UFRR

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS

GILSON DE SOUZA COSTA

MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO À INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - ILPF

BOA VISTA, RR
2024

GILSON DE SOUZA COSTA

MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO À INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - ILPF

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais - PRONAT da Universidade Federal de Roraima, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais (Recursos Naturais). Área de Concentração: Manejo e Dinâmica de Recursos Naturais.

Orientadora: Dra. Geórgia Patrícia da Silva Ferko
Coorientador: Dr. Jalison Lopes
Coorientador: Dr. Sandro Dimy Barbosa Bitar

BOA VISTA, RR
2024

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

C837m Costa, Gilson de Souza.
Modelo matemático de otimização multiobjetivo aplicado à integração lavoura-pecuária-floresta - ILPF / Gilson de Souza Costa. – Boa Vista, 2024.
10 f. : il. Anexos 3 artigos.

Orientadora: Dra. Geórgia Patrícia da Silva Ferko.
Coorientador: Dr. Jalison Lopes.
Coorientador: Dr. Sandro Dimy Barbosa Bitar.

Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Roraima. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais (PRONAT).

1. Modelagem matemática. 2. Gestão rural. 3. Sistema ILPF. 4. Agricultura sustentável. 5. Ferramentas matemáticas. I. Título. II. Ferko, Geórgia Patrícia da Silva (orientadora). III. Lopes, Jalison (coorientador). IV. Bitar, Sandro Dimy Barbosa (coorientador).

CDU (2. ed.) 510.67

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária/Documentalista (UFRR):
Maria de Fátima Andrade Costa - CRB-11/453-AM

GILSON DE SOUZA COSTA

MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO À INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA - ILPF

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais - PRONAT da Universidade Federal de Roraima, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais (Recursos Naturais). Área de Concentração: Manejo e Dinâmica de Recursos Naturais. Defendida em 25 de julho de 2024 e avaliada pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
GEORGIA PATRICIA DA SILVA FERKO
Data: 02/10/2024 08:20:48-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Geórgia Patrícia da Silva Ferko
Presidente/UFRR

Documento assinado digitalmente
gov.br
SOLANGE MUSSATO
Data: 18/09/2024 09:40:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Solange Mussato
Membro/PPGEC/UERR e SEED/RR

Documento assinado digitalmente
gov.br
HARON ABRAHIM MAGALHAES XAUD
Data: 01/10/2024 10:16:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Haron Abrahim Magalhães Xaud
Membro/EMBRAPA-RR

Documento assinado digitalmente
gov.br
PEDRO AURELIO COSTA LIMA PEQUENO
Data: 20/09/2024 21:40:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Pedro Aurélio Costa Lima Pequeno
Membro/UFRR

Documento assinado digitalmente
gov.br
REINALDO IMBROISI BARBOSA
Data: 23/09/2024 09:30:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Reinaldo Imbrozio Barbosa
Membro/INPA-RR

Documento assinado digitalmente
gov.br
WILFREDO RENATO LAVADO ENCO
Data: 18/09/2024 18:16:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Wilfredo Renato Lavado Enco
Membro/UFRR

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Roraima (UFRR), por meio do Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais (PRONAT), pela oferta do curso de doutoramento ao qual me deu oportunidade de realizar esse doutorado sem a necessidade de sair de Boa Vista.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a minha orientadora, Profa. Geórgia Patrícia da Silva Ferko por, além da orientação, seu apoio e paciência ao longo deste processo de doutorado. Além de suas contribuições acadêmicas, sou grato por seu apoio pessoal e compreensão durante os momentos difíceis, o que tornou esta jornada possível. Obrigado por acreditar em mim e no meu trabalho.

Aos coorientadores:

• Jalison Lopes, pelo tempo e esforço que dedicou para revisar e discutir minhas pesquisas, sempre dando sugestões construtivas e sugerindo leituras;

• Sandro Dimy Barbosa Bitar, pela disponibilidade sempre. Pelo fato de o professor Sandro ser da UFAM, inicialmente isso me preocupava, mas esse receio logo passou ao perceber sua boa vontade. Algumas vezes, após as 22h, ainda discutíamos sobre o modelo, e ele sempre foi muito solícito, com respostas seguras, claras e rápidas, o que é difícil em se tratando de matemática.

