada de solução ótima do problema (MACAMBIRA et al., 2016).

De acordo com os princípios matemáticos, o problema geral de Programação Linear pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar (ou Minimizar) } c^T x \\ & \text{Sujeito a: } Ax \leq b \\ & \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

Em que: $c, x \in \mathbb{R}^n$, $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$. Observe-se que o sistema de desigualdades lineares $Ax \leq b$ é equivalente a: $Ax + z = b$, $z \geq 0$ (z é a variável de folga). Não menos importante as restrições lineares $Ax \leq b, x \geq 0$ definindo geometricamente um poliedro convexo. Dado que a função objetivo é linear, qualquer máximo local é automaticamente um máximo global, e a solução ótima só pode acontecer em um ponto da fronteira do conjunto de soluções viáveis.

Há duas situações em que pode não ser possível encontrar uma solução ótima. Se as restrições se contradizem, a região factível será vazia e não haverá solução ótima, uma vez que não existirá solução possível. Neste caso, considera-se que o PL não é viável. De outra forma, o poliedro pode não ter limite na direção da função objetivo, resultando na ausência de uma solução ótima, já que soluções extremamente grandes da função objetivo podem ser alcançadas, caracterizando o problema como ilimitado. Em relação a essas duas condições patológicas (que são muitas vezes eliminadas devido às limitações dos recursos inerentes ao problema em questão, como mencionado acima), o ponto ótimo sempre é alcançado em um vértice do poliedro. No entanto, o ótimo nem sempre é singular: pode haver um conjunto de soluções ótimas que abrangem uma aresta ou face do poliedro, ou até mesmo o poliedro inteiro (Isso pode acontecer se a função objetivo for uniformemente igual a uma constante).

O algoritmo simplex resolve problemas de programação linear (PL) encontrando uma solução viável no vértice do poliedro e, em seguida, percorrendo os vértices sucessivos do poliedro que têm valores mais altos (ou mais baixos) da função objetivo até encontrar o máximo (ou mínimo). Apesar de ser altamente eficiente na prática, e de garantir a descoberta de um ótimo global sob certas condições para evitar ciclos, este algoritmo é fraco em situações extremas: é viável criar um problema de programação linear no qual o método Simplex realiza um número exponencial de passos em relação ao tamanho do problema. De fato, houve um período de incerteza sobre se os problemas de programação linear eram "NP-completos" ou se podiam ser resolvidos em tempo polinomial.

Em 1979, Khachiyan propôs o primeiro algoritmo de programação linear em tempo polinomial no pior caso. Baseou-se no método do elipsoide para otimização convexa. No entanto, a eficiência prática do algoritmo de Khachiyan é decepcionante, já que o método Simplex é geralmente mais eficiente. Sua maior importância reside no estímulo à pesquisa de métodos de pontos interiores. Diferentemente do Simplex, que progride apenas ao longo dos pontos da fronteira da região factível, os métodos de pontos interiores podem se deslocar pelo interior dessa região. No ano de 1984, Karmarkar lançou seu método projetivo, que foi o primeiro algoritmo a demonstrar um bom desempenho tanto teoricamente como na prática. Sua complexidade no pior caso é polinomial e os problemas práticos demonstraram sua eficiência em comparação com o Simplex. A partir do método de Karmarkar, foram propostos e analisados diversos outros métodos de pontos interiores. O Método Preditor-Corretor é amplamente reconhecido por sua eficácia na prática, apesar de ser pouco compreendido na teoria. Os especialistas ressaltam a eficácia das implementações bem sucedidas dos métodos baseados no Simplex e nos Pontos Interiores é comparável na resolução de problemas de PL. A seguir, apresentaremos o algoritmo Simplex, passo a passo, em sua forma conceitual.

2.3 Algoritmo Simplex

Para cada desigualdade, devemos introduzir as variáveis de folga:

1. Crie uma tabela para cálculos, insira os coeficientes de todas as variáveis com seus respectivos sinais, e na última linha insira os coeficientes da função objetivo transformada;
2. Crie sua primeira solução básica. Normalmente, você atribui um valor zero à variável original e encontra o valor positivo da variável Slack;
3. Como próxima variável a entrar na base, escolha a variável não-base que mais contribui para a inclinação da função objetivo na última linha (ou seja, tem o maior valor negativo). Se os coeficientes de todas as variáveis nesta linha forem zero ou positivos, a solução atual é ótima. Se uma dessas variáveis tiver coeficiente zero, significa que ela

pode ser introduzida na base sem aumentar o valor da função objetivo. Isso significa que existe uma solução ótima com o mesmo valor da função objetivo;

4. Para selecionar variáveis a sair da base, é necessário realizar os seguintes passos:

Divida os elementos da última coluna pelos elementos positivos correspondentes da coluna de variáveis que deseja incluir na base. Se não houver elementos positivos nesta coluna, a solução é ilimitada e o processo deve ser interrompido;

5. O quociente mínimo indica uma equação na qual cada variável fundamental deve ser removida e assim se torna uma variável não fundamental;

6. Usando operações válidas com as linhas da matriz, transformar o quadro de cálculos de forma a encontrar a nova solução básica. A coluna da nova variável básica deverá se tornar um vetor identidade, onde o elemento 1 aparece na linha correspondente à variável que está sendo anulada;

7. Retornar ao passo 4 para dar início a outra iteração.

Observe que inicialmente são atribuídos valores zero às variáveis, o que estaria longe da solução. Depois, aumentamos gradativamente a variável que tem maior influência positiva no resultado da função objetivo, ou seja, a variável com maior coeficiente. Isso é o que chamamos de “variável ativa” e tem uma grande importância inicial porque é a variável mais “benéfica” de todas, ou seja, aquela que nos aproxima da otimização. À medida que este valor aumenta, o algoritmo verifica todas as restrições até que uma delas não seja satisfeita. Esta restrição é chamada de “restrição de atividade”. Nesta fase é conhecido o valor máximo da variável ativa.

O procedimento passa então para a próxima variável, aproximando-nos da solução exata, sempre levando em consideração o valor máximo que a primeira variável pode atingir. A cada uma dessas alterações, o Simplex transforma todos os coeficientes (inclusive os da função objetivo) de acordo com as restrições encontradas nas sucessivas restrições operacionais. O procedimento é repetido até que um aumento nas variáveis apareça como uma diminuição no total resultante. Isto é determinado pelo sinal negativo na frente dos coeficientes da função objetivo. Por fim, os valores desejados serão conhecidos graças ao sistema de equações derivado do problema original.

2.4 Programação Inteira

A Programação Inteira (PI) é uma área da otimização matemática que lida com problemas nos quais as variáveis de decisão são restritas a assumir apenas valores inteiros, essa restrição adicional torna os problemas de programação inteira mais desafiadores, mais difíceis de resolver do que problemas de programação linear convencionais. Existem diferentes tipos de problemas de PI, incluindo programação inteira linear e programação inteira não linear, porém a programação inteira linear é a forma mais comum e estudada, um exemplo típico de problema de programação inteira linear é o problema da mochila, onde o objetivo é otimizar a seleção de itens, cada um associado a um valor e peso, para maximizar o valor total mantendo-se dentro de uma capacidade de peso fixa (GARFINKEL et al, 1972).

Os problemas de PI oferecem uma modelagem matemática poderosa para situações do mundo real em que as decisões precisam ser feitas com base em escolhas discretas, podem surgir em várias áreas, como logística, planejamento de produção, escalonamento de tarefas, design de rede, entre outros. Existem várias técnicas para resolver problemas de programação inteira, como o método Branch and Bound (B&B) que exploram sistematicamente o espaço de solução, dividindo-o em subconjuntos menores e descartando ramos que não podem levar à

solução ótima, esses algoritmos podem ser computacionalmente intensivos e impraticáveis para problemas de grande escala (BALAKRISHNAN et al, 1991).

Existem também solucionadores especializados em programação inteira, como CPLEX, Gurobi e SCIP, que implementam algoritmos avançados e técnicas de otimização para encontrar soluções eficientes para uma variedade de problemas de Programação Inteira. Ainda em problemas mais complexos, algoritmos heurísticos e meta-heurísticas, como algoritmos genéticos, otimização por enxame de partículas e otimização por colônia de formigas, podem ser utilizados para encontrar soluções aproximadas em um tempo razoável, essas abordagens sacrificam a garantia de otimalidade em troca de eficiência computacional (KU et al, 2016).

2.5 Programação Inteira Mista

A Programação Linear Inteira Mista (MIXP), por Alves (2000), é uma extensão da Programação Linear que lida com variáveis de decisão que podem assumir valores inteiros, contínuos ou uma combinação de ambos. Em um problema de MIXP, algumas variáveis são restritas a valores inteiros (0, 1, 2, ...) enquanto outras podem assumir valores contínuos.

A formulação geral de um problema de Programação Linear Inteira Mista é dada por:

$$\text{Maximizar (ou Minimizar) } c^T x$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} Ax &\leq b \\ A_{eq}x &= b_{eq} \\ l &\leq x \leq u \end{aligned}$$

$x_i \in \mathbb{Z}$, para algumas variáveis x_i

Onde:

x é o vetor de variáveis de decisão.

c é o vetor de coeficientes da função objetivo.

A é a matriz de coeficientes das restrições de desigualdade.

b é o vetor de termos constantes nas restrições de desigualdade.

A_{eq} é a matriz de coeficientes das restrições de igualdade.

b_{eq} é o vetor de termos constantes nas restrições de igualdade.

l e u são vetores de limites inferiores e superiores, respectivamente.

A adição da restrição $x_i \in \mathbb{Z}$ para algumas variáveis x_i indica que essas variáveis devem assumir valores inteiros. Problemas de MIXP surgem em diversas aplicações do mundo real, como no planejamento de produção, design de rede, escalonamento de projetos e muitos outros. A MIXP é mais desafiadora de ser resolvida computacionalmente do que problemas de Programação Linear Pura devido à natureza discreta das variáveis, métodos como Programação Linear Inteira e algoritmos de Branch-and-Bound são frequentemente utilizados para abordar esses problemas (CHAVES et al., 2018).

2.6 Programação Binária

A programação binária é uma técnica que utiliza otimização combinatória onde as variáveis de decisão são restritas a assumir apenas dois valores (0 ou 1), ou sejam, escolhas binárias, como sim/não. Quando incorporamos variáveis binárias em um problema de programação linear, a estrutura geral do modelo se mantém, mas as restrições e a função objetivo podem ser ajustadas para acomodar a natureza discreta das variáveis, a resolução de problemas de programação binária muitas vezes envolve técnicas especializadas, como algoritmos de otimização inteira ou heurísticas específicas para lidar eficientemente com a natureza discreta das variáveis (DELGADO et al., 2013).

2.7 Sistema Integrado Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)

A integração lavoura-pecuária- floresta (iLPF), tratada por Balbino et al. (2012), é uma estratégia de produção que integra cultivos agrícolas, atividades pecuárias e plantações florestais em uma mesma área, pode ser feita em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, integrando harmoniosamente as suas atividades de forma que haja benefício mútuo entre elas. Os benefícios dos iLPF incluem: diversificação de fontes de renda, Otimização e intensificação da ciclagem de nutrientes no solo, Melhoria da qualidade e conservação das características produtivas do solo, Manutenção da biodiversidade e sustentabilidade da agropecuária, Melhoria do bem-estar animal em decorrência do conforto térmico e melhor ambiência, redução de impactos ambientais, adaptação às mudanças climáticas, sustentabilidade a longo prazo, aumento da produção, maior eficiência de utilização de recursos naturais, redução na pressão pela abertura de novas áreas com vegetação nativa, redução da sazonalidade do uso da mão de obra, geração de empregos diretos e indiretos, flexibilidade e fácil adaptação a diferentes realidades produtivas. Existem quatro possíveis modalidades no iLPF:

- Integração lavoura-pecuária (iLP) ou sistema agropastoril: É o sistema de produção que integra os componentes agrícola e pecuário, em rotação, ou consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos.
- Integração lavoura-floresta (iLF) ou sistema silviagrícola: É o sistema de produção que integra os componentes florestal e agrícola pela consorciação de espécies arbóreas e agrícolas perenes ou a consorciação de espécies arbóreas e agrícolas (anuais) em rotação e/ou sucessão.
- Integração pecuária- floresta (iPF) ou sistema silvipastoril: É o sistema de produção que integra os componentes pecuário (pastagem e animal) e florestal, em consórcio.
- Integração lavoura-pecuária- floresta (iLPF) ou sistema agrossilvipastoril: É o sistema de produção que integra os componentes agrícola e pecuário, em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos, em consórcio com o componente florestal.

Dentre os principais entraves identificados para a adoção do sistema iLPF estão a necessidade de nivelamento do conhecimento entre os pesquisadores bem como a formação de consultores, necessidade de interação e capacidade interna para trabalhar com iLPF, necessidade de formação de multiplicadores, insuficiente integração institucional com o envolvimento de agentes (instituições financiadoras, gestores públicos, Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar (MDA), Ministério do Meio Ambiente e Mudança Climática (MMA), agentes de

transferência de tecnologias pública e privados e outros), carência de ações de comunicação e marketing. É necessário que as tecnologias e conhecimentos sobre iLPF já existentes em várias instituições de Ensino e Pesquisa sejam rapidamente apropriadas pelos técnicos, principalmente os da Extensão rural pública e privada (MANZATTO et al., 2019).

A integração dos sistemas de produção alimentar, pecuária e florestal constitui um novo modelo para a agricultura brasileira, estes sistemas têm o potencial de aumentar a produtividade das culturas de cereais, carne, laticínios e madeira, ao mesmo tempo que conservam os recursos naturais. No Brasil, os resultados obtidos com os sistemas integrados de lavoura, pecuária e florestas são animadores, pois têm demonstrado melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sem descuidar os benefícios ambientais e sociais. Contudo, a adoção deste conjunto estratégico de tecnologias continua baixa, isto ocorre em parte porque os vários modelos de sistemas iLPF são mais complexos e exigem investimentos significativos para implementar arranjos de produção. No entanto, esses investimentos podem ser amortizados, como o plano ABC cria um limite de crédito específica para o iLPF, com maior período de carência (PEREIRA et al., 2019).

O iLPF contribui para aumentar a área cultivada com grãos e com florestas plantadas e também para aumentar a produtividade animal, o que pode ser feito através da melhoria do potencial produtivo de algumas áreas podem ser adicionadas com a recuperação de áreas degradadas ou em processo de degradação, sem necessidade de desmatar novas áreas de florestas nativas. A coexistência de sistemas, muito bem estruturados, é um dos fatores que contribuem, de forma determinante, para que o conjunto de tecnologias estratégicas denominado iLPF seja adotado para aumentar a produtividade e competitividade da agropecuária brasileira. Dessa forma, se visualiza que, em um futuro próximo, a convivência sustentável da atividade agrícola, pecuária e florestal seja a regra da agropecuária brasileira e não uma exceção. Em uma visão futurista, é importante ter consciência de que será necessário expandir a produção de alimentos, fibras e biocombustíveis no mundo. Porém, não basta apenas aumentar a produção, a qual abrange dimensões técnico-econômicas, sociais e ambientais, pois essa expansão da oferta de alimentos deverá ocorrer com respeito aos critérios da sustentabilidade. Portanto, impedir que as fronteiras agrícolas avancem para as florestas nativas, por exemplo, utilizando sistemas iLPF e substituindo pastagens de baixa produtividade (biodegradáveis) por outros sistemas agrícolas para produção de alimentos, fibras e energia, é uma medida importante para alcançar essa meta (TOMAZ et al., 2017).

2.8 Plano ABC

O plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) do governo brasileiro é uma iniciativa estratégica, lançada em 2010, que visa promover práticas agrícolas sustentáveis, os principais objetivos do programa são promover práticas agrícolas sustentáveis, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa associadas às atividades agropecuária e incentivar a utilização eficiente dos recursos naturais. Um aspecto fundamental do plano ABC é incentivar a adoção de práticas agropecuárias que ajudem a mitigar as alterações climáticas, isto inclui estratégias de gestão sustentável da terra destinadas a melhorar a estrutura do solo e reduzir a erosão. Além disso, favorece a fixação biológica do nitrogênio, reduzindo assim a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos, afetando positivamente o equilíbrio ecológico (WANDER et al., 2016).

A plano ABC foi encerrado em 2020, alcançou resultados que superaram as expectativas, reduzindo quase 170 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente em 52 milhões de hectares de terra, superando a meta em 46,5%. Em 2020 foi lançado o plano ABC+ que também terá a mesma duração, se encerrando em 2030, ressalta-se que os

valores identificados como objetivos deste são complementares aos já alcançados pelo plano ABC (RODRIGUES, 2022).

Ao incentivar o uso eficiente dos recursos naturais na agropecuária, o plano ABC é consistente com os princípios do desenvolvimento sustentável e da responsabilidade ambiental, esta abordagem não só reduz os custos operacionais para os agricultores, mas também ajuda a reduzir a pegada de carbono associada às atividades agrícolas. O plano ABC representa a resposta proativa do governo brasileiro à necessidade de uma atividade rural sustentável que equilibre o desenvolvimento econômico e a proteção ambiental. Ao incentivar práticas de baixo carbono, o programa procura encontrar um equilíbrio crítico entre a produção agrícola e a conservação dos recursos naturais, promovendo assim um setor agrícola mais resiliente e responsável.

A integração de diferentes atividades agrícolas por meio da tecnologia dos sistemas integrados lavoura, pecuária e florestal (iLPF) é a principal abordagem proposta pelo plano ABC, esta abordagem não só diversifica a produção, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental ao integrar a agricultura, a pecuária e a silvicultura na mesma área por meio de sucessão, rotação ou consórcio. A restauração de pastagens degradadas também faz parte do objetivo do programa, que não é apenas aumentar a produtividade, mas também restaurar ecossistemas danificados. O plano ABC reconhece a importância de práticas agrícolas sábias e, portanto, fornece assistência técnica e formação aos agricultores para lhes permitir implementar eficazmente as estratégias recomendadas (DE OLIVEIRA et al., 2016).

2.9 A Agricultura Familiar

A Agricultura Familiar (AF) representa um pilar essencial nas comunidades rurais, onde famílias dedicam-se à gestão e operação de suas propriedades agrícolas, as decisões relacionadas à produção de alimentos, criação de animais e gestão dos recursos são tomadas pelos próprios membros familiares, que na maioria das vezes residem nas propriedades rurais. A AF destaca-se por sua preocupação com a sustentabilidade, a maioria das famílias tendem a adotar práticas agrícolas de baixo impacto ambiental, como agricultura orgânica e agroecologia, visando o uso responsável dos recursos naturais e a conservação do solo e da água (NEVES, 2007).

O número de cabeças de gado na agricultura familiar pode variar significativamente dependendo de vários fatores, como o tipo de criação, a região geográfica, os recursos disponíveis e os objetivos do agricultor. A agricultura familiar engloba uma ampla gama de práticas e escalas, desde pequenas propriedades que mantêm apenas alguns animais para subsistência até operações um pouco maiores que podem comercializar seus produtos, a criação de gado pode ser uma parte importante da agricultura familiar, seja para produção de carne, leite ou ambos. Em propriedades menores, é comum encontrar rebanhos com dezenas de cabeças de gado, enquanto propriedades maiores podem ter centenas de animais.

Este tipo de agricultura, que é caracterizada pela diversidade de atividades, não se limita apenas ao cultivo de alimentos, estendendo-se para a criação de animais e outras práticas complementares como as florestais, por exemplo, essa variedade não apenas contribui para a segurança alimentar, mas também desempenha um papel vital no desenvolvimento econômico e social local. Governos em muitas partes do mundo implementam políticas e programas específicos para apoiar esta atividade, devido a sua importância, reconhecendo o papel crucial que desempenham na segurança alimentar e no desenvolvimento rural, porém existem muitos desafios, como a falta de recursos financeiros e questões relacionadas à sucessão familiar (MARQUES et al., 2016).

Levando-se em conta alguns objetivos dos iLPF, como a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais, e ainda a adoção de pecuária e atividade floresta, além da atividade

agrícola, temos naturalmente um processo interativo entre os iLPF e a AF, podendo utilizar a integração Lavoura-Pecuária-Floresta como forma de ampliar as opções do agricultor familiar em busca de uma melhor lucratividade para a propriedade, embora haja uma necessidade de uma mão de obra mais qualificada e valores de custos maior, o aumento dos lucros líquidos compensam o investimento.

3. AGROPECUÁRIA ARGENTINA

Neste tópico traremos um panorama geral sobre a agropecuária argentina, com dados obtidos através de uma parceria com o Professor e Pesquisador José Omar Plevich da Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina. O presente estudo também foi baseado nos trabalhos de Delgado et al., 2021.

3.1 Espécies Mais Comuns para iLPF

Na Argentina, as raças de gado mais comuns em sistemas silvipastoris são principalmente aquelas adaptadas tanto à produção de carne bovina quanto às condições climáticas e de manejo do país. As raças mais utilizadas incluem a Hereford, que é uma das mais populares devido à sua adaptabilidade, resistência e qualidade da carne, sendo comumente usada em sistemas de pastagem e silvipastoris. A Angus também é amplamente conhecida por sua excelente qualidade de carne e adaptabilidade a diferentes sistemas de produção, incluindo os silvipastoris. O Brangus, resultado do cruzamento entre Angus e Brahman, combina a qualidade da carne do Angus com a resistência ao calor e a doenças do Brahman, o que a torna ideal para sistemas silvipastoris em climas mais quentes. De forma semelhante, o Braford, um cruzamento entre Hereford e Brahman, é valorizado por sua resistência e adaptabilidade a diferentes condições ambientais. Por fim, a raça nativa Criollo Argentino é muito resistente e bem adaptada às condições locais, sendo assim adequada para sistemas silvipastoris. Essas raças são escolhidas por sua capacidade de produzir carne de alta qualidade, adaptando-se às condições específicas dos sistemas silvipastoris, onde a interação entre árvores, gramíneas e gado é fundamental para a sustentabilidade e produtividade do sistema.

Nos sistemas silvipastoris da Argentina, uma variedade de espécies de plantas herbáceas é utilizada para fornecer forragem de alta qualidade ao gado e melhorar a sustentabilidade do sistema. Entre as espécies mais comuns, destaca-se o Bokgrass (*Dactylis glomerata*), uma gramínea perene que se adapta bem a diferentes tipos de solo e condições climáticas, oferecendo um bom desempenho em termos de produção de forragem. A alfafa (*Medicago sativa*) é outra espécie importante, sendo uma leguminosa perene altamente valorizada pelo seu alto teor de proteína e pela capacidade de fixar nitrogênio no solo, o que melhora a fertilidade. O trevo branco (*Trifolium repens*), também uma leguminosa perene, é amplamente utilizado em sistemas silvipastoris por seu valor nutricional e capacidade de melhorar a qualidade do solo. A festuca alta (*Festuca arundinacea*), uma gramínea perene que tolera bem a sombra e condições adversas, é ideal para uso sob a cobertura de árvores. Outra espécie comumente usada é o azevém anual (*Lolium multiflorum*), uma gramínea anual de crescimento rápido e altamente palatável, frequentemente utilizada em misturas de pastagens. O lótus (*Lotus corniculatus*), uma leguminosa perene, é valorizado por sua capacidade de crescer em solos pobres e sua alta resistência a condições adversas, além de seu bom valor nutricional. O trevo vermelho (*Trifolium pratense*), outra leguminosa perene, é utilizado em sistemas silvipastoris por sua alta qualidade de forragem e capacidade de melhorar a fertilidade do solo. Por fim, a cebadilla criolla (*Bromus catharticus*), uma gramínea perene nativa da América do Sul, adapta-se bem a diferentes condições de solo e clima, fornecendo forragem nutritiva. Essas espécies são selecionadas por sua capacidade de crescer sob a sombra parcial das árvores, seu valor nutricional para o gado e sua contribuição para a sustentabilidade do sistema por meio da melhoria da qualidade do solo e da biodiversidade do ecossistema.

Nos sistemas silvipastoris da Argentina, uma variedade de espécies de plantas lenhosas é utilizada para proporcionar benefícios como sombra, proteção contra o vento, melhoria da qualidade do solo e produção de madeira. Entre as espécies mais comuns, o eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é amplamente utilizado devido ao seu rápido crescimento e à capacidade de

produzir madeira de alta qualidade, além de fornecer sombra e proteção contra o vento para o gado. O álamo (*Populus* spp.) é outra espécie popular, conhecida pelo rápido crescimento e produção de madeira, além de proporcionar sombra e melhorar o microclima para a pastagem. As acácias (*Acacia* spp.) são valorizadas por sua capacidade de fixar nitrogênio no solo, o que melhora a fertilidade, além de fornecer sombra e servir como fonte de forragem. O pinheiro (*Pinus* spp.) é principalmente utilizado para a produção de madeira e resina, mas também oferece sombra e proteção contra o vento. O algarrobo (*Prosopis* spp.), uma espécie nativa altamente resistente a condições áridas, é valorizado por sua capacidade de melhorar a fertilidade do solo por meio da fixação de nitrogênio, além de fornecer sombra e frutos que podem servir como suplemento alimentar para o gado. O salgueiro (*Salix* spp.), utilizado em áreas com alta disponibilidade de água, é apreciado pelo rápido crescimento e pela capacidade de estabilizar os solos e evitar a erosão, além de fornecer sombra e melhorar o microclima. A grevillea (*Grevillea robusta*), embora não seja nativa, é usada em alguns sistemas silvipastoris por seu rápido crescimento e produção de madeira, além de oferecer sombra e proteção contra o vento. Por fim, o quebracho (*Schinopsis* spp.), uma espécie nativa altamente resistente, é utilizado para a produção de madeira e fornecimento de sombra em sistemas silvipastoris. Essas espécies lenhosas são selecionadas por sua capacidade de adaptação às condições locais, por sua contribuição para a sustentabilidade do sistema e pelos diversos benefícios que oferecem ao gado e ao ecossistema em geral.

3.2 O Plantio Direto

O plantio direto é uma prática agrícola amplamente adotada na Argentina, e o país é considerado um líder mundial em sua implementação. Nos últimos anos, essa técnica tem sido utilizada em mais de 90% da área cultivada no país, transformando a agricultura argentina e oferecendo inúmeros benefícios econômicos e ambientais. Entre os principais benefícios do plantio direto na Argentina, destaca-se a conservação do solo, que reduz significativamente a erosão ao manter a cobertura vegetal, protegendo assim a estrutura do solo e melhorando sua capacidade de retenção de água. Além disso, o plantio direto melhora a fertilidade do solo ao não perturbar sua camada superficial, o que favorece a atividade biológica e a estrutura do solo, contribuindo para uma fertilidade duradoura. Outro benefício importante é a redução de custos, pois essa técnica diminui a necessidade de mão de obra mecânica intensiva, reduzindo os custos com combustível e manutenção de maquinário. O plantio direto também promove um gerenciamento eficiente da água, melhorando a infiltração e a retenção de água no solo, o que é crucial em regiões com chuvas variáveis. Além disso, a técnica contribui para a mitigação da mudança climática ao reduzir a necessidade de lavoura e manter a cobertura constante do solo, ajudando no sequestro de carbono e na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Na Argentina, mais de 90% da área agrícola utiliza plantio direto, o que representa aproximadamente 30 milhões de hectares. Essa técnica é aplicada em uma ampla variedade de culturas, incluindo soja, milho, trigo e girassol, sendo amplamente adotada nas principais regiões agrícolas do país, como a Pampa Húmeda, além de outras áreas. Contudo, apesar da alta adoção, o plantio direto enfrenta desafios, como a necessidade de um manejo adequado de pragas e ervas daninhas e a rotação de culturas para evitar problemas de monocultura. No entanto, a pesquisa e a inovação continuam a aprimorar as técnicas de plantio direto, garantindo sua sustentabilidade e eficácia a longo prazo. Em resumo, o plantio direto é uma prática consolidada na Argentina, com uma adoção maciça que transformou a agricultura do país, oferecendo benefícios significativos para a produtividade e a sustentabilidade agrícola.

3.3 Sistemas de Engorda de Gado

Os sistemas de engorda utilizados na Argentina variam conforme a região, o tamanho da fazenda, os recursos disponíveis e os objetivos de produção dos produtores. Um dos sistemas mais tradicionais é a engorda a pasto, também conhecida como sistema extensivo, onde os animais são criados e engordados em pastagens naturais ou plantadas. Esse método, amplamente utilizado em muitas regiões do país, tem como vantagens os custos mais baixos com alimentos, a produção de carne de alta qualidade com características organolépticas aprimoradas, além de reduzir o impacto ambiental e melhorar o bem-estar animal. No entanto, apresenta desvantagens como o ganho de peso mais lento e variável dos animais, além da dependência das condições climáticas e sazonais.

Outro sistema é o misto, que combina a engorda em pastagens com a suplementação de grãos e outros concentrados, especialmente durante períodos de menor disponibilidade de forragem. As vantagens desse sistema incluem o equilíbrio entre custos e velocidade de engorda, maior flexibilidade no gerenciamento de recursos e melhor adaptação às variações climáticas. Por outro lado, exige um manuseio mais complexo e cuidadoso, bem como infraestrutura adequada para a suplementação.

O sistema silvipastoril é outra opção, combinando a engorda em pastagens com a presença de árvores ou arbustos na terra, o que proporciona sombra, melhora a qualidade do solo e oferece proteção contra o vento. As vantagens desse sistema incluem a melhoria do microclima e do bem-estar animal, aumento da biodiversidade e da sustentabilidade do sistema, além da possibilidade de obter produtos adicionais, como madeira ou frutas. Entretanto, ele requer um gerenciamento adequado das interações entre árvores e pastagens e demanda investimento inicial em plantio e manejo das árvores.

A engorda em confinamento para autoconsumo é um sistema similar ao confinamento tradicional, mas voltado principalmente para pequenos produtores que engordam animais para consumo próprio ou para mercados locais. Entre as vantagens, destacam-se o controle sobre a qualidade do produto final e os menores custos de transporte e comercialização. Contudo, esse sistema tem uma escala de produção limitada e menor eficiência econômica em comparação com sistemas maiores.

Em algumas fazendas, a rotação de culturas e pastagens é praticada para manter a fertilidade do solo e fornecer forragem de alta qualidade durante todo o ano. Esse método oferece vantagens como a melhoria da saúde do solo, a redução de pragas e doenças e a produção de forragem mais estável e de melhor qualidade. No entanto, a rotação de culturas e pastagens requer planejamento e gerenciamento cuidadosos, além de investimento em infraestrutura e maquinário.

Cada um desses sistemas de engorda apresenta vantagens e desvantagens específicas, e a escolha do mais adequado depende de diversos fatores, como a região, o tamanho da fazenda, os recursos disponíveis e os objetivos de produção do produtor.

3.4 A Pecuária em Diferentes Regiões da Argentina

Os sistemas de engorda de gado na Argentina estão distribuídos por diferentes províncias, adaptando-se às condições climáticas, geográficas e econômicas de cada região. A província de Buenos Aires, por exemplo, é a maior produtora de gado do país, com vastas áreas adequadas para a agricultura e a pecuária, onde predominam os sistemas de confinamento, engorda a pasto, além de sistemas mistos e silvipastoris. Santa Fé, com sua forte tradição pecuária e agrícola, conta com solos férteis e bom acesso a recursos hídricos, predominando os sistemas de confinamento e mistos, juntamente com o crescimento dos sistemas silvipastoris. Em Córdoba, a terceira província mais importante na pecuária, a economia diversificada entre agricultura e

pecuária favorece os sistemas de confinamento e mistos, com crescente uso de suplementação de pastagens.

Entre Rios, por sua vez, é caracterizada por solos férteis e abundante disponibilidade de água, ideais para a criação de gado, onde a engorda a pasto e sistemas mistos predominam, com alguns confinamentos. La Pampa, com extensas áreas de pastagens naturais, é propícia para a criação extensiva de gado, onde a engorda a pasto é predominante, complementada por sistemas mistos e confinamentos em menor escala. Corrientes, com seu clima subtropical e solos adequados para pastagem, utiliza principalmente sistemas de engorda em pastagens e silvipastoris, aproveitando a vegetação nativa e as plantações florestais.

São Luís, uma província com clima mais árido e solos diversos, adota principalmente sistemas de alimentação a pasto e mistos, com foco na adaptação às condições locais. No Chaco, uma região de clima quente e semiárido, com áreas de mata e pastagem, os sistemas de engorda em pastagens e silvipastoris são predominantes, aproveitando a vegetação nativa. Formosa, com seu clima quente e úmido e solos adequados para pastagens e florestas, utiliza principalmente sistemas de engorda a pasto e silvipastoris.

Nas províncias de Salta e Tucumán, localizadas no noroeste da Argentina, onde a economia agrícola é diversificada, os sistemas de engorda são principalmente a pasto e mistos, com alguns confinamentos. Mendoza, conhecida por seu clima árido e solos variados, famosa pela produção de vinho, adota predominantemente a engorda baseada em pastagens em áreas de oásis e sistemas mistos. São João, com características semelhantes a Mendoza, também possui um clima árido e depende de sistemas de irrigação, onde a engorda a pasto e os sistemas mistos são predominantes. Já nas províncias de Rio Negro e Neuquén, localizadas na Patagônia, com clima mais frio e seco e solos diversos, predominam os sistemas de alimentação a pasto e mistos, adaptados às condições locais.

Esses sistemas de engorda são cuidadosamente adaptados às características específicas de cada região, com o objetivo de maximizar a eficiência e a sustentabilidade da produção pecuária.

3.5 A Agricultura Familiar

A agricultura familiar na Argentina é um setor crucial para a economia rural e a segurança alimentar do país. Apesar de sua importância, ela enfrenta uma série de desafios e oportunidades. A agricultura familiar representa aproximadamente 70% dos produtores agrícolas do país, administrando cerca de 13% da área agrícola total. Embora essa porcentagem de terra seja relativamente pequena, a contribuição desses agricultores para a diversidade de culturas e produtos é significativa. Além disso, a agricultura familiar é responsável por gerar uma alta porcentagem de empregos rurais, sendo fundamental para a subsistência de muitas famílias nas áreas rurais.

Os agricultores familiares na Argentina se destacam pela diversidade de produção, cultivando uma ampla variedade de culturas, como frutas, legumes, cereais, leguminosas, além de produtos de origem animal, como carne, leite e ovos. A maioria das fazendas é de pequena escala, com acesso limitado a tecnologia avançada e recursos financeiros, e grande parte da produção é destinada ao autoconsumo e à venda em mercados locais e regionais.

No entanto, a agricultura familiar enfrenta desafios significativos. A posse da terra é um problema comum, com muitos agricultores lidando com direitos de propriedade inseguros. Além disso, o acesso a financiamento é restrito, dificultando a capacidade desses pequenos produtores de investir e se modernizar. A falta de acesso à tecnologia moderna e ao treinamento técnico limita a produtividade e a sustentabilidade das fazendas familiares, enquanto a infraestrutura inadequada, como estradas, armazenamento e irrigação, afeta negativamente a eficiência e a lucratividade. Outro desafio é o marketing, pois a capacidade limitada de acessar

mercados mais amplos e competitivos reduz as oportunidades de obter melhores preços e condições de venda.

Para apoiar a agricultura familiar, o governo argentino implementou vários programas de subsídios, empréstimos em condições favoráveis e assistência técnica. Instituições como o Instituto Nacional de Tecnologia Agrícola (INTA) e o Ministério da Agricultura, Pecuária e Pesca colaboram com os agricultores familiares, oferecendo suporte técnico e treinamento. Além disso, cooperativas e associações de agricultores familiares desempenham um papel importante na melhoria da capacidade de comercialização, no acesso a insumos e na defesa dos direitos dos pequenos produtores.

A agricultura familiar na Argentina também apresenta várias oportunidades. Com o potencial de adotar práticas agrícolas sustentáveis e agroecológicas, esse setor pode contribuir significativamente para a conservação ambiental e a mitigação das mudanças climáticas. A promoção da agricultura familiar pode ajudar a revitalizar as economias rurais, reduzir a migração para as cidades e melhorar a qualidade de vida no campo. Além disso, o crescente interesse por alimentos orgânicos e de proximidade oferece aos agricultores familiares a chance de diferenciar seus produtos e acessar nichos de mercado com maior valor agregado.

Existem várias histórias de sucesso na agricultura familiar na Argentina. Em diversas regiões, agricultores familiares têm implementado projetos agroecológicos com sucesso, melhorando a produtividade e a sustentabilidade de suas fazendas. Cooperativas bem-sucedidas também demonstram como a organização coletiva pode melhorar o acesso a mercados e recursos. Em resumo, a agricultura familiar na Argentina é um setor importante que enfrenta desafios significativos, mas também apresenta inúmeras oportunidades para o desenvolvimento sustentável e a melhoria das condições de vida nas áreas rurais. Políticas de apoio, inovação e organização coletiva são fundamentais para seu fortalecimento e evolução.

3.6 Modelos Matemáticos e Computacional Aplicados a Silvicultura

Os modelos matemáticos e computacionais desempenham um papel fundamental na evolução e otimização dos sistemas silvicultoriais na Argentina. Eles contribuem de várias maneiras para melhorar a eficiência, sustentabilidade e resiliência desses sistemas. Por exemplo, modelos de crescimento de forragem e árvores permitem prever a produção de biomassa sob diferentes condições climáticas e de manejo, ajudando a otimizar o uso de recursos como água e nutrientes. Além disso, os modelos de alocação de recursos ajudam a determinar a melhor combinação de espécies arbóreas e forrageiras para maximizar a produtividade e a sustentabilidade.

No gerenciamento climático e previsão de impactos, os modelos climáticos utilizam dados históricos e projeções futuras para prever como as mudanças no clima podem afetar a produtividade dos sistemas silvicultoriais. Simulações de eventos extremos permitem avaliar a resiliência desses sistemas diante de secas ou inundações, por exemplo. Para a gestão e sustentabilidade da biodiversidade, modelos de dinâmica populacional ajudam a entender e gerenciar a interação entre diferentes espécies, promovendo a biodiversidade. Além disso, a avaliação dos serviços ecossistêmicos por meio de modelos pode quantificar os benefícios ambientais dos sistemas silvicultoriais, como o sequestro de carbono, a melhoria da qualidade do solo e a conservação da biodiversidade.

No planejamento e projeto dos sistemas, modelos de simulação espacial permitem projetar o arranjo ideal de árvores e gramíneas em um determinado terreno, considerando fatores como inclinação, disponibilidade de água e exposição solar. Análises de custo-benefício ajudam a avaliar a viabilidade econômica de diferentes projetos e estratégias de manejo.

4. CAPÍTULO I

SISTEMA INTEGRADO LAVOURA-PECUÁRIA COM PLANTIO DIRETO (SILPE-PD)

4.1 RESUMO

Este capítulo aborda o Sistema Integrado Lavoura-Pecuária com Plantio Direto (SILPE-PD), detalhando a implementação de um modelo de Programação Linear Inteira Mista. O objetivo principal é otimizar a integração entre atividades agrícolas e pecuárias, maximizando o ganho de peso dos animais, selecionando cultivos eficientes e minimizando custos de alimentação em áreas de confinamento. O modelo foi desenvolvido considerando variáveis de decisão como uso eficiente de pastagens, movimentação dos animais e necessidades nutricionais. Combinado ao plantio direto, a metodologia promove a conservação do solo, reduzindo a compactação e otimizando o ciclo de nutrientes. A prática ainda contribui para a retenção de água e a redução de insumos químicos, aspectos essenciais para a sustentabilidade. As simulações realizadas com diferentes números de animais demonstraram que o modelo é eficaz em prever estratégias de manejo que equilibram produtividade e custos, maximizando o uso das áreas de pasto e cultivo. Os resultados reforçam a viabilidade do SILPE-PD como solução econômica e ambientalmente sustentável, especialmente para pequenos e médios produtores rurais. O capítulo também enfatiza a importância dos modelos matemáticos na gestão agropecuária. A utilização de Programação Linear Inteira Mista permite analisar cenários e apoiar a tomada de decisões fundamentadas, contribuindo para a eficiência do sistema. Apresentando a modelagem matemática e simulação computacional do SILPE-PD como uma alternativa inovadora e prática para integrar atividades produtivas, promovendo sustentabilidade, economia e conservação ambiental.

Palavras-chave: Sistema Integrado Lavoura-Pecuária. Programação Linear Inteira Mista. Sustentabilidade. Conservação do Solo. Otimização de Recursos.

4.2 ABSTRACT

This chapter discusses the Integrated Crop-Livestock System with Direct Planting (SILPE-PD), detailing the implementation of a Mixed Integer Linear Programming model. The main objective is to optimize the integration between agricultural and livestock activities, maximizing animal weight gain, selecting efficient crops and minimizing feed costs in confined areas. The model was developed considering decision variables such as efficient use of pastures, animal movement and nutritional needs. Combined with direct planting, the methodology promotes soil conservation, reducing compaction and optimizing the nutrient cycle. The practice also contributes to water retention and the reduction of chemical inputs, essential aspects for sustainability. Simulations performed with different numbers of animals demonstrated that the model is effective in predicting management strategies that balance productivity and costs, maximizing the use of pasture and crop areas. The results reinforce the viability of SILPE-PD as an economically and environmentally sustainable solution, especially for small and medium-sized rural producers. The chapter also emphasizes the importance of mathematical models in agricultural management. The use of Mixed Integer Linear Programming allows scenario analysis and supports informed decision-making, contributing to the efficiency of the system. It presents the mathematical modeling and computational simulation of SILPE-PD as an innovative and practical alternative to integrate productive activities, promoting sustainability, economy and environmental conservation.

Key words: Integrated Crop-Livestock System. Mixed Integer Linear Programming. Sustainability. Soil Conservation. Resource Optimization.

4.3 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será desenvolvido e implementado modelo de Programação Linear Inteira Mista (MIXP) para representar ou simular numericamente condições ótimas de operação para Sistema Integrado Lavoura-Pecuária com Plantio Direto (SILPE-PD). O MIXP maximiza o ganho de peso vivo por animal, proporciona a melhor seleção anual de culturas e redução dos custos de alimentação em áreas cercadas. A Figura 1 ilustra a topologia do SILPE-PD, onde as setas representam as possibilidades de movimentação bovina entre as áreas, sendo a estrutura composta por três áreas operacionais: Lavoura Anual, Pastagens e Confinamento Animal (composição alimentar, forragem e/ou pastagem, matéria seca, proteína bruta, etc.).

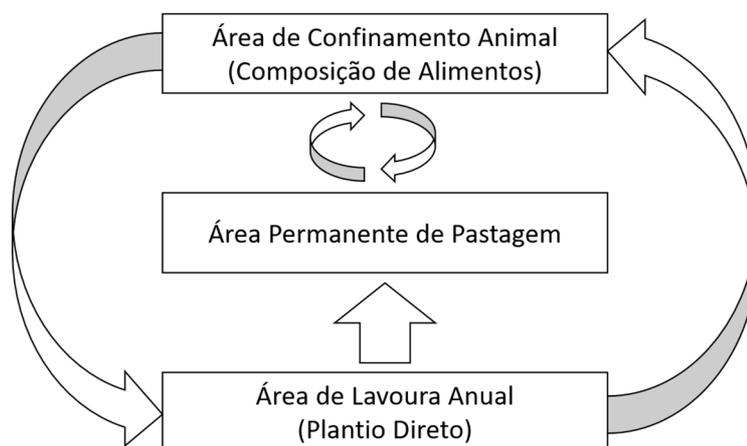


Figura 1. Representação Gráfica do trânsito animal no SILPE-PD. Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Um sistema integrado Lavoura-Pecuária (iLP) explora atividades agrícolas e pecuárias, de forma integrada, em rotação ou sucessão, na mesma área e em épocas diferentes, aumentando a eficiência no uso dos recursos naturais e com menor impacto sobre o ambiente, já que os processos de degradação são controlados por meio de práticas conservacionistas.