Aos meus filhos Cássio e Luiza, por entenderem minhas ausências como pai. Sempre que eu explicava que não podia estar com eles porque precisava estudar, sentia uma grande compreensão da parte deles.

Ao colega Edwin por me ajudar com os templates do Latex, foi muito importante na escrita da tese.

Aos professores do PRONAT: Carlos Sander, Carolina Castilho, Elizete Holanda, José Frutuoso, Lena Souza, Pedro Pequeno, Meire Joisy, Stélio Soares, Gardênia, Marcos Vital, Haron Xaud, Fábio Wankler, Rodrigo e Reinaldo Imbrozio, pelos ensinamentos e apoio.

Agradeço aos professores Reinaldo Imbrozio, Solange Mussato, Pedro Pequeno, Wilfredo Renato e Haron Xaud por aceitarem compor a banca de defesa da tese.

Aos colegas de estudos, em especial: Martha, Rita, Rúbens, Ana Paula, Mariana, Liliana, Marquinhos, Emanuel, Jordan e Tadeu.

RESUMO

Essa pesquisa permite uma visão integrada na tomada de decisões, considerando diversos fatores como aumento da produção agrícola, proporcionalidade entre emissão e sequestro de gases de efeito estufa, a utilização de grãos na suplementação e a melhor distribuição de funcionários. O objetivo deste trabalho é a apresentação de um modelo matemático de otimização multiobjetivo, onde as funções objetivos são lineares, aplicada à sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). Busca-se o desenvolvimento de modelo de planejamento das atividades agrícolas e pecuárias, e a mensuração dos eventuais ganhos pela integração entre as diferentes culturas, que mensure os aspectos econômicos, ambientais e sociais. Consciente da necessidade fundamental de obter dados para nutrir o modelo, explorou-se alternativas do trabalho desenvolvido pelo servidor Amaury Bendahan da Embrapa Roraima. A proposta demonstrou a capacidade da otimização multiobjetivo em avaliar e orientar as decisões dos produtores rurais em busca de sustentabilidade e eficiência nos sistemas ILPF. Para alcançar a meta de forma prática, adotou-se uma abordagem de pesquisa aplicada, considerando um estudo de caso realizado na Fazenda São Paulo, Iracema-Roraima. Esse trabalho destaca a subutilização da otimização no sistema estudado e apresenta um modelo que delineia a melhor distribuição da área da referida fazenda, além de demonstrar como resolvê-lo usando o Solver do Excel. O modelo proposto serve para auxiliar os produtores rurais na tomada de decisão no contexto do sistema ILPF, o qual mensura os aspectos econômicos, ambientais e sociais. Com isso, a otimização multiobjetivo surge como uma resposta para lidar com esses desafios, permitindo buscar soluções que equilibrem as metas conflitantes e que estão associadas à lavoura, pecuária e floresta. Embora não determine conclusivamente as práticas ideais do sistema, este estudo representa um avanço significativo para produtores rurais que o utilizam, pela capacidade de considerar problemas com diversos conflitos de utilização de recursos.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Gestão rural. Sistema ILPF. Agricultura Sustentável. Ferramentas Matemáticas.

ABSTRACT

This research allows an integrated view in decision-making, considering several factors such as the increase in agricultural production, the proportionality between the emission and sequestration of greenhouse gases, the use of grains in supplementation and the better distribution of employees. The objective of this work is to present a mathematical multi-objective optimization model, where the functions are linear, applied to Crop-Livestock-Forest Integration (ICLF) systems. The aim is to develop a planning model for agricultural and livestock activities, and to measure potential gains through integration between different cultures, which measure economic, environmental and social aspects. Aware of the fundamental need to obtain data to feed the model, alternative work developed by server Amaury Bendahan from Embrapa Roraima was explored. The proposal presented the ability of multi-objective optimization to evaluate and guide rural producers' decisions in search of sustainability and efficiency in (ICLF) systems. To achieve the goal in a practical way, an applied research approach is updated, considering a case study carried out at Farm São Paulo, Iracema-Roraima. This work highlights the underutilization of optimization in the trained system and presents a model that outlines the best distribution of the area of that farm, in addition to demonstrating how to solve it using Excel Solver. The proposed model serves to assist rural producers in decision-making in the context of the (ICLF) system, which measures economic, environmental and social aspects. As a result, multi-objective optimization emerges as an answer to dealing with these challenges, allowing us to seek solutions that balance the conflicting goals associated with work, livestock and the forest. Although it does not conclusively determine the system's ideal practices, this study represents a significant advance for rural producers who use it, due to its ability to consider problems with different resource use conflicts.

Keywords: Mathematical modeling. Rural Management. ILPF System. Sustainable Agriculture. Mathematical Tools.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7

2 ARTIGO 01 - UMA REVISÃO SOBRE O USO DE FERRAMENTAS PARA AVALIAR O FATOR ECONÔMICO ASSOCIADO AO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO QUE ENVOLVE LAVOURA, PECUÁRIA E FLORESTA 11

3 ARTIGO 02 - OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO: UM MODELO MATEMÁTICO PARA AUXÍLIO A GESTÃO DO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA 15

4 ARTIGO 03 - OTIMIZANDO GANHOS NO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA: APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO 34

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 49

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Cunha (2020), a agricultura é um setor cada vez mais envolvido com inovações, especialmente nas atividades agrícolas, com foco no aumento da produção e na obtenção de ganhos financeiros. Dessa forma, a adoção de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF se torna uma estratégia relevante pois apresenta maneiras de melhorar a resiliência econômica e ambiental nas propriedades agrícolas.

De acordo com Balbino et al., (2012) e Gil et al., (2015), os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF ou agrossilvipastoril são considerados como estratégia de produção sustentável que integra os componentes agrícolas, pecuárias e florestais, em cultivos consorciados, em sucessão ou rotacionado, e que busca efeitos sinérgicos entre seus componentes.

É grande a importância desse sistema, podendo destacar que, para Balbino et al., (2012), tem-se a conservação e melhoria do solo e da água, quebra no ciclo de pragas e doenças, diminuição da erosão, aumento da renda do produtor e qualidade de vida, melhora das condições microclimáticas do local e contribui para bem-estar animal por meio da possibilidade do conforto térmico e, conforme Skorupa e Manzatto (2019), tem-se ganho ambiental por meio do sequestro de carbono.

O sistema ILPF é uma alternativa para o homem do campo, entretanto, cada componente tem exigências, manejos e funções distintas e, contudo, precisam funcionar em harmonia, se complementando e buscando maximizar a produção de todos os componentes de forma a potencializar a sustentabilidade do sistema, considerando fatores sociais, econômicos e ambientais (REIS, 2021).

Para Reis (2021), os sistemas ILPF apresentam potencial para serem utilizados como estratégias de desenvolvimento sustentável, pois contribuem para a preservação da qualidade do solo; a conservação de água; o aumento do rendimento animal pelo conforto térmico; a mitigação dos efeitos de gases de efeito estufa e recuperação de áreas degradadas. Considerando o grande número de fatores associados ao sistema ILPF e a necessidade de um instrumento que mostre ao produtor um caminho para a tomada de decisão, surge a necessidade de ferramentas da matemática. Segundo Bassanezi (2002), a modelagem matemática consiste em transformar problemas reais em representações matemáticas, com o objetivo de resolvê-los e interpretar suas soluções no contexto do mundo real.

De acordo com Arroyo (2002), os problemas que envolvem minimização ou maximização e a obtenção de diversas metas conflitantes que devem ser atingidas simultaneamente e satisfazendo a um conjunto de restrições são chamados de problemas de otimização multiobjetivo. Para Vanderplaats (1999), Lobato (2008) e Kagan et al. (2009), um problema de otimização é composto por: variáveis do Modelo Matemático, funções objetivos e restrições.

Coello (2006) define um problema de otimização multiobjetivo como aquele que en-

volve a otimização de mais de uma função objetivo, e elas geralmente são conflitantes e sujeitas a restrições. A solução desses problemas é conhecida como Pareto-ótima e consiste num conjunto de soluções que representam um compromisso entre os objetivos, e onde nenhuma solução viável pode melhorar um critério sem piorar outro.

Escolher uma solução nesse conjunto ainda é desafiador, assim, Pereira (2004) propõe abordar as soluções considerando prioridades ou pesos atribuídos aos objetivos, convertendo o problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo e Deb et al. (2002) sugerem a combinação linear das funções objetivos com os pesos. Essa técnica foi adotada nesta pesquisa.