Entre os iLP, o sistema de integrado Lavoura-Pecuária sob Plantio Direto tem sido um dos mais sustentáveis, pois maximiza o uso racional do solo, permite ciclagem de nutrientes, melhora a biologia do solo e as condições edafoclimáticas (OLIVEIRA, 2017). Esta técnica se aplica na plantação após a colheita, usando o que sobra para cobrir o solo e desenvolvendo área de pastagem para pecuária neste período, com o cuidado para não haver compactação do solo por pisoteio animal.

O sistema de plantio direto gera benefícios tais como, baixa maquinação no processo produtivo agropecuário, manutenção das propriedades do solo sem necessidade de repouso e tratamentos contra infertilidade, e melhor aproveitamento da área, gerando maiores ganhos com menores custos. No entanto, muitos produtores mostram-se relutantes em adotar esse sistema devido ao efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo, principalmente aqueles relacionados com a compactação. Carvalho (2004) explica que os sistemas de cultivo contínuo em pastagens de inverno, como o SILPE-PD, se bem manejados, proporcionam boas formas de conservação do solo e garantem a estabilidade do sistema. Espera-se também que melhore as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e reduza a ocorrência de pragas, doenças e ervas daninhas (LORENZI, 2000).

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

Vários cenários agrícolas foram simulados aleatoriamente considerando cinco culturas anuais, um número máximo de animais por área do SILPE-PD, um valor máximo de área total, um valor máximo utilização água e cinco tipos de cultura. O máximo de cinco nutrientes necessários para uma unidade da composição de um determinado alimento e o limite inferior da quantidade de um determinado tipo de alimento é de 1 kg. Entre os parâmetros temos o peso do animal, preço da colheita, produtividade média da colheita, custo médio da colheita, rendimento marginal, quantidade de água necessária para cada cultura, custo de cada unidade de ração, valores mínimos de nutrientes necessários para a ração, peso vivo, peso para abate de animais e ganho de peso animal, todos gerado aleatoriamente em GNU Octave.

Os confinamentos são locais onde vários animais podem ser alimentados com uma variedade de alimentos que expressam todas as suas características genéticas, principalmente o ganho de peso direto. As rações alimentares são geralmente ricas em concentrados (milho, farelo de soja, sorgo). Isso ocorre porque esses alimentos contêm mais nutrientes do que forragens (capim-elefante, tifton, tanzânia, etc.). Porém, devido aos elevados custos de manutenção dessa área (confinamento animal) em comparação com as outras duas áreas, esta área deve ser utilizada como uma das ferramentas de engorda do gado e não como um sistema de produção completo. Isto significa que os animais são trazidos para o confinamento apenas quando é necessário e pelo menor tempo possível. Existem dois tipos de animais nesta área, os animais que atingem determinado peso (geralmente em torno de 350 kg) e ficam em cativeiro por uma média de 100 dias com depósitos de gordura nas carcaças, além de animais com muito baixo peso. Vale ressaltar que é impossível determinar um peso específico porque a idade do animal também deve ser levada em consideração.

A área de pastagem permanente é a área central de fluxo (ou migração) animal do SILPE-PD, não há restrições de custos para a manutenção de animais nestas áreas. Presume-se também que não existem restrições quanto ao número e o trânsito de animais dentro dessa área (como nas áreas de culturas anuais). As pastagens consideradas podem ser naturais ou indígenas, as opções variam, levando em consideração a topografia, o solo, o clima e as condições da propriedade da área. As pastagens naturais contêm vegetação nativa composta por várias espécies de gramíneas, ervas daninhas e arbustos. As pastagens nativas contêm vegetação nativa, composta por espécies com valor forrageiro que crescem após a destruição da vegetação natural.

Já na área de lavoura anual do SILPE-PD é constituída por uma ou mais sub-regiões ou parcelas onde se desenvolvem alternadamente as atividades agrícolas (cultivo com espécies regenerativas do solo) e a pecuária. No que diz respeito ao transporte de animais, que é um fator chave para o sucesso do SILPE-PD, certas regras devem ser seguidas para garantir a harmonização das culturas e da pecuária. Os regulamentos respeitam o número máximo de animais permitidos e estabelecem períodos de entressafra para a soltura dos animais, a fim de reduzir a compactação do solo devido ao pisoteio e aos elevados custos associados ao alojamento dos animais. Desta forma tentamos manter os animais na área de quarentena (confinamento) o menor tempo possível, isto significa que nas fases finais da engorda para abate, apenas os animais cujo peso vivo seja muito inferior à sua idade podem ser deixados em cativeiro. Caso contrário, os animais terão de ser transferidos para pastagens ou lavoura anual durante o período de entressafra, supondo que existe consórcio entre as culturas de grãos e as forrageiras.

A topologia do SILPE-PD, os animais na área de pastagem podem enviar ou receber animais que estão na área de confinamento, se necessário. Além disso, os animais que estão nas áreas de lavoura anual podem agora deslocar-se para áreas de pastagem ou voltar para áreas de confinamento, dependendo do peso vivo do mesmo, observando-se que na entressafra, resíduos

vegetais podem ser aproveitados para alimentação de animais, esse processo não só fornece alimento aos animais, mas também contribui para a conservação do solo por meio do uso de fertilizantes. Devido à polêmica compactação do solo, o número de animais em cada área operacional do sistema deve ser limitado. A seguir, assumimos que o SILPE-PD se desenvolve em torno das culturas anuais durante a entressafra. Ao mesmo tempo, podemos supor que no território existem fazendas de capim (por exemplo, capim paraíso elefante), que estão prontas para fornecer a composição da ração e previamente permitir a movimentação dos animais por um determinado período de tempo, além disso o peso vivo de cada animal é conhecido.

Os critérios utilizados para movimentar animais de uma área para outra variam dependendo do peso vivo do animal. Desta forma, podemos imaginar que existe um conjunto de opções viáveis, entre os quais queremos escolher o caminho circular ideal para cada animal do grupo seguir. Além disso, é importante identificar culturas e períodos de semeadura que proporcionem rendimento líquido máximo atendendo as restrições de água e solo (DELGADO et al, 2016). A otimização da alimentação dos animais também está incluída, a modelagem matemática das três considerações anteriores é realizada utilizando programação inteira mista (MIXP).

A continuação do desenvolvimento do modelo matemático representativo das atividades do SILPE-PD, incluem as restrições do modelo ideal de gado, a seleção ideal das culturas, a movimentação e a redução dos custos de composição de alimentos. O modelo MIXP especifica os indicadores, parâmetros, variáveis, restrições e objetivo associado às atividades do SILPE-PD.

4.4.1 Índices

$l = 1, 2, \dots, m$; onde m representa o número de culturas agrícolas consideradas.

$h = 1, \dots, 12$; (meses do ano).

$r = 1, 2, \dots, p$; tipo de alimento em uma composição bromatológica (capim, ração, milho sem espigas, lavadura seca, combinações das anteriores, etc.).

$s = 1, 2, \dots, d$; nutriente requerido por unidade na composição de um determinado alimento.

$i = 1, \dots, n$; onde n representa o número de animais.

$j = 1, 2, 3$; onde $j = 1$ (área permanente de pastagem), $j = 2$ (área de lavoura anual) e $j = 3$ (área de confinamento animal).

4.4.2 Parâmetros

θ_{ijh} – Custo pela permanência do animal i na área j no mês h (R\$) (pastoreio animal, alimentação, estrutura física, equipamentos, etc.).

N_{jh} – Número máximo de animais permitidos na área j no mês h .

p_{lh} – Preço da cultura l no mês h (R\$ kg^{-1}).

γ_l – Produtividade média da cultura l ($kg\ ha^{-1}$).

c_l – Média dos custos médios da cultura l incluindo a tarifa de água para a irrigação (R\$ ha^{-1}).

$R_{lh} = p_{lh}\gamma_l - c_l$ – Receita líquida marginal (R\$ ha^{-1}).

v_{lh} – Volume de água necessário para a cultura l no mês h ($m^3\ ha^{-1}$).

VT_h – Volume total de água disponível no mês h (m^3).

AT_h – Área total irrigada no mês h (ha).

ρ_r – Custo por unidade do alimento r (R\$ kg^{-1}).

δ_{rs} – Porcentagem relativa do nutriente s no alimento r .

σ_s – Mínimo valor do nutriente s requisitado na dieta (kg).

PV_{ij} – Peso vivo do animal i , na área j (kg).

PVA_{ij} – Peso vivo para o abatimento do animal i , na área j (kg).

g_{ijh} – Peso ganho pelo animal i na área j no mês h (kg).

z_{min} – Quantidade mínima total de alimentos (kg).

Para cada área j , seja $S_j = \{i: PV_{ij} < PVA_{ij}\}$ e $\bar{S}_j = \{i: PV_{ij} \ll PVA_{ij}\}$.

Ambos os conjuntos nos indicam os animais com peso vivo insuficiente para o abate e extremadamente baixo para o abate respectivamente.

4.4.3 Variáveis

$y_{ijh} = 1$ Se o animal i se encontra na área j no mês h

$= 0$ Caso contrário

x_{lh} – Área a ser cultivada pela cultura anual l no mês h (ha).

z_r – Quantidade de alimento tipo r (kg).

4.4.4 Restrições

i) Para cada mês h , o número de animais i que podem permanecer na área j , não pode ultrapassar a quantidade de N_{jh} animais.

$$\sum_{i=1}^n y_{ijh} \leq N_{jh} \quad j = 1,2,3 \quad h = 1,2, \dots, 12$$

ii) Se no mês h , o animal i está na área de pastagem ($j = 1$) com peso vivo insuficiente ($i \in S_1$) para seu abatimento então o animal i deve permanecer na área por mais um mês.

$$y_{i1h} \leq y_{i1h+1} \quad h = 1,2, \dots, 11; \quad i \in S_1 = \{i: PV_{i1} < PVA_{i1}\}$$

iii) Se no mês h , o animal i está na área da lavoura ($j = 2$) com peso vivo extremamente baixo ($i \in \bar{S}_2$) para seu abatimento então o animal i deve ser levado à área de confinamento.

$$y_{i2h} \leq y_{i3h} \quad h = 1,2, \dots, 12; \quad i \in \bar{S}_2 = \{i: PV_{i2} \ll PVA_{i2}\}$$

iv) Se no mês h , o animal i está na área de pastagem ($j = 1$) com peso vivo extremamente baixo ($i \in \bar{S}_1$) para seu abatimento então o animal i deve ser levado à área de confinamento.

$$y_{i1h} \leq y_{i3h} \quad i \in \bar{S}_1 = \{i: PV_{i1} \ll PVA_{i1}\}; \quad h = 1,2, \dots, 12$$

v) Restrições de áreas a ser cultivadas pelas culturas anuais em relação a área total permitida por mês.

$$\sum_{l=1}^m x_{lh} \leq AT_h \quad h = 1, 2, \dots, 12$$

vi) Restrições dos volumes de água necessários para o desenvolvimento das culturas em relação ao volume total disponível por mês.

$$\sum_{l=1}^m v_{lh} x_{lh} \leq VT_h \quad h = 1, 2, \dots, 12$$

vii) Restrições das composições de alimentos na área de confinamento.

$$\sum_{r=1}^p \delta_{rs} z_r \geq \sigma_s \quad s = 1, 2, \dots, d$$

viii) Cada animal i deve estar em uma e somente uma área j a cada mês h .

$$\sum_{j=1}^3 y_{ijh} = 1 \quad h = 1, 2, \dots, 12 \quad i = 1, \dots, n$$

ix) Se o animal i encontra-se na área de pastagem ($j = 1$) no mês h , então ele não pode estar na área de lavoura anual ($j = 2$) no mês seguinte ($h + 1$).

$$y_{i1h} + y_{i2h+1} \leq 1 \quad h = 1, 2, \dots, 11 \quad i = 1, \dots, n$$

x) A quantidade de alimento tipo r (z_r) deve ser maior ou igual que a quantidade mínimo total de alimentos (kg).

$$\sum_{r=1}^p z_r \geq z_{min}$$

A continuação o MIXP para representar as atividades, condições operacionais e objetivo do SILPE-PD.

Maximizar

$$\sum_{l=1}^m \sum_{h=1}^{12} R_{lh} x_{lh} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_{h=1}^{12} g_{ijh} y_{ijh} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_{h=1}^{12} \theta_{ijh} y_{ijh} - \sum_{r=1}^p \rho_r z_r$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_{ijh} &\leq N_{jh} & j = 1, 2, 3; & & h = 1, 2, \dots, 12 \\ y_{i1h} &\leq y_{i1h+1} & h = 1, 2, \dots, 11; & & i \in S_1 = \{i: PV_{i1} < PVA_{i1}\} \\ y_{i2h} &\leq y_{i3h} & h = 1, 2, \dots, 12; & & i \in \bar{S}_2 = \{i: PV_{i2} \ll PVA_{i2}\} \\ y_{i1h} &\leq y_{i3h} & h = 1, 2, \dots, 12; & & i \in \bar{S}_1 = \{i: PV_{i1} \ll PVA_{i1}\} \\ \sum_{l=1}^m x_{lh} &\leq AT_h & h = 1, 2, \dots, 12; & & \\ \sum_{l=1}^m v_{lh} x_{lh} &\leq VT_h & h = 1, 2, \dots, 12; & & \\ \sum_{r=1}^p \delta_{rs} z_r &\geq \sigma_s & s = 1, 2, \dots, d; & & \\ \sum_{j=1}^3 y_{ijh} &= 1 & h = 1, 2, \dots, 12; & & i = 1, \dots, n \\ y_{i1h} + y_{i2h+1} &\leq 1 & h = 1, 2, \dots, 11; & & i = 1, \dots, n \\ \sum_{r=1}^p z_r &\geq z_{min} & & & \\ y_{ijh} &\in \{0, 1\}; & x_{lh}, z_r &\geq 0 & \end{aligned}$$

As condições de otimização necessárias e suficientes são teoricamente comprovadas na programação linear, que pode ser usada para testar efetivamente se uma determinada solução viável é a solução ótima. Essas situações têm sido utilizadas para desenvolver métodos algébricos como simplex e outros métodos para resolver problemas de programação linear. A programação inteira e a programação inteira mista não têm condições de otimização conhecidas para testar se uma determinada solução viável é ótima, a não ser comparar direta ou indiretamente essa solução com outras soluções viáveis para o problema. É por isso que, como no nosso caso, é resolvido por um método de enumeração que encontra a solução ótima a partir de um conjunto de soluções viáveis. Os cálculos permitiram-nos garantir que o programa cumpria todas as restrições, maximizava o ganho de peso para cada animal, assegurava a melhor seleção anual de culturas e minimizava os custos de alimentação animal em áreas vedadas.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez definido modelo matemático supracitado, escolhemos o Octave (GNU Octave) na versão 8.2.0 para devolver a simulação matemática do modelo, o Octave além de ser gratuito e um software livre, é uma linguagem computacional de alto nível com várias aplicações na computação matemática e simulação numérica, possuindo soluções de problemas numéricos, lineares e não linear. Para resolução dos problemas utilizamos a função GLPK no Octave, usada para resolver problemas de programação linear (PL) e programação inteira mista (PIM) através da biblioteca GNU Linear Programming Kit (GLPK). Ela permite definir um modelo matemático de otimização com variáveis, restrições e uma função objetivo, que pode ser maximizada ou minimizada. Sendo amplamente utilizada para resolver problemas de alocação de recursos, otimização de custos e outras aplicações que envolvem decisões ótimas sob restrições lineares.

Como hardware para fazer nossa simulação numérica, tivemos um notebook de processor Intel Core i7 de 7ª geração (i7-7500U / 4M Cache, up to 3.50 GHz), com memória RAM de 8GB (2400MHz) e rodando sistema operacional Windows 10 Professional.

Uma vez definidos o software e hardware a ser utilizado, desenvolveu-se a programação na linguagem computacional correspondente ao Octave, utilizando a geração de valores aleatórios dentro de faixas aceitáveis, como por exemplo para simular o ganho ou perda de peso pelo gado, sendo feitos testes e conferindo de todas as restrições estavam sendo atendida.

Na nossa primeira rodada para este modelo, escolhemos o número de 10 animais, embora este número pareça baixo, este já é a realidade para maioria dos pequenos produtores principalmente quando se trata de agricultura familiar, que geralmente tem entre 7 e 40 animais, e uma faixa de terra de até 4 hectares. Utilizamos ainda alguns parâmetros para esta simulação numérica como: 5 culturas da parte de lavoura, número máximo de 10 animais por área, 1,5 hectares, 1000 m³ de volume de água disponível, 5 tipos de alimentos na composição bromatológica e 5 nutrientes requeridos por unidade na composição de um determinado alimento e zero como limitante inferior de cada produto na composição da ração.

Na Tabela 1, estão os resultados para esta simulação numérica, sendo importante salientar que o Octave não dá a solução desse jeito, este dá em forma de matriz para cada animal durante cada período de tempo, e compilamos tudo em uma única tabela neste trabalho para facilitar o entendimento do leitor, sendo representado cada animal por seu número antecedido pela letra “A” e apresentado por uma cor em particular, esta tabela trás a localização do animal para os 12 períodos de tempo, esta movimentação a todas as restrições de trânsito animal feitas pelo modelo e obviamente cada animal só pode ocupar uma área, em cada período.

Na Tabela 1, podemos observar que os animais estão bem distribuídos pelas área ao longo do tempo, mas a pastagem não é a preferida para o envio do animal, isso se deve por esta área embora a engorda seja mais barata o animal demora mais a ganhar peso nesta área, outro fator importante é que não podemos enviar diretamente o animal para a lavoura animal dessa área, tendo que ser enviado para o confinamento primeiro, levando os animais se concentrarem no confinamento aguardando a oportunidade de ir para a área de lavoura anual, no período 2 para o período 3 e do período 11 para o período 12 observamos que o confinamento consegue enviar os seus animais para a lavoura anual e não recebem outros animais, ficando com uma baixa ocupação mostrando que esta área também não é a da preferência para o modelo, devido ao animal no confinamento apresentar um alto custo, em contrapartida temos uma engorda mais rápida.

Ainda na Tabela 1, temos uma quantidade reduzida de animais durante todo o ano, isso se refere ao cuidado que temos que ter com o pisoteio animal (compactação do solo) para que a atividade pecuária não inviabilize a atividade agrícola, também é necessário respeitar os processos e agrícolas, só liberando o gado nesta área quando ele poder ser relacional com a

plantação, que muitas vezes vai ocorrer após a colheita no qual o gado é liberado na área para se alimentar dos restos das plantas ou plantas com cultivo associado, juntamente fazendo a adubação natural do solo.

Tabela 1. Solução de ótima para trânsito animal para a 1ª simulação com 10 animais.

	Pastagem	Lavoura Anual	Confinamento Animal
Período 1	A4 A5 A7 A8	A1 A9	A2 A3 A6
Período 2	A2 A4 A6 A8	A3	A1 A5 A7 A9
Período 3	A2 A4 A5 A6 A7	A1 A3 A9	A8
Período 4	A2	A3 A9	A1 A4 A5 A6 A7
Período 5	A2 A5	A4 A6 A7 A8 A9	A1 A3
Período 6	A2 A7	A3 A8 A9	A1 A4 A5 A6
Período 7	A2 A6	A3 A8 A9	A1 A4 A5 A7 A8
Período 8	A2 A8	A3 A4	A1 A5 A6 A7 A9
Período 9	A2 A5 A8	A3 A4 A6	A1 A7 A9
Período 10	A2	A3 A4 A6 A7 A9	A1 A5 A8
Período 11	A2 A5	A1 A3 A4 A7	A6 A8 A9
Período 12	A2 A5 A7	A1 A3 A4 A6 A9	A8

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Não podemos esquecer que este modelo e simulação computacional também traz a solução para o plantio da parte agrícola, escolhemos as cinco culturas abaixo que geralmente são as mais usuais de estarem presente na interação lavoura-pecuária no Brasil e Argentina, sendo essas: Milho (*Zea mays*), Soja (*Glycine max*), Braquiária (*Brachiara spp.*), Sorgo (*Sorghum bicolor*) e Aveia (*Avena sativa*).

Na Tabela 2, a seguir, são apresentados os resultados ótimos para o plantio dessas variedades, visto vários parâmetros como os valores ofertados e o equilíbrio entre essas plantações e a atividade pecuária com objetivo de maximizar também os ganhos na parte agrícola. Os valores apresentados são em m³ que devem ser implementados durante aquele período na parte de lavoura.

Tabela 2. Solução de ótima da parte agrícola para a 1ª simulação.

	Milho	Soja	Braquiária	Sorgo	Aveia
Período 1	0	0	0	0	1.139
Período 2	0	0	0	6.827	0
Período 3	0	0	0	1.613	0
Período 4	0	0	0	1.854	0
Período 5	0	0	2.836	0	0
Período 6	0	0	0	6.880	0
Período 7	4.637	0	0	0	0

Continua...

Continuação da **Tabela 2.**

	Milho	Soja	Braquiária	Sorgo	Aveia
Período 8	0	0	0	0	1.161
Período 9	0	0	2.243	0	0
Período 10	0	6.942	0	0	1.657
Período 11	0	0	0	1.282	0
Período 12	0	0	0	0	3.651

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Ainda como resposta temos a Tabela 3, que representam o resultado ótimo para formulação da alimentação animal na área de confinamento, foram feitas três rodadas com os mesmos dados, a diferença é a quantidade mínima total que foi alterada, entre 0, 5 e 10, importante salientar que o problema levou o mesmo tempo computacional para apresentar cada uma das soluções.