Em propriedades que produzem grãos e criam animais os modelos matemáticos são capazes de considerar questões como épocas de demanda por terra e forragem; formulação de ração de custo mínimo para os animais com a utilização de grãos e resíduos produzidos na propriedade; utilização ou não do esterco na lavoura; época mais adequada para comercialização dos animais e dos grãos; taxas de lotação de pastagem, entre outros.

Os produtores enfrentam a complexidade do sistema devido à necessidade de atender a várias demandas e recursos limitados, como aumento da produção agrícola, redução da emissão de gases de efeito estufa e geração de empregos, etc. Isso impulsiona a busca por ferramentas matemáticas, como a otimização multiobjetivo, que podem lidar com esses desafios, permitindo a busca por soluções que equilibrem diferentes metas conflitantes (ARROYO, 2002).

Além disso, sistemas como este promovem a sustentabilidade ao reduzir a erosão, aumentar a fertilidade do solo e a biodiversidade. Reduzem a necessidade de insumos externos, como fertilizantes e pesticidas, contribuindo para a diminuição da poluição do solo e da água (BALBINO et al., 2011; REIS, 2021). Outros benefícios dos sistemas integrados são a melhoria das propriedades do solo, a redução de custos e riscos econômicos, e a conservação ambiental.

Assim, pensando em dar suporte ao produtor rural na hora de decidir qual a melhor forma de promover a integração entre a atividade agrícola e a pecuária alcançando o máximo de eficiência com o mínimo de danos ao meio ambiente, buscou-se responder o seguinte questionamento: como o modelo matemático de otimização multiobjetivo pode auxiliar o produtor rural a decidir qual a melhor forma de promover a integração entre as atividades agrícola, florestal e pecuária alcançando o máximo de eficiência e considerando os fatores sociais, econômicos e ambientais?

Para responder à questão, tem-se objetivos:

OBJETIVO GERAL

• Apresentar um modelo matemático de otimização multiobjetivo aplicado a sistemas de Integração ILPF que mensure os aspectos econômicos, ambientais e sociais.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

• Avaliar o estado da arte da produção científica sobre o uso de ferramentas matemática utilizada para otimizar o fator econômico associado aos sistemas ILPF;

• Utilizar a otimização multiobjetivo, na prática, como uma ferramenta de apoio à tomada de

decisão dos produtores rurais.
• Identificar soluções que equilibram os aspectos econômicos, ambientais e sociais do sistema ILPF por meio do uso otimização multiobjetivo como ferramenta matemática.

Para atender ao primeiro objetivo específico foi realizada uma revisão sistemática da literatura consultando as bases de dados Science Direct, Scopus e Web of Science na tentativa de encontrar artigos e identificar as principais ferramentas matemáticas utilizadas no sistema de integração.

Para atender ao segundo objetivo específico, foi adotada uma abordagem aplicada, e considerou os insumos principais, custos e receitas da produção necessários para desenvolvimento do modelo matemático. A ferramenta computacional Solver do Excel da Microsoft Corporation, versão 7.3.5.2 (x64)/LibreOffice Community, foi utilizada devido à sua acessibilidade e praticidade para os produtores rurais.

Para atender ao terceiro objetivo específico foi utilizado técnicas de otimização multiobjetivo, na tentativa de otimizar as diferentes combinações de culturas agrícolas, criação de gado e plantio de árvores na Fazenda São Paulo, associados a emissão do metano pelo gado e sequestro de carbono pelas árvores. Os principais parâmetros e variáveis considerados no sistema ILPF estudado nesta pesquisa, teve como base ao trabalho de (BENDAHAN, 2015).

A pesquisa proposta pode contribuir para o avanço do conhecimento científico ao desenvolver um modelo matemático que integra múltiplas variáveis (econômicas, ambientais e sociais) para avaliar a viabilidade e os impactos do sistema ILPF. Também para preencher lacunas existentes na literatura acadêmica, proporcionando uma abordagem mais holística e integrativa para a análise desses sistemas agrícolas complexos.

A abordagem interdisciplinar necessária para desenvolver e aplicar o modelo matemático envolveu a integração de conhecimentos de agronomia, economia, ciências ambientais, ciências sociais e matemática aplicada. Isso não só enriqueceu o campo acadêmico como também abre caminhos para futuras pesquisas para lidar com desafios complexos e emergentes na agricultura sustentável.