A Tabela 3, é muito interessante, pois essa não coloca na composição o farelo de soja e farelo de algodão em nenhuma hipótese apresentada, mas coloca minerais e vitaminas que está entre os mais caros entre todos apresentados, isso se deve a importância da substância para a engorda do gado, também podemos observar que vai sendo diminuindo a quantidade desse composto e do milho, à medida que vai sendo aumentada a quantidade da selagem de sorgo, pois é um composto mais barato mais ainda o animal precisa de alguns componentes presente nos minerais, vitamina e milho.

Tabela 3. Solução de ótima para composição da alimentação animal para a 1ª simulação.

Quantidade Mínima Total	Núcleos Minerais e Vitaminas	Farelo de Soja	Farelo de Algodão	Milho	Selagem de Sorgo
0	0.84268	0	0	1.1508	0
5	0.82464	0	0	1.107	3.0683
10	0.79464	0	0	1.0342	8.1712

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Seguindo com nossas simulações computacionais, escolhemos o número de 50 animais, que já atende as especificações de uma propriedade familiar de médio porte, de tem de 4 a 15 hectares e de 28 a 150 animais. Utilizamos outros parâmetros para esta simulação numérica como: 5 culturas da parte de lavoura, número máximo de 50 animais por área, 7,5 hectares, 5000 m³ de volume de água disponível, 5 tipos de alimentos na composição bromatológica e 5 nutrientes requeridos por unidade na composição de um determinado alimento e zero como limitante inferior de cada produto na composição da ração.

Obtivemos a Tabela 4, que vem a seguir, que agrega toda a movimentação de cada um dos 50 animais dentro dos 12 períodos de tempo, além de termos as mesmas percepções da tabela com 10 animais sobre as áreas pastagem, lavoura anual e confinamento, também podemos observar que tem animais que praticamente ficam durante quase todo o período ou durante todo o período na área de confinamento animal, como ocorre com o animal 11 (A11), isso se deve a alguns fatores como este animal está extremamente abaixo do peso, sendo direcionado à área de confinamento para que não perdamos o animal, permanecendo na mesma até que seu peso se reestabeleça, o que pode não acontecer durante todo o tempo analisado. Outro motivo para o animal permanecer na área de confinamento por prolongados período de tempo é este animal está aguardando uma oportunidade de ir para área de lavoura anual, lembrando que essa área é extremamente restrita na quantidade de animais para que não ocorra o pisoteio animal, e também temos que lembrar que o animal não pode ir direito da área de pastagem para a lavoura anual, explicando a grande concentração de animais na área de

confinamento e permanência dos mesmos nessa área, mesmo sendo uma área economicamente mais custosa.

Tabela 4. Solução de ótima para trânsito animal para a 2ª simulação com 50 animais.

	Pastagem	Lavoura Anual	Confinamento Animal
Período 1	A03 A05 A06 A08 A16 A19 A20 A22 A23 A25 A28 A31 A39 A41 A42 A47	A02 A04 A09 A10 A12 A13 A14 A15 A18 A24 A26 A27 A29 A33 A34 A36 A37 A38 A40 A43 A45 A46 A49	A01 A07 A11 A17 A21 A30 A32 A35 A44 A48 A50
Período 2	A03 A05 A06 A12 A13 A15 A16 A19 A20 A23 A30 A39 A41 A44	A01 A02 A04 A07 A09 A10 A14 A17 A18 A21 A32 A36 A37 A38 A40 A45 A48 A49	A08 A11 A22 A24 A25 A26 A27 A28 A29 A31 A33 A34 A35 A42 A43 A46 A47 A50
Período 3	A02 A03 A06 A14 A15 A16 A21 A22 A23 A24 A25 A39 A40 A44 A47	A04 A07 A08 A09 A10 A17 A28 A29 A32 A33 A36 A45 A46 A48	A01 A05 A11 A12 A13 A18 A19 A20 A26 A27 A30 A31 A34 A35 A37 A38 A41 A42 A43 A49 A50
Período 4	A02 A03 A05 A06 A08 A14 A16 A19 A22 A23 A24 A25 A28 A30 A39 A40 A41 A44 A47	A01 A09 A10 A12 A13 A17 A18 A20 A26 A29 A34 A38 A42 A43 A46 A48 A49	A04 A07 A11 A15 A21 A27 A31 A32 A33 A35 A36 A37 A45 A50
Período 5	A03 A05 A06 A12 A14 A16 A23 A25 A36 A39 A45	A01 A07 A09 A20 A21 A33 A49	A02 A04 A08 A10 A11 A13 A15 A17 A18 A19 A22 A24 A26 A27 A28 A29 A30 A31 A32 A34 A35 A37 A38 A40 A41 A42 A43 A44 A46 A47 A48 A50
Período 6	A03 A06 A14 A16 A17 A22 A23 A30 A33 A41	A04 A07 A08 A09 A13 A20 A26 A27 A28 A32 A34 A37 A40 A46	A01 A02 A05 A10 A11 A12 A15 A18 A19 A20 A21 A24 A25 A29 A30 A31 A35 A36 A38 A39 A42 A43 A44 A45 A47 A48 A49 A50
Período 7	A01 A02 A03 A05 A08 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A19 A21 A22 A23 A24 A25 A28 A31 A33 A39 A40 A41 A44 A46 A47	A04 A09 A10 A18 A20 A29 A32 A36 A48	A06 A07 A11 A26 A27 A30 A34 A35 A37 A38 A42 A43 A45 A49 A50
Período 8	A03 A14 A15 A16 A19 A20 A23 A33	A07 A22 A26 A32 A34 A37 A45	A01 A02 A04 A05 A06 A08 A09 A10 A11 A12 A13 A17 A18 A21 A24 A25 A27 A28 A29 A30 A31 A35 A36 A38 A39 A40 A41 A42 A43 A44 A46 A47 A48 A49 A50
Período 9	A03 A14 A16 A19 A23 A25 A33 A41 A44 A47	A01 A02 A04 A07 A09 A17 A21 A22 A28 A32 A39 A45 A48 A49	A05 A06 A08 A10 A11 A12 A13 A15 A18 A20 A24 A26 A27 A29 A30 A31 A34 A35 A36 A37 A38 A40 A42 A43 A46 A50

Continua...

Continuação da Tabela 4.

	Pastagem	Lavoura Anual	Confinamento Animal
Período 10	A03 A05 A14 A16 A19 A21 A22 A23 A47	A10 A12 A13 A15 A17 A18 A24 A28 A29 A34 A37 A38 A39 A45 A46 A48	A01 A02 A04 A06 A07 A08 A09 A11 A20 A25 A26 A27 A30 A31 A32 A33 A35 A36 A40 A41 A42 A43 A44 A49 A50
Período 11	A03 A05 A08 A10 A14 A16 A20 A21 A22 A23 A35 A39 A40 A44 A45 A47 A48	A002 A7 A09 A17 A24 A26 A32 A33 A34 A36 A37 A49	A01 A04 A06 A09 A11 A12 A13 A15 A18 A19 A25 A27 A28 A29 A30 A31 A38 A41 A42 A43 A46 A50
Período 12	A03 A08 A10 A14 A16 A17 A19 A21 A22 A23 A25 A34 A35 A37 A39 A41 A44 A47 A48	A01 A02 A04 A07 A12 A13 A15 A24 A26 A28 A38 A42 A46	A05 A06 A11 A18 A20 A27 A29 A30 A31 A32 A33 A36 A40 A43 A45 A49 A50

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Na Tabela 5, como na simulação anterior também vamos trazer os resultados ótimos para o plantio das culturas escolhidas anteriormente, sempre apresentados em m³, também levando em conta os valores e integração destas áreas com a pecuária. Sendo importante chamar atenção para esta tabela estar totalmente diferente da anterior, principalmente pelo preço do produto dessas culturas variarem bastante durante o tempo e também estarmos falando com uma quantidade cinco vezes de animal em relação a outra simulação, ainda a área da propriedade ser muito maior do que a primeira simulação.

Tabela 5. Solução de ótima da parte agrícola para a 2ª simulação.

	Milho	Soja	Braquiária	Sorgo	Aveia
Período 1	0	0	27.486	0	0
Período 2	21.477	0	0	0	0
Período 3	10.822	0	0	0	0
Período 4	0	44.834	0	0	0
Período 5	0	5.214	0	0	0
Período 6	5.012	0	0	0	0
Período 7	0	21.226	0	0	0
Período 8	0	0	28.008	0	11.370
Período 9	0	0	0	13.471	0
Período 10	5.8931	0	0	0	0
Período 11	0	0	0	12.631	0
Período 12	0	0	0	25.698	0

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Trazemos na Tabela 6, também as simulações da composição da ração animal na área de confinamento com os mesmo três cenários apresentado de quantidade mínima total, observamos que dessa vez a solução ótima escolhe só utiliza dois componentes para a formulação, e ainda não alterar a formulação quando a quantidade mínima é zero ou cinco.

Tabela 6. Solução de ótima para composição da alimentação animal para a 2ª simulação.

Quantidade Mínima Total	Núcleos Minerais e Vitaminas	Farelo de Soja	Farelo de Algodão	Milho	Selagem de Sorgo
0	0	2.4659	0	5.0094	0
5	0	2.4659	0	5.0094	0
10	0	3.6069	0	6.3931	0

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Por último em nossas simulações computacionais, temos um número de 100 animais, que ainda atende as especificações de uma propriedade familiar de médio porte, de tem de 4 a 15 hectares e de 28 a 150 animais, só que pela quantidade de animais e de área utilizados está já está no limite para virar uma propriedade de grande porte, já que as propriedades de grande tem acima de 15 hectares de área e pelo menos 105 animais em seu rebanho. Utilizamos outros parâmetros para esta simulação numérica como: 5 culturas da parte de lavoura, número máximo de 100 animais por área, 15 hectares, 10.000 m³ de volume de água disponível, 5 tipos de alimentos na composição bromatológica e 5 nutrientes requeridos por unidade na composição de um determinado alimento e zero como limitante inferior de cada produto na composição da ração, tendo como primeiro resultado dessa simulação a Tabela 7.

Tabela 7. Solução de ótima para trânsito animal para a 3ª simulação com 100 animais.

	Pastagem	Lavoura Anual	Confinamento Animal
Período 1	A02 A04 A12 A13 A25 A26 A30 A34 A51 A54 A57 A58 A60 A61 A66 A67 A75 A76 A77 A78 A80 A83 A85 A87 A89 A91 A93 A98 A100	A01 A03 A06 A07 A08 A09 A10 A11 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20 A22 A24 A27 A28 A31 A32 A33 A35 A36 A37 A38 A39 A40 A41 A43 A44 A45 A46 A47 A48 A52 A53 A55 A56 A62 A63 A64 A65 A70 A71 A73 A79 A81 A82 A84 A86 A88 A90 A94 A95 A96 A97 A99	A05 A21 A23 A29 A42 A49 A50 A59 A68 A69 A72 A74 A92
Período 2	A04 A05 A10 A13 A25 A30 A34 A40 A44 A45 A47 A51 A57 A60 A61 A64 A66 A69 A70 A76 A78 A80 A83 A85 A89 A91 A93 A100	A08 A59	A01 A02 A03 A06 A07 A09 A11 A12 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20 A21 A22 A23 A24 A26 A27 A28 A29 A31 A32 A33 A35 A36 A37 A38 A39 A41 A42 A43 A46 A48 A49 A50 A52 A53 A54 A55 A56 A58 A59 A63 A65 A67 A68 A71 A72 A73 A74 A75 A77 A79 A81 A82 A84 A86 A87 A88 A90 A92 A94 A95 A96 A97 A98 A99
Período 3	A05 A13 A20 A25 A26 A30 A34 A44 A51 A57 A58 A60 A61 A79 A80 A83 A85 A91	A01 A02 A03 A06 A08 A15 A16 A19 A24 A27 A36 A48 A53 A55 A67 A68 A71 A72 A75 A77 A81 A84 A87 A90 A94 A96 A98 A99	A04 A07 A09 A10 A11 A12 A14 A17 A18 A21 A22 A23 A28 A29 A31 A32 A33 A35 A37 A38 A39 A40 A41 A42 A43 A45 A46 A47 A49 A50 A52 A54 A56 A59 A63 A64 A65 A66 A69 A70 A73 A74 A76 A78 A82 A86 A88 A89 A92 A93 A95 A97 A100
Período 4	A04 A10 A13 A19 A25 A31 A40 A51 A60 A67 A69 A75 A91	A01 A02 A11 A12 A15 A16 A18 A24 A27 A28 A29 A33 A36 A37 A39 A45 A46 A47 A48 A52 A53 A55 A56 A63 A64 A65 A72 A77 A81 A84 A86 A87 A88 A92 A96 A98 A100	A03 A05 A06 A07 A08 A09 A10 A14 A17 A20 A21 A22 A23 A26 A30 A32 A34 A35 A38 A41 A42 A43 A44 A49 A50 A54 A57 A58 A59 A61 A66 A68 A70 A71 A73 A74 A76 A78 A79 A80 A82 A83 A85 A89 A90 A93 A94 A95 A97 A99
Período 5	A12 A13 A20 A30 A34 A43 A51 A54 A60 A61 A66 A77 A83 A85 A86 A98 A100	A01 A02 A03 A06 A09 A15 A17 A26 A27 A28 A33 A36 A38 A39 A46 A47 A48 A58 A59 A64 A68 A72 A76 A79 A81 A82 A84 A87 A88 A89 A90 A93 A99	A04 A05 A07 A08 A10 A11 A14 A16 A18 A19 A21 A22 A23 A24 A25 A29 A31 A32 A35 A37 A40 A41 A42 A44 A45 A49 A50 A52 A53 A55 A56 A57 A63 A65 A67 A69 A70 A71 A73 A74 A75 A78 A80 A91 A92 A94 A95 A96 A97
Período 6	A02 A12 A13 A20 A25 A34 A43 A51 A58 A60 A67 A70 A77 A83 A86 A91 A93 A98	A03 A05 A08 A10 A14 A15 A17 A22 A24 A26 A27 A33 A37 A38 A40 A44 A45 A46 A47 A48 A53 A57 A59 A63 A64 A65 A68 A75 A80 A81 A82 A84 A87 A89 A90 A96	A01 A04 A06 A07 A09 A11 A16 A18 A19 A21 A23 A28 A29 A30 A31 A32 A35 A36 A39 A41 A42 A49 A50 A52 A54 A55 A56 A61 A66 A69 A71 A72 A73 A74 A76 A78 A79 A85 A88 A92 A94 A95 A97 A99 A100

Continua...

Continuação da Tabela 7.

	Pastagem	Lavoura Anual	Confinamento Animal
Período 7	A02 A19 A20 A22 A25 A34 A44 A47 A51 A60 A61 A66 A69 A76 A78 A79 A84 A86 A88 A89 A90 A93	A01 A06 A07 A08 A11 A15 A16 A18 A24 A27 A35 A39 A40 A45 A48 A52 A54 A55 A57 A63 A72 A73 A82 A95 A96 A99 A100	A03 A04 A05 A09 A10 A12 A13 A14 A17 A21 A23 A26 A28 A29 A30 A31 A32 A33 A36 A37 A38 A41 A42 A43 A46 A49 A50 A53 A56 A58 A59 A64 A65 A67 A68 A70 A71 A74 A75 A77 A80 A81 A83 A85 A87 A91 A92 A94 A97 A98
Período 8	A13 A19 A22 A29 A30 A31 A40 A45 A51 A58 A60 A61 A67 A69 A80 A83 A86 A88 A93	A03 A05 A07 A09 A10 A11 A16 A18 A24 A26 A27 A32 A33 A35 A36 A38 A46 A48 A52 A53 A54 A55 A56 A59 A65 A68 A70 A72 A73 A77 A82 A85 A87 A92 A94 A96 A97 A98 A99	A01 A02 A04 A06 A08 A12 A14 A15 A17 A20 A21 A23 A25 A28 A34 A37 A39 A41 A42 A43 A44 A47 A49 A50 A57 A63 A64 A66 A71 A74 A75 A76 A78 A79 A81 A84 A89 A90 A91 A95 A100
Período 9	A04 A10 A13 A19 A20 A22 A24 A25 A26 A29 A30 A31 A38 A40 A43 A44 A45 A47 A51 A58 A60 A61 A66 A67 A69 A70 A78 A79 A80 A83 A85 A86 A88 A91 A93 A100	A01 A02 A03 A05 A06 A07 A08 A09 A11 A12 A14 A15 A16 A17 A18 A27 A28 A32 A33 A34 A35 A36 A37 A39 A41 A46 A48 A52 A53 A54 A55 A56 A57 A59 A63 A64 A65 A68 A71 A72 A73 A75 A76 A77 A81 A82 A84 A87 A89 A90 A92 A94 A95 A96 A97 A98 A99	A21 A23 A42 A49 A50 A74
Período 10	A02 A04 A10 A13 A20 A22 A25 A29 A34 A38 A45 A47 A51 A60 A69 A70 A77 A79 A85 A86 A88 A91 A100	A01 A05 A06 A08 A09 A14 A16 A17 A28 A32 A33 A35 A39 A41 A48 A52 A53 A55 A56 A57 A59 A64 A65 A71 A75 A76 A84 A87 A89 A90 A94 A97 A98	A03 A07 A11 A12 A15 A18 A19 A21 A23 A24 A26 A27 A30 A31 A36 A37 A40 A42 A43 A44 A46 A49 A50 A54 A58 A61 A63 A66 A67 A68 A72 A73 A74 A78 A80 A81 A82 A83 A92 A93 A95 A96 A99
Período 11	A10 A13 A22 A24 A26 A29 A34 A38 A43 A47 A51 A60 A66 A70 A79 A84 A86 A88 A91 A100	A03 A06 A07 A09 A14 A15 A17 A19 A27 A31 A32 A35 A36 A39 A41 A44 A53 A55 A58 A59 A61 A63 A64 A65 A73 A75 A78 A80 A83 A87 A89 A90 A92 A94 A98	A01 A02 A04 A05 A08 A11 A12 A16 A18 A20 A21 A23 A25 A28 A30 A33 A37 A40 A42 A45 A46 A48 A49 A50 A52 A54 A56 A57 A67 A68 A69 A71 A72 A74 A76 A77 A81 A82 A85 A93 A95 A96 A97 A99
Período 12	A22 A25 A29 A38 A51 A60 A64 A86 A88	A05 A07 A08 A11 A15 A16 A20 A32 A33 A35 A37 A39 A40 A44 A45 A46 A55 A56 A57 A59 A65 A68 A72 A77 A78 A80 A81 A82 A83 A85 A92 A94 A97 A98	A01 A02 A03 A04 A06 A09 A10 A12 A13 A14 A17 A18 A19 A21 A23 A24 A26 A27 A28 A30 A31 A34 A36 A41 A42 A43 A47 A48 A49 A50 A52 A53 A54 A58 A61 A63 A66 A67 A69 A70 A71 A73 A74 A75 A76 A79 A84 A87 A89 A90 A91 A93 A95 A96 A99 A100

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Na Tabela 8, como nas simulações anteriores também vamos trazer os resultados ótimos para a parte agrícola, sempre apresentados em m³, levando em conta todos os parâmetros e fatores anteriormente citados, apresentando valores maiores pois dessa vez a propriedade é o dobro da segunda simulação e dez vezes maior que a primeira simulação, levando esta proporção também para a quantidade de animais. Lembrando sempre que os períodos de essas o produto dessas culturas varia muito com o tempo, por isso não podemos comparar as tabelas agrícolas entre a simulação pois elas não estão no mesmo período de tempo.

Tabela 8. Solução de ótima da parte agrícola para a 3ª simulação.

	Milho	Soja	Braquiária	Sorgo	Aveia
Período 1	0	54.466	0	0	0
Período 2	0	0	50.531	0	0
Período 3	0	0	0	0	21.497
Período 4	0	64.173	0	0	0
Período 5	0	0	0	0	43.938
Período 6	0	0	0	0	1.119

Continua...

Continuação da **Tabela 8.**

	Milho	Soja	Braquiária	Sorgo	Aveia
Período 7	39.934	0	0	0	0
Período 8	2.015	0	0	0	0
Período 9	0	0	0	0	94.539
Período 10	0	0	35.099	0	0
Período 11	0	28.436	0	0	0
Período 12	0	36.679	0	0	0

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Ainda como resultado dessa simulação temos a resposta da composição da ração animal na área de confinamento com três cenários apresentado de quantidade mínima. Dessa vez a solução ótima escolhe utilizar quatro dos cinco componentes quando não é exigida uma quantidade mínima, diminuindo para três componentes quando a quantidade mínima é cinco, e escolhendo usar tudo de um mesmo composto quando a quantidade mínima é dez. Isso se deve também a disponibilidade os compostos apresentados, na Tabela 9.

Tabela 9. Solução de ótima para composição da alimentação animal para a 3ª simulação.

Quantidade Mínima Total	Núcleos Minerais e Vitaminas	Farelo de Soja	Farelo de Algodão	Milho	Selagem de Sorgo
0	0.25349	0	0.48576	0.23327	2.2028
5	0.040797	0	0	0.05416	4.905
10	0	0	0	0	10

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Por fim, é importante citar que o tempo para execução das simulações computacionais para 10, 50 e 100 animais foram 1, 20 e 104 segundo. Importante cita o tempo computacional para salientarmos que é totalmente viável a implementação pois a solução é em tempo bastante aceitável, também não podemos deixar de citar que o custo computacional para resolução cresce exponencialmente quando aumentamos a quantidade de animais, uma prova disso é o tempo para resolução estar crescendo de maneira exponencial.

4.6 CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi desenvolvido um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MIXP) para simular a operação ótima do Sistema Integrado Lavoura-Pecuária com Plantio Direto (SILPE-PD). Este modelo maximiza o ganho de peso dos animais, seleciona as culturas anuais mais eficientes e minimiza os custos de alimentação nas áreas confinadas. A integração lavoura-pecuária, associada ao plantio direto, mostrou-se um sistema sustentável, favorecendo a conservação do solo e a ciclagem de nutrientes, ao mesmo tempo em que promove uma produção eficiente tanto agrícola quanto pecuária.