A pesquisa teve o potencial de gerar resultados aplicáveis diretamente no setor agrícola, fornecendo ferramentas e diretrizes que podem melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, como o ILPF. Essa relevância prática estabeleceu, de certa forma, conexões entre a academia e o setor produtivo, garantindo que as descobertas sejam implementadas e beneficiem diretamente os produtores rurais.

Por fim, e não menos importante, a aplicação do modelo matemático em estudos de caso reais permitiu validar suas premissas e capacidades preditivas. Isso foi essencial para garantir que as recomendações derivadas do modelo sejam confiáveis e eficazes na prática, orientando políticas agrícolas e estratégias de manejo sustentável.

Segundo Costa e Ferko (2024), a maioria dos trabalhos de pesquisa está direcionada para a otimização mono objetivo, onde há apenas um objetivo a ser otimizado, geralmente associado ao lucro, deixando de lado os aspectos ambientais devido às limitações do modelo. Nessa abordagem, a solução ótima é aquela que maximiza ou minimiza esse único objetivo. Por outro lado, na otimização multiobjetivo, são considerados dois ou mais objetivos conflitantes simultaneamente. Nesse caso, não existe uma solução única ótima, mas sim um conjunto de soluções conhecido como fronteira de Pareto, permitindo a consideração de fatores ambientais e sociais, além dos financeiros. Essa abordagem oferece uma vantagem significativa ao possibilitar uma análise mais abrangente e equilibrada dos diferentes objetivos envolvidos.

Esta pesquisa está apresentada de acordo com a norma da Universidade Federal de Roraima, conforme a Resolução nº 08/2017 - CEPE, no formato de artigo, os quais estão dispostos nos modelos dos periódicos que foram aprovados.

• Artigo 01 - Uma revisão sobre o uso de ferramentas para avaliar o fator econômico associado ao sistema de integração que envolve lavoura, pecuária e floresta. Publicado em IOSR Journal of Business and Management. As normas de submissão dessa revista estão disponíveis em: https://www.iosrjournals.org/manuscript-guidelines.html e o link do artigo aceito está disponível em: https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/pages/26(1)Series-4.html.

• Artigo 02 - Otimização multiobjetivo: Um modelo matemático para auxílio à gestão do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. Publicado em RGSA - Revista de Gestão Social e Ambiental, ISSN: 1981-982X. As normas de submissão dessa revista estão disponíveis em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/issue/view/81. e o link do trabalho aceito está disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/7628.

• Artigo 03 - Otimizando ganhos na integração lavoura-pecuária-floresta: Aplicação da otimização multiobjetivo. Publicado em Contribuciones a Las Ciências Sociais, ISSN: 1988-7833. As normas de submissão dessa revista estão disponíveis em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/6617 e o link do trabalho aceito está disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/7197/4632.

IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM)
e-ISSN:2278-487X, p-ISSN: 2319-7668. Volume 26, Issue 1. Ser. 4 (January. 2024), PP 16-19
www.iosrjournals.org

Uma Revisão Sobre O Uso De Ferramentas Para Avaliar O Fator Econômico Associado Ao Sistema De Integração Lavoura, Pecuária E Floresta

Gilson De Souza Costa[1], Georgia Patrícia Da Silva Ferko[2]
[1]*UNIVERSIDADE Federal De Roraima, Brasil*
[2]*UNIVERSIDADE Federal De Roraima, Brasil*

Resumo
Os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Lavoura-Pecuária (ILP), Lavoura-Floresta (ILF) e Pecuária-Floresta (IPF) são desenvolvimentos agrícolas que vêm sendo desenvolvidos como sistemas alinhados aos princípios da produção mais limpa e eficiente, podendo fornecer pelo menos três tipos de produtos da mesma área de terra e num mesmo período. Assim, esse trabalho teve como objetivo verificar como se encontra o estado da arte da produção científica sobre o uso de ferramentas matemática utilizadas para otimizar o fator econômico associado ao sistema de integração ILPF, ILP, ILF e IPF já que essa informação interessa a banco, investidores e proprietários rurais. Dessa forma, foi realizada uma revisão sistemática da literatura consultando as bases de dados Science Direct, Scopus e Web of Science buscando por artigos, os quais foram analisados extensivamente para elucidar as principais ferramentas utilizadas no sistema de integração. Em seguida foi realizada uma análise de conteúdo dos artigos selecionados para organizar as informações levantadas. O estudo apontou os países, a diversificação das atividades produtivas, as variáveis ambientais e as ferramentas utilizadas para identificar os benefícios econômicos. Entretanto, embora as ferramentas tenham sido importantes para identificar os benefícios econômicos, não foram eficientes o suficiente para indicar onde os sistemas deveriam melhorá-los.
Palavras-chave*: Análise de conteúdo; Diversificação produtiva; Ferramentas matemática.*
Date of Submission: 07-01-2024 Date of Acceptance: 17-01-2024