As simulações com diferentes números de animais (10, 50 e 100) demonstraram que o SILPE-PD pode otimizar a movimentação e alimentação dos animais, garantindo o aproveitamento máximo das áreas, como pastagens, lavouras e confinamento. A principal vantagem observada foi a otimização da alimentação animal com componentes de custo-benefício equilibrado, dependendo do estágio de produção e das condições operacionais de cada área.

Assim, o sistema pode ser implementado de forma viável e sustentável, com soluções computacionais rápidas e eficientes, mesmo com um aumento significativo no número de animais.

5. CAPÍTULO II

SISTEMA SILVIPASTORIL - LA AGUADA (RIO CUARTO- CÓRDOBA-ARGENTINA)

5.1 RESUMO

O Sistema Silvipastoril La Aguada, implementado na região de Córdoba, Argentina, é um modelo integrado que combina árvores, pastagens e gado para promover a sustentabilidade agrícola. Esse sistema busca conciliar a produção pecuária com a conservação ambiental, trazendo benefícios como proteção contra a erosão do solo, melhoria das propriedades físicas e químicas do solo e o sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. O capítulo detalha a metodologia de implementação, que utiliza a Programação Linear Inteira para otimizar o manejo do gado, maximizando o ganho de peso e reduzindo custos com confinamento. Além disso, o modelo considera fatores como movimentação dos animais entre diferentes áreas, uso eficiente das pastagens e integração com as condições ambientais locais. A introdução de árvores no sistema oferece sombra e conforto térmico ao gado, melhorando o bem-estar animal e promovendo maior eficiência no ganho de peso. Os resultados demonstraram que o Sistema Silvipastoril La Aguada é uma ferramenta eficiente para aumentar a produtividade agrícola e pecuária, garantindo a preservação ambiental. O modelo ainda apresenta um impacto positivo na qualidade de vida dos produtores, com potencial de replicação em outros contextos. O capítulo conclui que a integração entre práticas agroflorestais e pecuária pode ser uma solução viável para equilibrar sustentabilidade e economia, destacando a importância da modelagem matemática na gestão de sistemas complexos.

Palavras-chave: Sistema Silvipastoril. Sequestro de Carbono. Conforto Térmico. Programação Linear Inteira. Sustentabilidade Agropecuária.

5.2 ABSTRACT

The La Aguada Silvopastoral System, implemented in the Córdoba region of Argentina, it's an integrated model that combines trees, pastures, and livestock to promote agricultural sustainability. This system seeks to reconcile livestock production with environmental conservation, providing benefits such as protection against soil erosion, improvement of soil physical and chemical properties, and carbon sequestration, contributing to the mitigation of climate change. The chapter details the implementation methodology, which uses Integer Linear Programming to optimize livestock management, maximizing weight gain and reducing confinement costs. In addition, the model considers factors such as animal movement between different areas, efficient use of pastures, and integration with local environmental conditions. The introduction of trees into the system provides shade and thermal comfort to livestock, improving animal welfare and promoting greater efficiency in weight gain. The results demonstrated that the La Aguada Silvopastoral System is an efficient tool to increase agricultural and livestock productivity, ensuring environmental preservation. The model also has a positive impact on the quality of life of producers, with potential for replication in other contexts. The chapter concludes that the integration of agroforestry and livestock practices can be a viable solution to balance sustainability and economy, highlighting the importance of mathematical modeling in the management of complex systems.

Key words: Silvopastoral System. Carbon Sequestration. Thermal Comfort. Integer Linear Programming. Agricultural Sustainability.

5.3 INTRODUÇÃO

O Sistema Silvipastoril (SSP) em questão, denominado Sistema Silvipastoril - La Aguada (SSP-LA), é uma tipologia do SSP desenvolvida no assentamento “La Aguada” em Rio Curto (Córdoba-Argentina) e apresentada por Plevich et al. (2019). Na Figura 2, as setas na topologia indicam a possibilidade de os animais transitarem entre as áreas do SSP - LA.

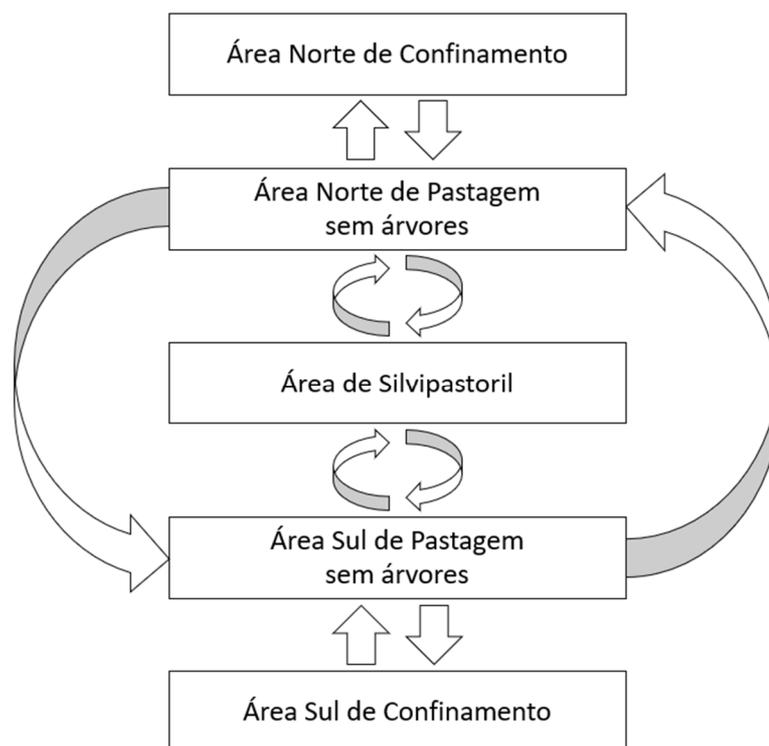


Figura 1. Representação Gráfica do Sistema Silvipastoril -La Aguada (SSP-LA). Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O Sistema Agroflorestal (SAF) é um sistema e tecnologia de uso da terra em que espécies lenhosas perenes (árvores, arbustos, palmeiras, etc.) são utilizadas no mesmo sistema de manejo que culturas agrícolas e/ou produção pecuária, sujeitas a alguma forma de arranjo de tempo ou de espaço. Eles combinam produção e conservação de recursos naturais. Além de encontrar formas de atender às diversas necessidades dos produtores rurais (alimentos, madeira, lenha, forragens, plantas medicinais e fibras), podem contribuir para a conservação do solo, das sub-bacias, da área florestal, da biodiversidade, entre outros (GARCÍA et al, 2004; MACEDO et al, 2000; SAIBRO et al, 2004).

O Sistema Silvipastoril representa um tipo de Sistema Agroflorestal, que inclui técnicas de produção que permitem a integração de animais, pastagens e árvores em uma mesma área. Representam uma forma de uso da terra em que as atividades florestais e pecuárias se combinam para gerar produção de forma complementar, por meio de interações entre seus componentes. Em geral, SSP é um sistema no qual forragens e/ou animais e plantas são cultivados simultaneamente ou sequencialmente na mesma unidade de área. Os sistemas florestais são uma opção tecnológica de integração Lavoura-Pecuária-Floresta que envolve a combinação intencional de árvores, pastagens e pecuária na mesma área e ao mesmo tempo (BERNARDINO et al, 2009; FRANKIE et al, 2001).

A importância dos Sistemas Silvipastoris pode ser compreendida por várias razões: aumento da biodiversidade criada, proteção do solo contra a erosão, melhora as propriedades

físicas e químicas do solo, melhora das pastagens durante a estação seca, maior conforto térmico aos animais (proporcionado pela sombra das árvores e considerável), controle do sub-bosque (obtido pelo pastoreio), aumento da ciclagem de nutrientes no sistema, um aumento significativo na capacidade sequestro de carbono (ou créditos de carbono). Em termos de criação de animais, os benefícios diretos são a saúde e o conforto, a presença de árvores (devidamente colocadas nas pastagens) pode proteger os animais contra os riscos climáticos, tendo um impacto positivo na produtividade e na saúde animal.

Hoje, entre as críticas ao SSP estão: a crescente competição entre espécies vegetais, as dificuldades de trazer máquinas para a área quando as espécies vegetais não são distribuídas de forma organizada e planejada, os danos causados pelo pisoteio animal (compactação do solo).

Com o objetivo de contribuir para melhorar o desempenho da pecuária e combater possíveis danos aos animais no SSP, tentamos criar modelos computacionais para controle ótimo das atividades de pastoreio e migração de animais utilizando Programação Linear Inteira (PLI). Na literatura, Oliveira et al. (2019), apresentaram simulações numéricas de rotação de culturas e trânsito de animais em Sistemas Integrados Lavoura-Pecuária utilizando PLI, como resultado tivemos a criação de cronogramas ótimos em relação à rotação de culturas e ao transporte de animais. O SSP aqui considerado representa a abstração topológica do SSP localizado no assentamento rural “La Aguada”, centro experimental pertence à Universidade Nacional de Rio Cuarto, localizada na província de Córdoba (Argentina).

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Especificações do Sistema

Segundo ressalta o professor e pesquisador Omar Plevich, da Universidad Nacional de Rio Cuarto, os sistemas silvipastoris de Aguada, conhecidos na literatura como "Alley Farming", consistem em áreas onde as vielas variam em largura entre 12 e 21 metros, delimitadas por fileiras duplas de árvores plantadas a uma distância de 2x2 ou 3x3 metros. Existem diferentes configurações desses sistemas, dependendo das espécies lenhosas e herbáceas utilizadas. As principais espécies lenhosas empregadas são *Pinus elliottii*, *Quercus robur*, *Eucalyptus viminalis*, *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* e *Populus deltoides*. As espécies herbáceas utilizadas são aquelas adaptadas ao microclima estabelecido pelo sombreamento das árvores, incluindo *Triticum secale*, *Triticum aestivum*, *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, *Medicago sativa*, *Avena sativa*, *Hordeum vulgare* e *Bromus catharticus*.

Esses sistemas são amplamente utilizados na criação de gado da raça Angus Aberden Angus. Os animais são introduzidos no outono, com cerca de 150 kg, e permanecem no sistema até a primavera, quando alcançam aproximadamente 300 kg. As fêmeas são geralmente destinadas à reposição do rebanho, enquanto os machos são utilizados em sistemas de engorda ou como reprodutores.

O uso de sistemas silvipastoris na criação de gado na Argentina vem ganhando cada vez mais destaque, principalmente devido aos seus múltiplos benefícios ambientais, econômicos e de bem-estar animal. Entre os principais benefícios desses sistemas, destacam-se a melhoria do bem-estar animal, uma vez que as árvores proporcionam sombra e abrigo, reduzindo o estresse térmico do gado e potencialmente aumentando as taxas de crescimento. Além disso, a cobertura arbórea ajuda a conservar o solo, reduzindo a erosão, melhorando sua estrutura e aumentando a infiltração de água.

Outro benefício importante é a diversificação da renda para os produtores, que podem obter receita adicional com a venda de produtos florestais, como madeira, frutas ou resina. Os sistemas silvipastoris também promovem uma maior eficiência no uso de recursos, pois as árvores e as gramíneas exploram diferentes profundidades de solo e têm tempos distintos de demanda por água e nutrientes. Além disso, esses sistemas contribuem para a mitigação das mudanças climáticas, graças ao sequestro de carbono proporcionado pela combinação de árvores e gramíneas. Por fim, os sistemas silvipastoris favorecem a biodiversidade, criando habitats para diversas espécies de flora e fauna.

O SSP-LA representa uma estrutura composta por cinco áreas ou unidades de pastoreio agrícola e movimentação de gado: áreas de pastagem sem árvores, norte e sul; área de confinamento animal, no Norte e no Sul; e uma área de silvipastoril (pastagens + árvores). As áreas de confinamento animal (norte e sul) são áreas onde um certo número de animais pode ser alimentado com dietas diversas que os fazem expressar todas as características genéticas, principalmente ganhar peso em vida.

As dietas utilizadas no confinamento são muitas vezes ricas em concentrados (milho, farinha de soja, sorgo), pois estes alimentos contêm mais nutrientes do que volumosos (capim napier, tifton, tanzânia, etc.). Considerando que o confinamento é caro, comparado a outras áreas do sistema, como informado no capítulo anterior, o confinamento deve ser utilizada como ferramenta de criação e não como sistema de produção global, ou seja, o animal é enviado para esta área quando necessário e pelo menor tempo possível.

As áreas de pastagens sem árvores (norte e sul) formam áreas de trânsito de animais, as pastagens consideradas podem ser naturais, nativas ou artificiais, as diferentes escolhas levam em consideração a criatividade, o solo e o clima da região, bem como as condições do local. As pastagens naturais contêm vegetação nativa composta por várias espécies de gramíneas, ervas

daninhas e arbustos. As pastagens nativas contêm vegetação nativa composta por espécies com valor forrageiro que crescem após a destruição da vegetação original.

A presença de árvores (razoavelmente colocadas em pastagens) pode proteger os animais das intempéries, no que diz respeito ao trânsito de animais (fator chave para o sucesso do SSP-LA) certas regras devem ser respeitadas para permitir uma harmonia entre o pastoreio e o peso vivo de cada animal, entre as regras está o número máximo de animais permitidos em cada área do SSP-LA, que busca reduzir a compactação do solo causada pelo pisoteio dos animais. Lembrando sempre que a compactação é um processo dinâmico e progressivo que resulta em uma densificação proporcional à quantidade de carga aplicada a ela. O pastoreio mal gerido pode levar à redução da porosidade do solo e à capacidade do solo de se infiltrar e armazenar água. Em sistemas mal geridos, permitir que os animais permaneçam durante mais tempo do que o recomendado resultará na compactação da camada superficial do solo. Procuramos manter os animais na área de confinamento o menor tempo possível, em outras palavras, durante a fase final de engorda para efeitos de abate de animais ou em casos que os animais com peso vivo muito inferior ao peso esperado para a sua idade, caso contrário, os animais devem ser transferidos para as áreas pastagem sem árvores. Também dependendo do peso vivo de cada animal e restrições da área de silvipastoril, permitimos a movimentação de animais entre as áreas de silvipastoril e de pastagem sem árvores do norte e do sul. Em geral, os critérios utilizados para mover o gado de uma área para outra dependerão do peso vivo do gado e da adequação de cada área do SSP-LA. Desta forma, temos um conjunto de rotas ou trilhas possíveis entre a área de silvipastoril, as áreas de pastagem sem árvores (norte e sul) e as áreas de confinamento (norte e sul), e entre elas queremos escolher a circulação ótima, isto é, o percurso que cada animal do rebanho deverá seguir na implantação do sistema.

A construção de um modelo PLI representando algumas regras para a movimentação de animais no SSP-LA continua visando controlar de forma otimizada a movimentação dos animais (encontrando formas de maximizar o peso vivo dos animais individuais) e a capacidade das áreas de pastagem sem árvores e silvipastoril. A seguir são apresentados os indicadores, parâmetros, variáveis, restrições e objetivos do PLI relacionados às atividades do SSP-LA.

5.4.2 Índices

$i = 1, \dots, n$; onde n representa o número de animais do rebanho considerado,
 $j = 1$ – área norte de pastagem sem árvores, $j = 2$ – área sul de pastagem sem árvores,
 $j = 3$ – área silvipastoril, $j = 4$ – área norte de confinamento e $j = 5$ – área sul de confinamento.
 $k = 1, \dots, 12$ (meses do ano).

5.4.3 Parâmetros

PV_{ij} – Peso vivo do animal i , na área j (kg).
 PVA_{ij} – Peso vivo para o abatimento do animal i , na área j (kg).
 g_{ijk} – Peso ganho pelo animal i na área j no mês k (kg).
 N_{jk} – Número máximo de animais que podem estar na área j no mês k .
 c_{ijk} – Custo para que a área j fique apta e possa receber o animal i durante o mês k .
 Para cada área j , seja $S_j = \{i: PV_{ij} < PVA_{ij}\}$ e $\bar{S}_j = \{i: PV_{ij} \ll PVA_{ij}\}$.

Ambos conjuntos nos indicam os animais com peso vivo insuficiente para o abate e extremadamente baixo para o abate respectivamente.

5.4.4 Variáveis

$x_{ijk} = 1$	Se a área j se encontra apta para receber o animal i no mês k
$= 0$	Caso contrário
$y_{ijk} = 1$	Se o animal i se encontra na área j no mês k
$= 0$	Caso contrário

5.4.5 Restrições

i) Para cada mês k , o número de animais i que podem permanecer na área j , não pode ultrapassar a quantidade de N_{jk} animais.

$$\sum_{i=1}^n y_{ijk} \leq N_{jk} \quad j = 1,2,3,4,5 \quad k = 1,2, \dots,12$$

ii) Cada animal i deve estar em uma e somente uma área j a cada mês k .

$$\sum_{j=1}^5 y_{ijk} = 1 \quad k = 1,2, \dots,12 \quad i = 1, \dots, n$$

iii) Se o animal i está na área norte de pastagem sem árvores ($j = 1$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, e no mês $k + 1$, a área silvipastoril ($j = 3$) está apta para receber esse animal, então o animal pode ser movimentado à área silvipastoril no mês $k + 1$.

$$x_{i1k} \leq y_{i3(k+1)}, \quad i \in S_1 = \{i: PV_{i1} < PVA_{i1}\}, \quad k = 1, \dots, 11$$

iv) Se o animal i está na área sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, e no mês $k + 1$, a área silvipastoril ($j = 3$) está apta para receber esse animal, então o animal pode ser movimentado à área silvipastoril no mês $k + 1$.

$$x_{i2k} \leq y_{i3(k+1)}, \quad i \in S_2 = \{i: PV_{i2} < PVA_{i2}\}, \quad k = 1, \dots, 11$$

v) Se o animal i está na área silvipastoril ($j = 3$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, e no mês $k + 1$, a área norte de pastagem sem árvores ($j = 1$) está apta para receber esse animal, então o animal pode ser movimentado à área norte de pastagem sem árvores no mês $k + 1$.

$$x_{i3k} \leq y_{i1(k+1)}, \quad i \in S_3 = \{i: PV_{i3} < PVA_{i3}\}, \quad k = 1, \dots, 11$$

vi) Se o animal i está na área silvipastoril ($j = 3$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, e no mês $k + 1$, a área sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) está apta para receber esse animal, então o animal pode ser movimentado à área sul de pastagem sem árvores no mês $k + 1$.

$$x_{i3k} \leq y_{i2(k+1)}, \quad i \in S_3 = \{i: PV_{i3} < PVA_{i3}\}, \quad k = 1, \dots, 11$$

vii) Se o animal i está na área norte de pastagem sem árvores ($j = 1$) no mês k , com peso vivo extremadamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal pode ser movimentado à área norte de confinamento no mês $k + 1$.

$$y_{i1k} \leq y_{i4(k+1)} \quad i \in \bar{S}_1 = \{i: PV_{i1} \ll PVA_{i1}\}, k = 1, \dots, 11$$

viii) Se o animal i está na área sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) no mês k , com peso vivo extremadamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal pode ser movimentado à área sul de confinamento no mês $k + 1$.

$$y_{i2k} \leq y_{i5(k+1)} \quad i \in \bar{S}_2 = \{i: PV_{i2} \ll PVA_{i2}\}, k = 1, \dots, 11$$

ix) Se o animal i está na área norte de pastagem sem árvores ($j = 1$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, e no mês $k + 1$, a área sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) está apta para receber esse animal, então o animal pode ser movimentado à área sul de pastagem sem árvores no mês $k + 1$.

$$x_{i1k} \leq y_{i2(k+1)}, i \in S_1 = \{i: PV_{i1} < PVA_{i1}\}, k = 1, \dots, 11$$

x) Se o animal i está na área sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, e no mês $k + 1$, a área norte de pastagem sem árvores ($j = 1$) está apta para receber esse animal, então o animal pode ser movimentado à área norte de pastagem sem árvores no mês $k + 1$.

$$x_{i2k} \leq y_{i1(k+1)}, i \in S_2 = \{i: PV_{i2} < PVA_{i2}\}, k = 1, \dots, 11$$

xi) Se o animal i está na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal deve permanecer nessa área no mês $k + 1$.

$$y_{i4k} \leq y_{i4(k+1)}, i \in S_4 = \{i: PV_{i4} < PVA_{i4}\}, k = 1, \dots, 11$$

xii) Se o animal i está na área sul de confinamento ($j = 5$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal deve permanecer nessa área no mês $k + 1$.

$$y_{i5k} \leq y_{i5(k+1)}, i \in S_5 = \{i: PV_{i5} < PVA_{i5}\}, k = 1, \dots, 11$$

xiii) Se o animal i está na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês k , com peso vivo extremadamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então esse animal deve permanecer nesta mesma área nos dois meses seguintes.

$$y_{i4k} < y_{i4(k+1)} + y_{i4(k+2)} \quad i \in \bar{S}_4 = \{i: PV_{i4} \ll PVA_{i4}\}, k = 1, \dots, 11$$

xiv) Se o animal i está na área sul de confinamento ($j = 5$) no mês k , com peso vivo extremadamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então esse animal deve permanecer nesta mesma área nos dois meses seguintes.

$$y_{i5k} < y_{i5(k+1)} + y_{i5(k+2)} \quad i \in \bar{S}_5 = \{i: PV_{i5} \ll PVA_{i5}\}, k = 1, \dots, 11$$

xv) Cada animal deve dispor de pelo menos uma área no SSP-LA cada mês do ano.

$$\sum_{j=1}^5 x_{ijk} \geq 1 \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, 12$$

xvi) Se o animal i está na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área silvipastoril ($j = 3$) no mês $k + 1$.

$$y_{i4k} + y_{i3(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xvii) Se o animal i está na área de silvipastoril ($j = 3$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês $k + 1$.

$$y_{i3k} + y_{i4(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xviii) Se o animal i está na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área de sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) no mês $k + 1$.