I. Introdução

Para Cunha (2020) a agricultura é um setor que está cada vez mais inserido no mundo das inovações, em particular, nas atividades agrícolas e tem como preocupação o aumento da produção, trazendo ganhos financeiros. Segundo Soares & Jacometti (2015), o agronegócio está dividido em quatro segmentos que compreende os fornecedores de insumos; as atividades associadas a agropecuária; as transformações ligadas a agroindústria e as operações de logística como armazenagem e distribuição.

Nesse contexto surge como alternativa os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Lavoura-Pecuária (ILP), Lavoura-Floresta (ILF) e Floresta-Pecuária (ILP), que integram componentes agrícolas, pecuário e florestal em consórcio na mesma área e mesmo período. Entretanto, cada componente tem exigências, manejos e funções distintas e, contudo, precisam funcionar em harmonia, se complementando e buscando maximizar a produção de todos os componentes de forma a potencializar a sustentabilidade do sistema, considerando fatores sociais, econômicos e ambientais (REIS, 2021).

Segundo Balbino et al. (2011), os sistemas de integração trazem benefícios, pelo sinergismo entre pastagens e culturas anuais, como: melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo; quebra de ciclo de doenças e redução de insetos-pragas e de plantas daninhas; redução de riscos econômicos pela diversificação de atividades; e redução de custo na recuperação e na renovação de pastagens em processo de degradação.

Considerando o grande número de fatores associados aos sistemas de integração, surge o questionamento: Como se encontra a produção científica sobre o uso de ferramentas matemática utilizadas para otimizar o fator econômico associado aos sistemas de integração ILP, ILF, IPF e ILPF? Para isso foi realizada uma revisão sistemática da literatura para analisar o estado da arte que tratam desses sistemas de Integração e que fizeram uso de ferramentas matemática de forma a auxiliar o empresário rural na tomada de decisão na hora de otimizar os benefícios econômicos.

Existem ferramentas matemática, como a otimização multiobjetivo, que são usadas para otimizar sistemas compostos por diversas metas conflitantes que devem ser atingidas simultaneamente e satisfazendo a um conjunto de restrições. Assim, este trabalho surge com o propósito de levantar as principais ferramentas utilizadas e verificar se elas dão respostas satisfatórias diante da complexidade dos sistemas de integração.

II. Material e Métodos

A pergunta proposta neste trabalho foi respondida por meio de uma revisão sistemática da literatura para analisar o estado da arte dos estudos em sistema de Integração ILP, ILF, IPF e ILPF que fizeram uso de ferramentas matemática para auxiliar o empresário rural na tomada de decisão na hora de otimizar o fator econômico. Foi feito uma busca no título do trabalho, resumo, introdução e palavras-chave nas bases de dados do Science Direct (Elsevier), Scopus e Web of Science (Clarivate Analytics), considerando o parâmetro cronológico entre 01 de janeiro de 2015 a 17 de abril de 2023, com as seguintes palavras-chave e booleano: "Livestock crop forest"; Livestock crop forest AND economic; Livestock crop forest AND "linear programming"; Livestock crop forest AND "optimization"; Livestock crop forest AND "Operational Research"; Livestock crop forest AND "multicriteria programming"; Livestock crop forest AND "mathematical models" e Livestock crop forest AND "Linear models". A quantidade de trabalhos encontrados estão conforme a Tabela 01.

Tabela 01: Resultados da busca nas bases de dados Science Direct. Scopus e Web of Science

PALAVRAS-CHAVE / BASE DE DADO	SCOPUS	WEB OF SCIENCE	SCIENCE DIRECT	TOTAL
Livestock crop forest	560	530	143	1233
Livestock crop forest, economic	157	115	37	309
Livestock crop forest, linear programming	02	01	01	4
Livestock crop forest, optimization	09	13	05	27
Livestock crop forest, Operational Research	0	0	0	0
Livestock crop forest AND "multicriteria programming"	0	0	0	0
Livestock crop forest AND "mathematical models"	2	0	2	4
Livestock crop forest AND "Linear models"	07	04	02	13

Fonte: Dados da pesquisa.