$$y_{i4k} + y_{i2(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xix) Se o animal i está na área de sul de pastagem sem árvores ($j = 2$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês $k + 1$.

$$y_{i2k} + y_{i4(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xx) Se o animal i está na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área de sul confinamento ($j = 5$) no mês $k + 1$.

$$y_{i4k} + y_{i5(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xxi) Se o animal i está na área de sul de confinamento ($j = 5$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área norte de confinamento ($j = 4$) no mês $k + 1$.

$$y_{i5k} + y_{i4(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xxii) Se o animal i está na área norte de pastagens sem árvores ($j = 1$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abatimento, então o animal não deve estar na área de sul confinamento ($j = 5$) no mês $k + 1$.

$$y_{i1k} + y_{i5(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xxiii) Se o animal i está na área de sul de confinamento ($j = 5$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abate, então o animal não deve estar na área norte de pastagens sem árvores ($j = 1$) no mês $k + 1$.

$$y_{i5k} + y_{i1(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xxiv) Se o animal i está na área de Silvopastoril ($j = 3$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abate, então o animal não deve estar na área de sul confinamento ($j = 5$) no mês $k + 1$.

$$y_{i3k} + y_{i5(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xxv) Se o animal i está na área de sul de confinamento ($j = 5$) no mês k , com peso vivo estritamente menor que o peso adequado para seu abate, então o animal não deve estar na área de Silvopastoril ($j = 3$) no mês $k + 1$.

$$y_{i5k} + y_{i3(k+1)} \leq 1, \quad k = 1, \dots, 11$$

xxvi) O animal i só poderá ocupar a área j no mês k , se esta área estiver disponível para ser ocupada.

$$y_{ijk} \leq x_{i1k}, \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad k = 1, 2, \dots, 12 \quad i = 1, \dots, n$$

O PLI para um controle ótimo da movimentação bovina no SSP-LA, pode ser representado como a seguir, considerando que foi utilizado a linguagem computacional (Octave) para a simulação numérica e desenvolvimento de soluções ótimas:

$$\text{Maximizar} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{12} g_{ijk} y_{ijk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{12} c_{ijk} x_{ijk}$$

Sujeito a:

$$\begin{array}{ll} \sum_{i=1}^n y_{ijk} \leq N_{jk} & j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad k = 1, 2, \dots, 12 \\ \sum_{j=1}^5 y_{ijk} = 1 & k = 1, 2, \dots, 12 \quad i = 1, \dots, n \\ \sum_{k=1}^{12} x_{ijk} \geq 1 & i = 1, \dots, n \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \\ x_{i1k} \leq y_{i3(k+1)} & i \in S_1 = \{i: PV_{i1} < PVA_{i1}\}, k = 1, \dots, 11 \\ x_{i2k} \leq y_{i3(k+1)} & i \in S_2 = \{i: PV_{i2} < PVA_{i2}\}, k = 1, \dots, 11 \\ x_{i3k} \leq y_{i1(k+1)} & i \in S_3 = \{i: PV_{i3} < PVA_{i3}\}, k = 1, \dots, 11 \\ x_{i3k} \leq y_{i2(k+1)} & i \in S_3 = \{i: PV_{i3} < PVA_{i3}\}, k = 1, \dots, 11 \\ y_{i1k} \leq y_{i4(k+1)} & i \in \bar{S}_1 = \{i: PV_{i1} \ll PVA_{i1}\}, k = 1, \dots, 11 \\ y_{i2k} \leq y_{i5(k+1)} & i \in \bar{S}_2 = \{i: PV_{i2} \ll PVA_{i2}\}, k = 1, \dots, 11 \\ x_{i2(k+1)} \leq y_{i2(k+1)} & i \in S_1 = \{i: PV_{i1} < PVA_{i1}\}, k = 1, \dots, 11 \\ x_{i1(k+1)} \leq y_{i1(k+1)} & i \in S_2 = \{i: PV_{i2} < PVA_{i2}\}, k = 1, \dots, 11 \\ y_{i4k} \leq y_{i4(k+1)} & i \in S_4 = \{i: PV_{i4} < PVA_{i4}\}, k = 1, \dots, 11 \\ y_{i5k} \leq y_{i5(k+1)} & i \in S_5 = \{i: PV_{i5} < PVA_{i5}\}, k = 1, \dots, 11 \\ y_{i4k} \leq y_{i4(k+1)} & i \in \bar{S}_4 = \{i: PV_{i4} \ll PVA_{i4}\}, k = 1, \dots, 11 \\ y_{i4k} \leq y_{i4(k+2)} & i \in \bar{S}_4 = \{i: PV_{i4} \ll PVA_{i4}\}, k = 1, \dots, 10 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
y_{i5k} &\leq y_{i5(k+1)} & i \in \bar{S}_5 = \{i: PV_{i5} \ll PVA_{i5}\}, k = 1, \dots, 11 \\
y_{i5k} &\leq y_{i5(k+2)} & i \in \bar{S}_5 = \{i: PV_{i5} \ll PVA_{i5}\}, k = 1, \dots, 10 \\
y_{i4k} + y_{i3(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i3k} + y_{i4(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i4k} + y_{i2(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i2k} + y_{i4(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i4k} + y_{i5(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i5k} + y_{i4(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i1k} + y_{i5(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i5k} + y_{i1(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i3k} + y_{i5(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{i5k} + y_{i3(k+1)} &\leq 1 & k = 1, \dots, 11 \\
y_{ijk} &\leq x_{i1k}, \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 & k = 1, 2, \dots, 12 \quad i = 1, \dots, n \\
&& x_{ijk}, y_{ijk} = 0, 1
\end{aligned}$$

Na programação linear (PL), existem condições de otimização necessárias e suficientes teoricamente comprovadas que podem ser usadas para testar efetivamente se uma determinada solução viável é a ótima ou não. Essas condições têm sido usadas para desenvolver métodos algébricos, como simplex e outros métodos de resolução de problemas de PL. Na Programação Linear Inteira (PLI), não existem condições de otimalidade conhecidas para testar se uma determinada solução viável é ótima, a não ser para comparar explícita ou implicitamente essas soluções entre si. É por isso que estes problemas são resolvidos através de métodos de enumeração que procuram a solução ótima no conjunto de soluções possíveis, como neste caso. Através da implementação de simulação computacional, pudemos verificar que o programa cumpriu todas as restrições impostas, maximizou o ganho de peso de cada animal e minimizou os custos associados à adaptação à área correspondente do SSP-LA.

Ainda temos que salientar a complexidade computacional do modelo matemático anteriormente apresentado, devido a grande quantidade de restrições, o leva a ser classificado como modelo de grande porte, ou seja, modelo matemático com alto custo computacional para resolução, lembrando que o custo computacional para este tipo de modelo enquanto estamos aumentando a quantidade de animais de forma linear, esse custo é aumentado de forma exponencial. Justificando assim a quantidade baixa de animais apresentados nos desenvolvimentos a seguir e direcionando o trabalho para agricultura familiar, onde a quantidade de animais não é tão abundante.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após apresentar o modelo de movimentação bovina do SSP-LA, optamos por desenvolver nossa simulação computacional no Octave (GNU Octave) na versão 8.2.0. O Octave, um software livre e de alta performance, é uma linguagem de programação ideal para aplicações numéricas. Ele fornece um ambiente completo para resolver problemas matemáticos, incluindo aqueles que envolvem otimização linear e inteira. A biblioteca GNU Linear Programming Kit (GLPK), integrada ao Octave permite modelar e resolver problemas de otimização, onde buscamos encontrar a melhor solução dentre um conjunto de opções, respeitando determinadas restrições. Essa ferramenta é amplamente utilizada em diversas áreas, como engenharia, economia e ciência da computação. Visto isso escolhemos essa biblioteca (GLPK) para resolução deste problema computacional.

Temos a nossa disposição o seguinte hardware disponível para rodarmos: Notebook com processor Intel Core i7 de 7ª geração (i7-7500U / 4M Cache, up to 3.50 GHz), com memória RAM de 8GB (2400MHz) e rodando sistema operacional Windows 10 Professional.

Tendo em vista o software Octave e o hardware disponível, procedemos à implementação da programação. A geração de números aleatórios dentro de intervalos predefinidos foi crucial para simular fenômenos como a flutuação de peso do gado. Através de testes extensivos, verificamos a conformidade do modelo com todas as restrições estabelecidas.

A Tabela 10 a seguir é fruto de nossa primeira simulação computacional, onde foi escolhido o número de 10 animais (bovino de corte) e abaixo na nossa tabela todos os animais estão indicados pela letra “A” seguido do número do animal. Já importante observar que cada animal tem pelo menos uma vaga disponível em cada período de tempo, pois além de ter uma restrição os animais não podem sair do sistema durante todo o tempo as simulações (12 períodos).

Observamos também algumas particularidades na Tabela 10, como a não disponibilidade de receber animais na área de confinamento norte, isso pode correr por vários fatores como por exemplo a área de confinamento sul apresentar uma maior taxa de engorda que a de confinamento norte, por fatos específicos como a irradiação solar ou oferta de águas, ou outro exemplo é que o custo para o animal utilizar a área de confinamento sul é bem menor que o do confinamento norte.

Outro ponto que vale a pena ser observado, é resolução ótima ter “reservado” para cada um dos 10 animais em dada período dos 12 períodos um lugar no confinamento sul, isso se deve a preocupação de não perder o animal e ter um lugar para onde deve ser enviado caso ele esteja abaixo do peso ou excessivamente abaixo do peso.

A baixa disponibilidade de utilização por animais na área de silvipastoril explicasse por vários fatores como proteção da parte florestal evitando por exemplo a compactação do solo ou outro prejuízo que inviabilizasse outra atividade que não fosse a pecuária.

Tabela 10. Tabela de disponibilidade de alocação para 1ª simulação com 10 animais.

	Confinamento Norte	Pastagem Norte	Silvipastoril	Pastagem Sul	Confinamento Sul
Período 1		A3	A1 A2	A4 A9	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 2		A2		A1 A3	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10

Continua...

Continuação da Tabela 10.

Confinamento Norte	Pastagem Norte	Silvipastoril	Pastagem Sul	Confinamento Sul
Período 3	A3	A2	A4 A8 A9	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 4	A9	A8	A1 A2 A3 A4	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 5	A3		A1 A8 A9	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 6	A3			A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 7			A1 A3	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 8			A3	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 9	A3		A4 A8	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 10		A4	A2 A3	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 11	A3		A4 A9	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 12	A3 A9		A2 A6 A8	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Agora temos a Tabela 11, que representa a escolha ótima uma vez observada a disponibilidade para cada animal na tabela anterior. É importantíssimo primeiramente observar que todas as vezes que é disponibilizada a área de silvipastoril a solução escolhe área, por esta área apresentar menor valor custo de engorda do animal além de outros fatores que levam uma melhor qualidade de vida para o animal e assim um mais rápido ganho de peso, como o sombreamento animal.

Na Tabela 11, muitos animais (animais 5, 6, 7 e 10) começaram na área de confinamento sul e por lá ficaram durante todos o tempo, isso pode se explicar por diversos fatores que impedem estes animais de irem para a área de pastagem sul que é a única área que faz o trânsito com essa área pelo modelo, uma primeira explicação é estes animais estarem com banho de peso baixo ou muito baixo do normal (levando em conta as características individuais de cada animal), outro fator que pode explicar esse fenômeno é a não disponibilidade de lugar na área de pastagem sul por superlotação ou outro fator que impeça o trânsito.

O trânsito de animais entre pastagens sul e pastagem norte é bem interessante de ser observado uma vez que o existe fatores de engorda do gado, e por essas áreas apresentar um custo muito parecido para esta atividade, a solução passa por troca de animais entre essas duas áreas visto que não há disponibilidade de enviar estes animais para a área de silvipastoril.

Tabela 11. Solução ótima levando-se em conta disponibilidade para 1ª simulação com 10 animais.

	Confinamento Norte	Pastagem Norte	Silvipastoril	Pastagem Sul	Confinamento Sul
Período 1		A3	A1 A2	A4 A9	A5 A6 A7 A8 A10
Período 2		A2		A1 A3	A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 3		A3	A2	A4 A8 A9	A1 A5 A6 A7 A10
Período 4		A9	A8	A1 A2 A3 A4	A5 A6 A7 A10
Período 5		A3		A1 A8 A9	A2 A4 A5 A6 A7 A10
Período 6		A3			A1 A2 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 7				A1 A3	A2 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 8				A3	A1 A2 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 9		A3		A4 A8	A1 A2 A5 A6 A7 A9 A10
Período 10			A4	A2 A3	A1 A5 A6 A7 A8 A9 A10
Período 11		A3		A4 A9	A1 A2 A5 A6 A7 A8 A10
Período 12		A3 A9	A4	A2 A6 A8	A1 A5 A7 A10

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com o mesmo hardware que rodamos a primeira simulação, fizemos uma segunda rodada com outros parâmetros também gerados aleatoriamente, agora para vinte animais. Abaixo temos a primeira tabela retirada a partir dos dados gerados (Tabela 12), onde é possível observar a disponibilidade de cada animal de ocupar as áreas em cada um dos 12 períodos, tendo pelo menos uma vaga disponível em uma área em cada período apresentado, pois não foi possível remover ou retirar animal(is) durante o espaço de tempo apresentado.

Ainda na Tabela 12, podemos observar que, como na primeira simulação, cada um os 20 animais têm a disponibilidade de ocupar o confinamento sul durante cada período, isso se deve a possível necessidade de enviar os animais com peso baixo ou extremamente baixo para essa área para se recomporem, ou ainda, irem para esta área o(s) animal(is) uma vez observando a incapacidade de outras área de receber outro animal.

Uma diferença que podemos observar entre a mesma tabela da primeira e segunda simulação é que nessa simulação há disponibilidade para utilização do confinamento norte, embora que notadamente a área de confinamento sul seja mais interessante avaliando um todos de fatores que equilibram a taxa de engorda do gado durante cada período e o custo para esta engorda, há necessidade da disponibilidade da área de confinamento norte uma vez que essas taxa e custos não seja muito diferentes para área de confinamento sul e ainda a necessidade de enviar e/ou permanecer alguns animais nesta área, pesando esses fatores como um todo como resultado final da engorda do gado sendo mais eficiente do que outro tipo de disponibilidade.

Tabela 12. Tabela de disponibilidade de alocação para 2ª simulação com 20 animais.

	Confinamento Norte	Pastagem Norte	Silvipastoril	Pastagem Sul	Confinamento Sul
Período 1	A2 A11	A4		A14 A15 A17	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 2	A2	A11	A4 A14 A15	A13 A19	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 3	A2	A4	A11	A14 A15	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 4	A2		A4 A15	A11 A14	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 5	A2	A4 A14		A9 A10 A11 A13 A15	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 6	A2	A9 A11	A4	A7 A10 A13 A14 A15 A17 A19	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 7	A2 A11	A4 A19		A7 A9 A10	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 8	A2	A4 A11 A19		A7 A17	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 9	A2 A19		A4	A7 A9 A10 A11 A17	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 10	A2	A4 A9 A19		A7 A13	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 11	A2 A9 A19		A4	A17	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20
Período 12	A9 A19	A2	A4	A7 A17	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A19 A20

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A seguir temos a última simulação (2ª simulação do SSP-LA), onde podemos observar a tabela (Tabela 13) ótima para nossa simulação com 20 animais. O primeiro fator que notamos é que, assim como na primeira simulação para este modelo, é utilizada a área de silvipastoril sempre que disponível para todos os animais. Também temos animais presentes na área de confinamento, seja ela norte ou sul, que permanecem durante todo ou quase todo o tempo com esse comportamento, justificado por fatores como a não disponibilidade desses animais ocuparem outras áreas do sistema, por estarem com peso baixo ou extremamente baixo levando em conta cada as particularidades de cada animal ou a lotação de outras áreas.

Na Tabela 13, observa-se nitidamente que os animais ficam na área de pastagem, seja elas norte ou sul, aguardando para ocupar a área de silvipastoril quando disponível para trânsito. Porém, nessa simulação não se observa trânsito frequente entre as áreas de pastagem norte e a de pastagem sul e vice-versa, como foi frequente na simulação anterior (10 animais).

Tabela 13. Solução ótima levando em conta disponibilidade para 2ª simulação com 20 animais.

	Confinamento Norte	Pastagem Norte	Silvipastoril	Pastagem Sul	Confinamento Sul
Período 1	A2 A11	A4		A14 A15 A17	A1 A3 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A12 A13 A16 A18 A19 A20
Período 2	A2	A11	A4 A14 A15	A13 A19	A1 A3 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A12 A16 A17 A18 A20
Período 3	A2	A4	A11	A14 A15	A1 A3 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A12 A13 A16 A17 A18 A19 A20
Período 4	A2		A4 A15	A11 A14	A1 A3 A5 A6 A7 A8 A9 A10 A12 A13 A16 A17 A18 A19 A20
Período 5	A2	A4 A14		A9 A10 A11 A13 A15	A1 A3 A5 A6 A7 A8 A12 A16 A17 A18 A19 A20
Período 6	A2	A9 A11	A4	A7 A10 A13 A14 A15 A17 A19	A1 A3 A5 A6 A8 A12 A16 A18 A20
Período 7	A2 A11	A4 A19		A7 A9 A10	A1 A3 A5 A6 A8 A12 A13 A14 A15 A16 A17 A18 A20
Período 8	A2	A4 A11 A19		A7 A17	A1 A3 A5 A6 A8 A9 A10 A12 A13 A14 A15 A16 A18 A20
Período 9	A2 A19		A4	A7 A9 A10 A11 A17	A1 A3 A5 A6 A8 A12 A13 A14 A15 A16 A18 A20
Período 10	A2	A4 A9 A19		A7 A13	A1 A3 A5 A6 A8 A10 A11 A12 A14 A15 A16 A17 A18 A20
Período 11	A2 A9 A19		A4	A17	A1 A3 A5 A6 A7 A8 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A18 A20
Período 12	A9 A19	A2	A4	A7 A17	A1 A3 A5 A6 A8 A10 A11 A12 A13 A14 A15 A16 A18 A20

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Sobre as simulações feitas, é necessário analisar o tempo de execução, para a primeira, com 10 animais, foi gasto o tempo de 30 segundos e para segunda, com 20 animais, 175 segundos, observando essas e outras simulações com outras quantidades de animais observa-se um aumento exponencial na complexidade e conseqüentemente no tempo de execução que se relaciona diretamente com a quantidade de animais.

Foi limitado em vinte o número de animais para as simulações computacionais, pois atende a maioria das propriedades de agricultores familiares, com atividades agrofloretais (CAMARGO, 2017), apresentando capacidade computacional satisfatória. Os fatores que limitaram a ampliação do número de animais foram o aumento exponencial na complexidade computacional e o hardware disponível para as simulações. Sendo importante ainda ressaltar, que pode ser aumentada substancialmente a quantidade de animais com pequenos ajustes no código do Octave e diante da disponibilidade de hardware melhor para as simulações.

5.6 CONCLUSÕES

Para concluir este Capítulo II sobre o Sistema Silvopastoril La Aguada (SSP-LA), é essencial reafirmar a complexidade e os avanços proporcionados por esse sistema no manejo sustentável de gado na região de Córdoba, Argentina. A implementação do SSP-LA, caracterizada pela combinação de árvores, pastagens e gado em uma mesma área, reforça a importância de sistemas agroflorestais que integram produção animal com conservação ambiental, resultando em benefícios ecológicos e econômicos.

O estudo dos benefícios práticos do SSP-LA evidenciou a relevância desse modelo para o aumento da resiliência e da sustentabilidade no setor agropecuário. Esse sistema proporciona vantagens ecológicas, como proteção contra a erosão do solo, melhoria das condições químicas e físicas do solo, além de contribuir para o sequestro de carbono, fator essencial na mitigação das mudanças climáticas. Do ponto de vista do bem-estar animal, o conforto térmico proporcionado pelo sombreamento das árvores, a proteção contra intempéries e a menor exposição ao estresse térmico colaboram para uma criação de gado mais saudável e produtiva. Essas condições também resultam em uma taxa de engorda mais eficiente, refletindo diretamente na produtividade e na qualidade dos produtos gerados.

Do ponto de vista metodológico, a simulação computacional baseada na Programação Linear Inteira (PLI) foi uma ferramenta crucial para alcançar um modelo de gestão otimizado das movimentações bovinas. Essa abordagem permitiu que o modelo propusesse rotas de movimentação entre as áreas do sistema de forma a maximizar o ganho de peso dos animais, minimizando simultaneamente os custos associados às áreas de confinamento e silvipastoris. Embora a implementação computacional apresente desafios, como o aumento exponencial do tempo de processamento à medida que o número de animais aumenta, o uso de um hardware mais avançado e ajustes no código de programação poderiam ampliar significativamente a capacidade de simulação. Dessa forma, o modelo proposto oferece uma solução viável para o manejo eficiente de pequenos rebanhos em propriedades de agricultores familiares, o que reforça o potencial do SSP-LA em cenários de produção em pequena escala.

O sistema SSP-LA, respaldado pelos resultados das simulações e pela literatura, se destaca como uma solução promissora para a pecuária sustentável. A combinação entre a prática agroflorestal e o uso de tecnologias de otimização é fundamental para o desenvolvimento de métodos de produção que são, ao mesmo tempo, produtivos e ambientalmente responsáveis. O aprofundamento futuro em variáveis adicionais, como a análise de impacto climático regional e adaptações do modelo para diferentes tamanhos de rebanho e configurações de vegetação, poderá ampliar o alcance e a aplicabilidade do sistema, reafirmando a sua relevância no contexto de práticas agrícolas sustentáveis e na preservação do meio ambiente.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O modelo de Programação Linear Inteira Mista (MIXP) aplicado ao Sistema Integrado Lavoura-Pecuária com Plantio Direto (SILPE-PD) provou-se ser uma ferramenta eficiente para otimizar a produção pecuária de forma sustentável. Esse sistema não só maximiza o ganho de peso dos animais e seleciona culturas agrícolas adequadas, como também reduz os custos com alimentação nas áreas de confinamento, promovendo uma integração vantajosa entre lavoura e pecuária. As simulações realizadas mostraram que, mesmo com variações na quantidade de animais, o SILPE-PD permite uma gestão otimizada do uso das áreas disponíveis, garantindo um equilíbrio entre custo-benefício nos diferentes estágios de produção. Dessa forma, o modelo MIXP, além de viável em termos de tempo de execução, também reforça o potencial do SILPE-PD em atender demandas sustentáveis na produção agropecuária, destacando-se como um sistema robusto para a conservação de recursos naturais e a eficiência produtiva.

A implementação do Sistema Silvipastoril La Aguada (SSP-LA) representa uma abordagem inovadora e eficaz para a pecuária sustentável na região de Córdoba, Argentina. Os resultados obtidos evidenciam não apenas os benefícios econômicos associados à produção animal integrada com práticas agroflorestais, mas também ressaltam a importância desse modelo para a conservação ambiental e a resiliência dos sistemas de produção. A utilização de Programação Linear Inteira como ferramenta de simulação foi fundamental para otimizar as rotas de movimentação dos animais e maximizar o ganho de peso, demonstrando que é possível conciliar produtividade com práticas de manejo que favorecem a recuperação dos recursos naturais. Assim, o SSP-LA se destaca como um exemplo valioso para futuras iniciativas que visam aprimorar a sustentabilidade no setor agropecuário, reforçando a necessidade de adaptações contínuas e de pesquisa aprofundada para potencializar seus benefícios em diferentes contextos de produção.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil, com sua robusta atividade de pecuária de corte, consolidou-se como um dos principais protagonistas no mercado global de carne bovina. Fatores como a adaptação de práticas de segurança alimentar, a criação de gado a pasto e a implementação de políticas sanitárias têm sido fundamentais para a competitividade e aceitação dos produtos brasileiros no mercado internacional. Além disso, o setor enfrenta o desafio de aumentar a produção para atender à crescente demanda mundial por alimentos, o que implica a necessidade de intensificar a produtividade de maneira sustentável e eficiente. Esse cenário impõe pressões sobre os sistemas de produção, especialmente em relação à preservação ambiental e aos custos de recuperação de áreas degradadas. Assim, o setor pecuário brasileiro continua evoluindo com vistas a equilibrar sua capacidade produtiva com a conservação dos recursos naturais, visando uma presença cada vez mais forte e sustentável nos mercados interno e externo.

O presente estudo, apoiado pela literatura abordada, reforça e consolida a relevância dos sistemas integrados de produção agropecuária para o desenvolvimento sustentável, enfatizando-se os avanços na aplicação de tecnologias de programação matemática em modelos de otimização, como os sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (iLPF). Esses modelos destacam-se por sua capacidade de promover uma produção eficiente que simultaneamente respeita as limitações ambientais, otimiza o uso de recursos e contribui para a mitigação de emissões de carbono, aspectos essenciais na busca por uma agricultura de baixo impacto ambiental.

Os métodos de Programação Linear Inteira Mista (MIXP) são fundamentais na construção de modelos otimizados para sistemas agropecuários integrados. A abordagem matemática apresentada permite não apenas a maximização dos recursos disponíveis, como também a adaptação de estratégias específicas para diferentes contextos e condições de produção. A aplicação de técnicas como a Programação Linear e Inteira contribui para a modelagem detalhada e precisa de problemas complexos, promovendo soluções que aumentam a eficiência na utilização de insumos e a sustentabilidade econômica. Portanto, demonstrou-se aqui a importância do uso de métodos quantitativos no desenvolvimento de sistemas agropecuários modernos e sustentáveis, cuja aplicabilidade prática pode ser ampliada por meio de simulações e ajustes contínuos no modelo de acordo com a variação das demandas operacionais.

O Sistema Integrado Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) contribui para a agricultura sustentável integrando práticas agrícolas e pecuárias de forma harmoniosa e ambientalmente responsável. O modelo iLPF não apenas melhora a eficiência no uso dos recursos naturais, mas também favorece a conservação do solo e o bem-estar animal, otimizando o uso de insumos e minimizando impactos ambientais. Além disso, a implementação de métodos de otimização, como a Programação Linear Inteira Mista, oferece uma solução eficaz para o manejo e movimentação dos animais, aumentando a produtividade e garantindo uma gestão eficiente das áreas cultiváveis e pastoris. Esse sistema integrado demonstra um potencial significativo para ser ampliado e adaptado a diferentes realidades rurais, especialmente em contextos de agricultura familiar, onde as práticas sustentáveis e a maximização da eficiência dos recursos são vitais para o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental.

Este trabalho apresenta ainda panorama detalhado das práticas agropecuárias argentinas, com destaque para as espécies bovinas mais apropriadas aos sistemas silvipastoris. A análise das raças Hereford, Angus, Brangus e Criollo na Argentina evidenciou que essas raças possuem características que atendem tanto aos requisitos de produção de carne quanto à adaptação climática e de manejo, aspectos essenciais para o sucesso de um sistema silvipastoril sustentável. A seleção de espécies adequadas contribui para o desenvolvimento de um sistema

equilibrado que otimiza tanto a produtividade quanto a conservação ambiental, reforçando a viabilidade dos sistemas integrados na pecuária argentina.

Ressalta-se a importância dos sistemas integrados de produção, como o Sistema Silvopastoril La Aguada – SSP-LA (Argentina) e o Sistema Integrado Lavoura-Pecuária com Plantação Direta – SILPE-PD (Brasil), na promoção da sustentabilidade e da eficiência agropecuária. Esses sistemas combinam práticas agroflorestais e o uso de tecnologias de otimização, destacando-se como alternativas viáveis para um manejo mais sustentável. O SSP-LA, em particular, mostrou-se eficaz na melhoria das condições ecológicas e na mitigação das mudanças climáticas, ao passo que o SILPE-PD mostrou-se ser uma solução promissora para maximizar a produtividade em áreas com culturas agrícolas e pastagens. A aplicação desses modelos em pequenas propriedades familiares reforça o seu potencial para a promoção de uma propriedade pecuária responsável e integrada ao meio ambiente, contribuindo para o desenvolvimento de práticas agrícolas que aliam a produtividade e a preservação ambiental.

É relevante chamar a atenção para os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (Organização das Nações Unidas), nomeados e numerados por aquela organização, e especialmente alguns deles, permeados ao longo desta Tese, para os quais ela mais contribuiu sendo: Fome Zero e Agricultura Sustentável (2); Trabalho Decente e Crescimento Econômico (8); Indústria, Inovação e Infraestrutura (9); Consumo e Produção Responsáveis (12); e Ação contra a Mudança Global do Clima (13).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, M. J. T. G. **Apoio à decisão em problemas de programação inteira e inteira-mista multiobjetivo**: contribuições metodológicas; Universidade de Coimbra (Portugal), 2000.
- ANDRADE, E.; FURST, P.; PARGA, P. **Elementos de Programação Linear**. 4. ed., Seropédica/RJ: EDUR, 2010.
- BALAKRISHNAN, V.; BOYD, S.; BALEMI, S. Branch and bound algorithm for computing the minimum stability degree of parameter-dependent linear systems. **Int. J. of Robust and Nonlinear Control**, 1(4); p. 295–317, 1991.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTÍNEZ, G. B. Contribuições dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) para uma agricultura de baixa emissão de carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**; v. 4(6), p. 63-75; 2011.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P. D., KLUTHCOUSKI, J., GALERANI, P. R., VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **Informações Agronômicas**, n. 138(7), p. 1-14; 2012
- BERNARDINO, F. S.; GARCIA, R. Sistemas Silvopastoris. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 60, p. 77-87, 2009.
- CAMARGO, G. M. **Sistemas Agroflorestais biodiversos**: Uma análise da sustentabilidade socioeconômica e ambiental; Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios; Universidade Federal de Grande Dourados; 2017.
- CARVALHO, M. A. C. Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de semeadura direta e convencional. **Pesq. Agro. Bras.**, v. 39, p.47-53, 2004.
- CERQUEIRA, C. L.; MÔRA, R.; TONINI, H.; ARCE, J. E.; LISBOA, G. D. S.; DINIZ, C. C. C.; CARVALHO, S. P. Modelagem do volume de eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Advances in Forestry Science**; v. 7(4); p. 213-221; 2020.
- CHACÓN RAMÍREZ, E. A., CARDILLO, J., MORA, L., HERNÁNDEZ, M. Y.; ¿Una posibilidad de mejora en el campo venezolano o una solución para la agricultura en Venezuela?. **Agroalimentaria Journal-Revista Agroalimentaria**; v. 28, n. 55; p. 213-239; 2023.
- CHAVES, C. ; MILOCA, S. A. Algoritmo Branch-and-Bound e aplicação ao problema do caixeiro viajante. **Proceedings...** Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 6, n. 1, 2018.
- COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Sistema Santa Fé: produção de forragem na entressafra. WORKSHOP INTERNACIONAL PROGRAMA DE INTEGRAÇÃO AGRICULTURA E PECUÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DAS SAVANAS SULAMERICANAS, 2001, Santo Antonio de Goiás. **Anais...** Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001. p.125-135.
- COSTA, F. P.; CEZAR, I. M.; MELO FILHO, G. A.; BUNGENSTAB, D. J. **Custo-benefício dos sistemas de produção em integração**. Sistemas de integração lavoura pecuária-floresta: A produção sustentável; p. 209-215; 2012.
- DE OLIVEIRA, T. P. A., PANTOJA, M. J., BRISOLA, M. V. Plano ABC: Contribuições teóricas para o novo paradigma da agropecuária e uma proposta de avaliação; **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. v. 9(3); p. 719-740; 2016.
- DELGADO, A. R. S.; VENTURA, S. D.; RODRIGUES, P. C. P. Otimização da receita líquida com produção agrícola por área irrigada limitada. **Revista Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, vol. 8, n. 2, p. 92-108, 2016.

- DELGADO, A. R. S.; VALE, I. G.; PLEVICH, J. O.; MARQUES, M. A.; VENTURA, S. D.; NASCIMENTO, V. T.; SILVA, W. S. **Optimization of Production and Net Revenue in Integrated Crop-Livestock Systems and Agroforestry Systems**; Editora Eliva Press; 1ª ed; 2021
- DELGADO, A. R. S.; VENTURA, S. D.; DIB, M.; RODRIGUES, P. P.; Rotações de culturas agrícolas utilizando programação inteira binária. **Revista eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 5, n. 3, p. 428-442, 2013.
- DELGADO, A. R. S.; VENTURA, S. D. **Leituras em Agromatemática**; Editora Appris; 1ªd; 2020.
- DIAS, C. M. O.; OLIVEIRA, W. S., SILVEIRA, C. J. S.; ROCHA, H. C. R. Avaliação da produção de matéria seca de diferentes plantas forrageiras no sistema ILPF (integração lavoura pecuária floresta) na região do médio sudoeste baiano. **Brazilian Journal of Development**, 7(12), p.78-84; 2021.
- FERRAZ, C. O.; PINTO, W. F. Tecnologia da Informação para a agropecuária: utilização de ferramentas da tecnologia da informação no apoio a tomada de decisões em pequenas propriedades. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Embrapa, v. 3(1); p. 38-49; 2017.
- FERREIRA, A. D.; SERRA, A. P.; MELOTTO, A. M.; BUNGENSTAB, D. J.; LAURA, V. A. **Manejo das árvores e propriedades da madeira em sistema de ILPF com eucalipto. ILPF inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília: Embrapa, 2019.
- FERREIRA, A. F. A.; TOLEDO, C. E.; NOGUEIRA, J. C. M.; CAMARGO, A.A.; ALVES, G.F.; ARAUJO, F. C. Mathematical Modeling is to Gain Insights Physicals Soil-Plants in Systems Modelagem matemática e ensaios de ganho físicos solo-planta em sistemas. **Brazilian Journal of Development**; v. 7(1); p. 55-69; 2021.
- FERREIRA, J. M. L.; MAURICIO, R. M.; MADUREIRA, A. P. Oportunidades e desafios na Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. **Informe Agropecuário**, v. 31, nº, 257, p.112-120, 2010.
- FRANKE, I. L., FURTADO, S. C. Sistemas silvipastoris: fundamentos e aplicabilidade. Rio Branco, AC: Embrapa Acre; p. 51 il color (Embrapa Acre. **Documentos**, 74); 2001.
- FREIRE, D. N.; CAVICHOLI, F. A. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF): uma estratégia tecnológica para o agronegócio. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19(2), p.680-690; 2022.
- GARCÍA, B. L.; ONG, C. K.; Ecological interactions, management lessons and 12 design tools in tropical agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, 61; p. 221-236; 2004.
- GARFINKEL, R. S.; NEMHAUSER, G. L. **Integer Programming**, John Wiley & Sons, Inc., p. 312-332, 1972.
- GARRETT, R. D.; GIL, J. D. B.; VALENTIM, J. D. **Transferência de tecnologia: desafios e oportunidades para Adoção de ILPF na Amazônia brasileira legal. ILPF: Inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**; Embrapa; p. 599-615; 2019.
- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**; Editora da Universidade UFRGS; 2001.
- GOMES, I. Sustentabilidade social e ambiental na agricultura familiar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5(1); 2005.
- GONÇALVES, S. L.; GAUDENCIO, C. A.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R.; GARCIA, A. **Rotação de Culturas**. Londrina: Embrapa Soja, (Embrapa Soja. Circular Técnica, 45). 9 p. 2007.

- GONZAGA, V. D.; JÚNIOR, M. V. B.; STRAUSS, E.; NASCIMENTO, V. T. O marco revolucionário da engenharia de dados na agropecuária 4.0. **Projectus**, v. 7(4), p. 50-59, 2022.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Resultados Definitivos. 2017a. Disponível: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em 02 de set. de 2024.
- KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H.; **Integração Lavoura-Pecuária**. Embrapa. Equipe Sistemas Santa Fé, p.570, 2011.
- KU, W. Y.; BECK, C.; Mixed Integer Programming models for job shop scheduling: A computational analysis; **Computers & Operations Research**; v. 73; p 162-173; 2016.
- LACHMAN, J.; BRAUDE, H.; MONZÓN, J.; LÓPEZ, S., GÓMEZ-ROCA, S. ¿Cómo puede Argentina transformarse en líder del nuevo paradigma tecnoproductivo?. *Cuyonomics*. **Investigaciones en Economía Regional**; v. 6; n. 10; 2022.
- LEITE, L. F. C.; SILVA, V. P.; MADARI, B. E.; MACHADO, P.; BARCELLOS, A. D. O.; BALBINO, L. C. O potencial de seqüestro de carbono em sistemas de produção integrados: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). Encontro Nacional de Plantio direto na Palha. **Anais...** Vol. 12, p. 69-76; 2010.
- LIMA, A. A.; ESCALANTE, A. V.; CESCO NETTO, A. O.; DACAL E. M. R. S.; VALLE, E. R.; COSTA F. P.; FIGLIOLINI H. J.; SANTOS, H. J.; BANDINI, O. **Boas Práticas Agropecuária – Bovinos de Corte**, Embrapa, Campo Grande, 1ª edição, 2006.
- LOPES, M. A.; CONTINI, E. Agricultura, sustentabilidade e tecnologia. **Agroanalysis**, v. 32(02); p. 27-34; 2012.
- LORENZI, H.; **Manual de identificação e de controle de plantas daninhas: plantio direto e convencional**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 339p, 2000.
- MACAMBIRA, A. F. U. S.; MACULAN, N.; CABRAL, L. A. F.; PINTO, L. L.; **Programação Linear**. Editora da UFPB; p. 169p; 2016.
- MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. **Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens**. Campo Grande: EMBRAPA-CNPQC; p. 4 (Comunicado Técnico, 62); 2000.
- MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. Simpósio sobre Ecossistema de Pastagens, 2, 1993, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP, UNESP, p.216-245, 1993.
- MANZATTO, C. V.; SKORUPA, L. A.; ARAÚJO, L. S.; VICENTE, L. E.; ASSAD, E. D.; **Estimativas de redução de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas ILPF no Brasil. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos**; Brasília, DF: Embrapa; p. 400-424; 2019.
- MARQUES, F. C.; CONTERATO, M. A.; SCHNEIDER, S. **Construção de mercados e agricultura familiar: desafios para o desenvolvimento rural**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 93-140p, 2016.
- MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. **Agro 4.0-rumo à agricultura digital. JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil**, v. 2, p. 28-35, 2017.
- NASCIMENTO, V. T.; DELGADO, A. R. S.; VENTURA, S. D. Optimization of production and animal transit in an integrated crop-livestock system with no-tillage. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza**, v. 3(1), 2019b.

NASCIMENTO, V. T.; DELGADO, A. R. S.; VENTURA, S. D.; A modelagem como ferramenta de sustentabilidade na integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); **Brazilian Journal of Development**, v. 6(3); p.43-54; 2020.

NASCIMENTO, V. T. **Programação inteira mista para a simulação de um sistema integrado lavoura-pecuária com plantio direto (SILPE-PD)**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2019a.

NETO, A. B.; CRISCIMANI, A. L.; BONINI, C. D. S. B.; SOUZA, J. F. D.; OLIVERIO, G. L.; BARETTO, V. C. M.; ANDRIGHETTO, C. Interface gráfica via redes neurais artificiais: um estudo de caso na estimativa da produção de capim marandu em sistemas integrados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15(2); 318-341; 2021.

NEVES, D. P. **Agricultura familiar**: quantos ancoradouros. Geografia Agrária: teoria e poder; v. 1; p. 211-270; 2007.

OLIVEIRA, D. G. D. **O planejamento das rotações de culturas agrícolas e trânsito animal utilizando programação inteira binária**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 2017.

OLIVEIRA, D. G.; DELGADO, A. R. S.; VENTURA, S. D.; DIB CRUZ; M.; RODRIGUES; P. C. P. Binary programming for the simulation of crop rotation and animal transit in an integrated crop-livestock system. **Revista Ciência Agronômica**. v. 50, n. 2, p. 123-130; 2019.

OLIVEIRA, M. S.; FERNANDES, R. S.; MELO, M. R.; SOUZA, D. L.; SILVA, D. C.; SOUZA JR, G. N.; BRAGA, M. B. Projeções da produção de rebanhos e área de cobertura de pastagem usando modelagem ARIMA com abordagem hierárquica para o estado do Pará e suas regiões. XIV Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais. **Anais...** p. 91-100; SBC; 2023

PEREIRA, S. E. M.; SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V.; PENTEADO, M. D. O.; OLIVEIRA, P. D.; NOVAES, R. M. L.; SIMÕES, M. G.; **Áreas prioritárias para ações de transferência de tecnologia em sistemas ILPF no Brasil**. In Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos; p. 380-399; Embrapa; 2019.

PIRES, J. A. A.; ROSA, W. J.; EBOLI, I. P.; ALBERNAZ, W. M.; PINTO JÚNIOR, E. S.; MENDES, M. A. Programa Estadual de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. **Informe Agropecuário**, v. 31, n., 257, p. 122-127, 2010.

PLEVICH, J. O.; GYENGE, J.; DELGADO, A. R. S.; TARICO, J. C.; FIANDINO, S.; UTELLO, M. J. Production of Fodder in a Treeless System and in Silvopastoral System in Central Argentina. **Revista Floresta e Ambiente**; v. 26, n. 1, 2019.

RODRIGUES, M. A pegada diplomática do PAM agro e do plano ABC+. **AgroANALYSIS**; v. 42(3); p .7-9; 2022.

SAIBRO, J. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; SILVA, J. L. S.; VARELLA, A. C.; LUCAS, N. M.; SAVIAN, J. F. Gestão de sistemas silvipastoris no Rio Grande do Sul: Desempenho animal. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, n. 3, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, p.450-460, 2004.

SANTOS, P. C.; AVELAR, J. N. AGRO 4.0: sensores e atuadores para dispositivos IoT. 15º Jornada Científica e Tecnológica e 12 ° Simpósio de Pós-Graduação do IFSULDEINAS, **Anais...** v. 14, n. 1, 2022.

SOUZA, R., MIRANDA, I., SOUZA, J. Potencialidades da Modelagem Matemática para o ensino de Matemática na Educação do Campo. **Revista de Educação Matemática (REMat)**, v. 16(21), p. 173-189; 2019.

TOMAZ, G. A.; WANDER, A. E. Barreiras à adoção do sistema ILPF em Goiás. **Revista de Política Agrícola**, v. 26(1); p. 93-100; 2017.

TONINI, H.; MORALES, M. M.; MENEGUCI, J. L. P.; ANTONIO, D. B. A.; WRUCK, F. J.; Biomassa e área foliar de clones de eucalipto em ILPF: Implicações para a desrama. **Nativa**; v. 4(5); p. 271-27; 2016.

WANDER, A. E.; TOMAZ, G. A.; PINTO, H. E. Uma avaliação formativa do Plano ABC. **Revista de Política Agrícola**, v. 25(3), 62-72, 2016.

ZIMMER, A. H.; PIMENTEL, D. M.; VALLE, C. B. **Aspectos práticos ligados à formação de pastagens**. Campo Grande: Embrapa/CNPGC, 42p, 1986.