A abordagem da pesquisa é qualitativa por envolver coleta de dados no processo logístico e, quanto a natureza, é aplicada pois busca gerar novas informações sobre as ferramentas matemática utilizadas para avaliar o fator econômico associado aos sistemas de integração ILP, ILF, IPF e ILPF.

O protocolo de Cronin, Ryan e Coughlan (2008) foi utilizado para sistematizar as informações levantadas e se dará da seguinte forma:

1 - Formulação da pergunta de pesquisa:

Como se encontra o estado da arte da produção científica sobre o uso de ferramentas matemática utilizadas para otimizar o fator econômico associado aos sistemas de integração ILP, ILF, IPF e ILPF?

2 - Definição de critérios de inclusão ou exclusão:

Como critérios de inclusão, a busca foi feita no tipo de documento "Artigos" em Title, abstract, keywords entre 1 de janeiro de 20150 e 17 de abril de 2023 e pesquisados nas bases de dados do Science Direct, Scopus e Web of Science e com as palavras-chave: "Livestock crop forest"; Livestock crop forest AND economic; Livestock crop forest AND "linear programming"; Livestock crop forest AND "optimization"; Livestock crop forest AND "Operational Research"; Livestock crop forest AND "multicriteria programming"; Livestock crop forest AND "mathematical models" e Livestock crop forest AND "Linear models". Foi considerado apenas o booleano "AND" para separar os artigos das ferramentas utilizadas para avaliar o fator econômico.

3 - Escolha e acesso da literatura:

Os artigos foram selecionados após leitura dos títulos, resumos, palavras-chave e introdução.

4 - Classificar a qualidade da literatura inserida na avaliação:

Primeiro foi considerado os trabalhos que abordavam aspectos econômicos nos sistemas de integração ILP, ILF, IPF e ILPF com algumas das ferramentas matemáticas da Tabela 01 e foram encontrados 48 artigos. Após leitura dos títulos, resumos, palavras-chave e introdução foram excluídos 20 artigos repetidos e 10 estavam fora do contexto. Após leitura de todos os artigos na íntegra, foram excluídos mais 4 por estarem fora do contexto e por ter sido identificados somente após a leitura do artigo na íntegra. Dessa forma, 14 trabalhos foram selecionados para análise.

5 - Analisar, sintetizar e mostrar os resultados encontrados

Aqui, cada artigo foi lido minuciosamente para entender como e quais são as ferramentas matemática utilizadas nos sistemas de integração ILP, ILF, IPF e ILPF para otimizar o fator econômico.

Agora, encontrados os artigos, foi avaliado por meio da análise de conteúdo da Bardin (2011), a qual apresenta a etapa de pré-análise, onde o material é organizado.

III. Resultados e Discussão

No primeiro momento, foi realizado um levantamento e identificado que os países onde concentram-se as publicações da amostra foram Brasil, Estados Unidos, China, Itália, Tanzânia, Uganda, Indonésia, Grande Mekong (composta com Camboja, Laos e Vietnã) e um trabalho considerou a América do Sul.

Dos quatorze artigos lidos minuciosamente, percebe-se uma predominância da opção em abordar a eficiência do sistema, principalmente, em seu aspecto econômico e apenas dois consideraram o aspecto social.

Sendo um sistema de integração é natural a diversificação das atividades produtivas, entretanto, tiveram destaque a bovinocultura com 7 trabalhos; seguindo pelo cultivo de milho com 6; madeira com 5; soja com 4; arroz e hortaliças com 3 e cabra, cana de açúcar, café e banana com 2 trabalhos. Apareceu em 1 (um) trabalho a criação de aves, cultivo de sorgo e frutas.

Quanto a variável ambiental, tiveram destaque o solo com 7 trabalhos, as emissões de gases de efeito estufa com 6 e água com 5 trabalhos. Também foi verificado que, além do fator econômico, foram considerados o fator ambiental em 10 trabalhos e o fator social em 2 trabalhos. Já em relação ao sistema de integração ficou ILPF com 6 trabalhos, ILP com 5, IPF com 3 e ILF com 2 trabalhos.