9. APÊNDICES

9.1 Apêndice A - Pseudocódigo SILPE-PD

função gera(m, n, pmax, amax, vmax, p, d, zmax)

```
%% m: número de culturas
%% n: número de animais
%% pmax: valor máximo de N(j,h)
%% amax: valor máximo de AT(h)
%% vmax: valor máximo de VT(h)
%% p: tipo de alimento em uma composição bromatológica
%% d: nutriente requerido por unidade na composição de um determinado alimento.
%% zmax: valor máximo do limitante inferior de z(r)
```

```
salvar( 'data/par', 'm', 'n', 'p', 'd' );
```

```
RLM= aleatório(m,12);
salvar( 'data/RLM', 'RLM' );
```

```
g= aleatório(n,3,12);
salvar( 'data/g', 'g' );
```

```
theta= aleatório(n,3,12);
salvar( 'data/theta', 'theta' );
```

```
N= arredondar( pmax * aleatório(3,12) );
para j=1:3
  para h=1:12
    se N(j,h)==0
      N(j,h)= pmax;
    fim se
  fim para
fim para
salvar( 'data/N', 'N' );
```

```
S1= arredondar(aleatório(1,n) );
salvar( 'data/S1', 'S1' );
```

```
S2= arredondar(aleatório(1,n) );
salvar( 'data/S2', 'S2' );
```

```
para i=1:n
  se S1(i)==0
    S1bar(i)=0;
  senão
    S1bar(i)= arredondar(aleatório);
  fim se
  se S2(i)==0
    S2bar(i)=0;
  senão
    S2bar(i)= arredondar(aleatório);
  fim se
fim para
```

```

salvar( 'data/S1bar', 'S1bar' );
salvar( 'data/S2bar', 'S2bar' );

AT= amax * aleatório(1,12);
salvar( 'data/AT', 'AT' );

VT= vmax * aleatório(1,12);
salvar( 'data/VT', 'VT' );

v= vmax * aleatório(m,12);
salvar( 'data/v', 'v' );

rho= aleatório(1,p);
salvar( 'data/rho', 'rho' );

delta= zeros(p,d);
para r= 1:p
    delta(r,1)= aleatório;
    para s= 2:d-1
        delta(r,s)= aleatório * ( 1 - Somatório( delta(r,1:s-1) ) );
    fim para
    delta(r,d)= 1 - Somatório( delta(r,1:d-1) );
fim para
salvar( 'data/delta', 'delta' );

sigmavet= aleatório(1,d);
salvar ( 'data/sigmavet', 'sigmavet' );

fim função

```

função rotacao(zmin)

```

carregar( 'data/par' );

carregar( 'data/RLM' );
carregar( 'data/g' );
carregar( 'data/theta' );

carregar( 'data/N' );
carregar( 'data/S1' );
carregar( 'data/S1bar' );
carregar( 'data/S2' );
carregar( 'data/S2bar' );
carregar( 'data/AT' );
carregar( 'data/VT' );
carregar( 'data/v' );

carregar( 'data/rho' );
carregar( 'data/delta' );
carregar( 'data/sigmavet' );

lenS1 = Número de Elementos ( S1 );
lenS2 = Número de Elementos ( S2 );
lenS1bar = Número de Elementos ( S1bar );

```

lenS2bar = Número de Elementos (S2bar);

```
%% *****  
%% Função Objetivo:  
%% *****
```

```
totalx = 12*m;  
totaly = 3*n;  
totalh = 12;
```

```
totalvar = totalx + totaly + 12;  
vartype = "";  
para i = 1:totalvar  
    vartype = [Uma variável contínua];  
fim para
```

```
para l = 1:m  
    para h = 1:12  
        pos = (l-1)*totalh + h;  
        c(pos) = RLM(l,h);  
        Tipo de dado(pos) = "C";  
    fim para  
fim para
```

```
para i = 1:n  
    para j = 1:3  
        para h = 1:12  
            pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + j;  
            c(pos) = g(i,j,h) - theta(i,j,h);  
            Tipo de dado(pos) = "I";  
        fim para  
    fim para  
fim para
```

```
para r = 1:p  
    pos = totalx + totaly*11 + 3*(n-1) + 3 + r;  
    c(pos) = -rho(r);  
    Tipo de dado(pos) = "C";  
fim para
```

```
%% *****  
%% RESTRICOES  
%% *****
```

```
linha = 1;  
ctype = "";
```

```
%% RESTRIÇÃO 1 -----
```

```
para j = 1:3  
    para h = 1:12  
  
        para i = 1:n  
            pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + j;  
            A(linha,pos) = 1;
```

```

fim para

b(linha) = N(j,h);
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha = linha + 1;

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 2 -----
para h = 1:11
para i = 1:lenS1

se S1(i)==1

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 1;
A(linha,pos) = 1;

pos = totalx + totaly* h + 3*(i-1) + 1;
A(linha,pos) = -1;

b(linha) = 0;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha = linha + 1;

fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 3 -----
para h = 1:12
para i = 1:lenS2bar

se S2bar(i)==1

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 2;
A(linha,pos) = 1;

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 3;
A(linha,pos) = -1;

b(linha) = 0;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha = linha + 1;

fim se

fim para
fim para

```

```
%% RESTRIÇÃO 4 -----
```

```
para h = 1:12
  para i = 1:lenS1bar

    se S1bar(i)==1

      pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 1;
      A(linha,pos) = 1;

      pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 3;
      A(linha,pos) = -1;

      b(linha) = 0;
      ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

      linha = linha + 1;

    fim se

  fim para
fim para
```

```
%% RESTRIÇÃO 5 -----
```

```
para h = 1:12

  para l = 1:m
    pos = (l-1)*totalh + h;
    A(linha,pos) = 1;
  fim para

  b(linha) = AT(h);
  ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

  linha = linha + 1;

fim para
```

```
%% RESTRIÇÃO 6 -----
```

```
para h = 1:12

  para l = 1:m
    pos = (l-1)*totalh + h;
    A(linha,pos) = v(l,h);
  fim para

  b(linha) = VT(h);
  ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

  linha = linha + 1;

fim para
```

%% RESTRIÇÃO 7 -----

para s = 1:d

para r = 1:p

pos = totalx + totaly*12 + r;

A(linha,pos) = delta(r,s);

fim para

b(linha) = sigmavet(s);

ctype = [restrição de desigualdade com um limite inferior];

linha = linha + 1;

fim para

linhaeq= 1;

%% RESTRIÇÃO 8 -----

para i = 1:n

para h = 1:12

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 1;

A(linha,pos) = 1;

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 2;

A(linha,pos) = 1;

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 3;

A(linha,pos) = 1;

b(linha) = 1;

ctype = [Uma restrição de igualdade];

linha = linha + 1;

fim para

fim para

%% RESTRIÇÃO 9 -----

para i = 1:n

para h = 1:11

pos = totalx + totaly* h + 3*(i-1) + 2;

A(linha,pos) = 1;

pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + 1;

A(linha,pos) = 1;

b(linha) = 1;

ctype = [Restrição de desigualdade com um limite superior];

```

        linha = linha + 1;

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 10 -----

para r = 1:p
    pos = totalx + totaly*12 + r;
    A(linha,pos) = 1;
fim para
b(linha) = zmin;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite inferior];

%% Define limites superiores e inferiores -----

%% x(1,h) >= 0
para l = 1:m
    para h = 1:12
        pos = (l-1)*totalh + h;
        lb(pos) = 0;
        ub(pos) = Inf;
    fim para
fim para

%% y(i,j,h) in {0,1}
para i = 1:n
    para j = 1:3
        para h = 1:12
            pos = totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + j;
            lb(pos) = 0;
            ub(pos) = 1;
        fim para
    fim para
fim para

%% z(r) >= 0
para r = 1:p
    pos = totalx + totaly*12 + r;
    lb(pos) = 0;
    ub(pos) = Inf;
fim para

%% *****
%% SOLVER
%% *****

[xmin, fmin, status, extra] = ...
glpk (c, A, b, lb, ub, ctype, vartype, -1);

%% *****
%% EXIBIR SAÍDA NO ARQUIVO 'data/saida.sol'
%% *****

```

```

se status == 0

fout= ['data/saida.sol'];
fid= Abrir Arquivo( fout, 'wt' );

Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', 'x= ' );
para l= 1:m
    Out= "";
    para h= 1:12
        pos= (l-1)*totalh + h;
        x(l,h)= xmin(pos);
        Out= [Saída ' ' num2str( xmin(pos) )];
    Fim para
    Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', Out );
fim para

para i= 1:n
    Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', ['y(' num2str(i) 'j,h)= ' ] );
    para j= 1:3
        Out= "";
        para h= 1:12
            pos= totalx + totaly*(h-1) + 3*(i-1) + j;
            ytmp(i,j,h)= xmin(pos);
            Out= [Out ' ' num2str( xmin(pos) )];
        fim para
        Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', Out );
    fim para
fim para

Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', 'z= ' );
Out= "";
para r= 1:p
    pos= totalx + totaly*12 + r;
    z(r)= xmin(pos);
    Out= [Saída ' ' num2str( xmin(pos) )];
fim para
Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', Out );

Fechar Arquivo( fid );

senão

    disp( 'Nenhuma Solução Encontrada' );

end se

end função

```

9.2 Apêndice B - Pseudocódigo SSP-LA

função gera (n)

%% n: número de animais

salvar('data/Nanimais', 'n');

Njk = arredondar (n * aleatório (5,12)) + 1;
salvar('data/Njk', 'Njk');

g = aleatório(n,5,12);
salvar('data/g', 'g');

c = aleatório(n,5,12);
salvar('data/c', 'c');

%% VETORES S *****

S1 = arredondar(aleatório(1,n));
S2 = arredondar(aleatório (1,n));
S3 = arredondar(aleatório (1,n));
S4 = arredondar(aleatório (1,n));
S5 = arredondar(aleatório (1,n));

pos = gerapos(n);
S1(pos) = 1;
pos = gerapos(n);
S2(pos) = 1;
pos = gerapos(n);
S3(pos) = 1;
pos = gerapos(n);
S4(pos) = 1;
pos = gerapos(n);
S5(pos) = 1;

Salvar('data/vetoresS', 'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5');

fid = Abrir Arquivo("S.dat", "wt");
para i = 1:n
 Imprimir no Arquivo(fid, "%d ", S1(i));
fim para
Imprimir no Arquivo(fid, "\n");
para i = 1:n
 Imprimir no Arquivo (fid, "%d ", S2(i));
fim para
Imprimir no Arquivo(fid, "\n");
para i = 1:n
 Imprimir no Arquivo(fid, "%d ", S3(i));
fim para
Imprimir no Arquivo(fid, "\n");
para i = 1:n
 Imprimir no Arquivo(fid, "%d ", S4(i));
fim para
Imprimir no Arquivo(fid, "\n");

```

para i = 1:n
  Imprimir no Arquivo( fid, "%d ", S5(i) );
fim para
Fechar Arquivo(fid);

%% VETORES SBAR ****

para i=1:n

  %% Definindo S1bar
  se S1(i)==0
    S1bar(i)=0;
  senão
    S1bar(i)= arredondar(aleatório);
  fim se

  %% Definindo S2bar
  Se S2(i)==0
    S2bar(i)=0;
  senão
    S2bar(i)= arredondar( aleatório);
  fim se

  %% Definindo S4bar
  se S4(i)==0
    S4bar(i)=0;
  senão
    S4bar(i)= arredondar( aleatório);
  fim se

  %% definindo S5bar
  se S5(i)==0
    S5bar(i)=0;
  senão
    S5bar(i)= arredondando (aleatório );
  fim se

fim para

pos = gerapos(n);
S1bar(pos)=1;
pos = gerapos(n);
S2bar(pos)=1;
pos = gerapos(n);
S4bar(pos)=1;
pos = gerapos(n);
S5bar(pos)=1;

salvar( 'data/vetoresSbar', 'S1bar', 'S2bar', 'S4bar', 'S5bar' );

fid = Abrir Arquivo( "Sbar.dat", "wt" );
para i = 1:n
  Imprimir no Arquivo( fid, "%d ", S1bar(i) );
fim para
Imprimir no Arquivo ( fid, "\n" );

```

```

para i = 1:n
    Imprimir no Arquivo ( fid, "%d ", S2bar(i) );
fim para
Imprimir no Arquivo ( fid, "\n" );
para i = 1:n
    Imprimir no Arquivo ( fid, "%d ", S4bar(i) );
fim para
Imprimir no Arquivo ( fid, "\n" );
para i = 1:n
    Imprimir no Arquivo ( fid, "%d ", S5bar(i) );
fim para
Fechar Arquivo(fid);

fid1 = Abrir Arquivo( "g.dat", "wt" );
fid2 = Abrir Arquivo( "c.dat", "wt" );
para i= 1:n
    para j= 1:5
        para k= 1:12
            %% vetor x
            Imprimir no Arquivo( fid2, "%20.10f\n", c(i,j,k) );

            %% vetor y
            Imprimir no Arquivo ( fid1, "%20.10f\n", g(i,j,k) );
        fim para
    fim para
fim para
Fechar Arquivo(fid1);
Fechar Arquivo(fid2);

fid = Abrir Arquivo( "N.dat", "wt" );
para j= 1:5
    para k= 1:12
        Imprimir no Arquivo ( fid, "%d\n", Njk(j,k) );
    fim para
fim para
Fechar Arquivo(fid);

```

Fim da Função

```
%% *****
```

```
%% Gera posição para 1
```

função pos = gerapos(n)

```

para i=1:n
    pos = n*arredondar(aleatório);
    se pos==0
        pos = n;
    fim se
fim para

```

fim função

função errnum= rotacao9

```

carregar( 'data/Nanimais' );
imprimir( ["rotacao9: rodando para " num2str(n) " animais"] );

carregar( 'data/Njk' );

carregar( 'data/g' );
carregar( 'data/c' );

carregar( 'data/vetoresS' );
carregar( 'data/vetoresSbar' );

%% *****
%% função objetivo:
%% *****

vartype = '';

totalx= 5*n;

para i= 1:n
    para j= 1:5
        para k= 1:12
            pos=totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
            f(pos)= -c(i,j,k);
            vartype = [Uma variável inteira];

            pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
            f(pos)= g(i,j,k);
            vartype = [Uma variável inteira];
        fim para
    fim para
fim para

%% *****
%% RESTRICOES
%% *****

linha = 1;
ctype = '';

%% RESTRIÇÃO 1 -----

para j= 1:5
    para k= 1:12

        para i= 1:n
            pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
            A(linha,pos)= 1;
        fim para

        b(linha)= Njk(j,k);
        ctype = [Restrição de desigualdade com um limite superior];

        linha= linha + 1;

```

```

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 2 -----

para i= 1:n
    para k= 1:12

        para j= 1:5
            pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
            A(linha,pos)= 1;
        fim para

        b(linha)= 1;
        ctype = [restrição de igualdade];

        linha= linha + 1;

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 3 -----

para k= 1:11
    para i= 1:n

        se S1(i)==1

            pos= totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 1;
            A(linha,pos)= 1;

            pos= totalx*12 + totalx*k + 5*(i-1) + 3;
            A(linha,pos)= -1;

            b(linha)= 0;
            ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

            linha= linha + 1;

        fim se

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 4 -----

para k= 1:11
    para i= 1:n

        se S2(i)==1

            pos=totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 2;
            A(linha,pos)= 1;

```

```

    pos= totalx*12 + totalx*k+ 5*(i-1) + 3;
    A(linha,pos)= -1;

    b(linha)= 0;
    ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

    linha= linha + 1;

fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 5 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

se S3(i)==1

    pos=totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 3;
    A(linha,pos)= 1;

    pos= totalx*12 + totalx*k    + 5*(i-1) + 1;
    A(linha,pos)= -1;

    b(linha)= 0;
    ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

    linha= linha + 1;

fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 6 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

se S3(i)==1

    pos= totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 3;
    A(linha,pos)= 1;

    pos= totalx*12 + totalx*k    + 5*(i-1) + 2;
    A(linha,pos)= -1;

    b(linha)= 0;
    ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

    linha= linha + 1;

fim se

```

```

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 7 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

    se S1bar(i)==1

        pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 1;
        A(linha,pos)= 1;

        pos= totalx*12 + totalx* k + 5*(i-1) + 4;
        A(linha,pos)= -1;

        b(linha)= 0;
        ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

        linha= linha + 1;

    fim se

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 8 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

    se S2bar(i)==1

        pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 2;
        A(linha,pos)= 1;

        pos= totalx*12 + totalx* k + 5*(i-1) + 5;
        A(linha,pos)= -1;

        b(linha)= 0;
        ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

        linha= linha + 1;

    fim se

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 9 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

```

```

se S1(i)==1

    pos=totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 1;
    A(linha,pos)= 1;

    pos= totalx*12 + totalx*k    + 5*(i-1) + 2;
    A(linha,pos)= -1;

    b(linha)= 0;
    ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

    linha= linha + 1;

fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 10 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

    se S2(i)==1

        pos= totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 2;
        A(linha,pos)= 1;

        pos= totalx*12 + totalx*k    + 5*(i-1) + 1;
        A(linha,pos)= -1;

        b(linha)= 0;
        ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

        linha= linha + 1;

    fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 11 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

    se S4(i)==1

        pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 4;
        A(linha,pos)= 1;

        pos= totalx*12 + totalx* k    + 5*(i-1) + 4;
        A(linha,pos)= -1;

        b(linha)= 0;

```

```

        ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

        linha= linha + 1;

    fim se

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 12 -----

para k= 1:11
    para i= 1:n

        se S5(i)==1

            pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
            A(linha,pos)= 1;

            pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 5;
            A(linha,pos)= -1;

            b(linha)= 0;
            ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

            linha= linha + 1;

        fim se

    fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 13a -----

para k= 1:11
    para i= 1:n

        se S4bar(i)==1

            pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 4;
            A(linha,pos)= 1;

            pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 4;
            A(linha,pos)= -1;

            b(linha)= 0;
            ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

            linha= linha + 1;

        fim se

    fim para
fim para

```

%% RESTRIÇÃO 13b -----

para k= 1:10

para i= 1:n

se S4bar(i)==1

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx*(k+1) + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= -1;

b(linha)= 0;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 14a -----

para k= 1:11

para i= 1:n

se S5bar(i)==1

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= -1;

b(linha)= 0;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim se

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 14b -----

para k= 1:10

para i= 1:n

se S5bar(i)==1

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

```

    pos= totalx*12 + totalx*(k+1) + 5*(i-1) + 5;
    A(linha,pos)= -1;

    b(linha)= 0;
    ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

    linha= linha + 1;

    fim se

    fim para
    fim para

%% RESTRIÇÃO 15 -----

para i = 1:n
    para k = 1:12

        para j = 1:5
            pos =          totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
            A(linha,pos) = 1;
        fim para

        b(linha) = 1;
        ctype = [ctype "L"];

        linha= linha + 1;

    fim para
    fim para

%% RESTRIÇÃO 16 -----

para k= 1:11
    para i= 1:n

        pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 4;
        A(linha,pos)= 1;

        pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 3;
        A(linha,pos)= 1;

        b(linha)= 1;
        ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

        linha= linha + 1;

    fim para
    fim para

%% RESTRIÇÃO 17 -----

para k= 1:11
    para i= 1:n

```

```

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 3;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 18 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 2;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 19 -----

para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 2;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para

%% RESTRIÇÃO 20 -----

```

```

para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para

```

%% RESTRIÇÃO 21 -----

```

para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 4;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para

```

%% RESTRIÇÃO 22 -----

```

para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 1;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k  + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para

```

%% RESTRIÇÃO 23 -----

```
para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k + 5*(i-1) + 1;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para
```

%% RESTRIÇÃO 24 -----

```
para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 3;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para
```

%% RESTRIÇÃO 25 -----

```
para k= 1:11
para i= 1:n

pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + 5;
A(linha,pos)= 1;

pos= totalx*12 + totalx* k + 5*(i-1) + 3;
A(linha,pos)= 1;

b(linha)= 1;
ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

linha= linha + 1;

fim para
fim para
```

%% RESTRIÇÃO 26 -----

```

para j= 1:5
  para k= 1:12
    para i= 1:n

      pos=          totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
      A(linha,pos)= -1;

      pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
      A(linha,pos)= 1;

      b(linha)= 0;
      ctype = [restrição de desigualdade com um limite superior];

      linha= linha + 1;

    fim para
  fim para
fim para

%% Define quais variáveis são inteiras -----

intcon = 1:24*totalx;

%% Define limites superiores e inferiores -----

%% 0<= x(i,j,k) <= 1
%% 0<= y(i,j,k) <= 1

lb = zeros(1,24*totalx);
ub = ones(1,24*totalx);

%% *****
%% SOLVER
%% *****

tamanho(A)

sense = -1;
[Sol, fmin, errnum, extra] = glpk(f, A, b, lb, ub, ctype, vartype, sense );

%% *****
%% EXIBIR SAÍDA NO ARQUIVO 'data/saida.sol'
%% *****
se errnum==0

fout= ['data/saida.sol'];
fid= Abrir Arquivo( fout, 'wt' );

para i= 1:n
  Imprimir no Arquivo(fid, '%s \n', ['x(' num2str(i) ',:,:)=' ] );
  para j= 1:5
    Out= "";
    para k= 1:12
      %% vetor x
      pos=totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
      xtmp(i,j,k)= Sol(pos);
      Out= [Saída' ' num2str( Sol(pos) )];
    fim para
  fim para
fim para

```

```

        fim para
        Imprimir no Arquivo( fid, '%s \n', Out );
    fim para
    fim para
    A = [];
    para i= 1:n
        Imprimir no Arquivo ( fid, '%s \n', ['y(' num2str(i) ',:,:)='] );
        para j= 1:5
            Out= "";
            para k= 1:12
                %% vetor y
                pos= totalx*12 + totalx*(k-1) + 5*(i-1) + j;
                ytmp(i,j,k)= Sol(pos);
                A = [ A; i, j, k, Sol(pos) ];
                Out= [Saída' ' num2str( Sol(pos) )];
            fim para
            Imprimir no Arquivo ( fid, '%s \n', Out );
        fim para
    fim para

    para i= 1:n
        x= zeros(5,12);
        para j= 1:5
            para k= 1:12
                x(j,k)= xtmp(i,j,k);
            fim para
        fim para
        %%x
    fim para

    para i= 1:n
        y= zeros(5,12);
        para j= 1:5
            para k= 1:12
                y(j,k)= ytmp(i,j,k);
            fim para
        fim para
        %%y
    fim para

    Fechar Arquivo( fid );

senão

    imprimir( 'Rotação: Nenhuma Solução Encontrada');

fim se
fmin
errnum
fim função

```