Quanto às ferramentas utilizadas para identificar o fator econômico, que é o principal objetivo deste trabalho, foram utilizadas as seguintes:

- A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que, segundo Paes et al. (2014), é um método usado para avaliar os impactos ambientais de um produto ou sistema ao longo de seu ciclo de vida, e foi também utilizada a ferramenta AgBalance que, segundo Schoeneboom et al. (2012a), serve para fazer inferências sobre sustentabilidade na agricultura, levando em conta os fatores ambiental, econômica e social;
- O FarmDESIGN que, segundo Groot et al. (2012), contém um algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em Pareto que avalia compensações entre vários objetivos de produção e que foi usada para calcular o lucro operacional, as emissões de GEE e o balanço de nitrogênio (N);
- Foi utilizado a Otimização Multiobjetivo para avaliar o potencial energético da biomassa dos resíduos agrícolas e sua conversão em quantidade equivalente de eletricidade;
- Dois trabalhos utilizaram Programação Linear e um utilizou a Programação Estocástica Discreta de forma a maximizar os rendimentos agrícolas;
- O modelo determinístico NUFER (Nutrient Flow in the Food System, Environment and Resource) que, segundo Wei et al. (2016), é um modelo com grandes bancos de dados que calcula os fluxos, eficiências de uso e emissões de N e P;
- O WaNuLCAS, um modelo de interação árvore-solo-cultura para sistemas agroflorestais que, segundo van et al. (2011) foi desenvolvido para auxiliar os sistemas agroflorestais já que o modelo simula processos dinâmicos de crescimento de plantas;
- Foi usando em 1 (um) trabalho as equações de Michaelis-Menten, Eadie-Hofstee, Lineweaver-Burk e Hanes-Woolf para determinar os parâmetros cinéticos de hidrolases envolvidas na ciclagem de carbono, fósforo, enxofre e oxidorredutase presente no solo;
- A Regressão Linear Generalizada foi usada para determinar o efeito dos fatores de intensificação e não intensificação na produção;
- Em três trabalhos foram utilizados o software de programação estatística R que é uma ferramenta importante para análise de dados;
- Regressão linear múltipla que foi utilizada para modelar a hora de pastejo animal.

Ressalta-se que na amostra a área de Matemática Aplicada contribuiu com 1 (um) trabalho (Conic relaxation approaches for equal deployment problems), o que chama a atenção uma vez que esta área tem ferramentas importantes para contribuir com o tema de investigação.

Embora o estudo tivesse como objetivo avaliar os benefícios econômicos do sistema de integração foi identificado a preocupação em mitigar as compensações entre os impactos econômicos e ambientais, procurando identificar fatores determinantes ligados à produtividade em um sistema ao mesmo tempo procurando avaliar os impactos ambientais, buscando otimizar do uso da terra e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Por outro lado, as ferramentas utilizadas foram importantes para identificar os benefícios, entretanto, não indicam onde melhorá-los.

IV. Conclusão

Este trabalho mostrou por meio de uma revisão integrativa da literatura o estado da arte dos estudos em sistema de Integração que fizeram uso de ferramentas matemática para auxiliar o empresário rural na tomada de decisão na hora de otimizar o fator econômico. Para isso foi realizada a leitura minuciosa de 14 artigos extraídos das bases de dados Web of Science, Scopus e Science Direct no recorte temporal de 01 de janeiro de 2015 a 17 de abril de 2023. Essa revisão permitiu elencar os principais países, a diversificação das atividades produtivas, as variáveis ambientais, os sistemas de integração mais praticados e as principais ferramentas utilizadas para identificar o fator econômico.

Dentre as principais limitações da pesquisa, destacam-se de forma negativa o baixo número de trabalhos em função do recorte temporal e que as ferramentas utilizadas foram importantes para identificar os benefícios, entretanto, não indicam onde melhorá-los e como melhorá-los, e de forma positiva destaca-se que, embora o estudo tivesse como objetivo avaliar os benefícios econômicos do sistema de integração, foi identificado a preocupação em mitigar as compensações entre os impactos econômicos e ambientais, procurando identificar fatores determinantes ligados à produtividade em um sistema ao mesmo tempo procurando avaliar os impactos ambientais, buscando otimização do uso da terra e as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Porém, a maior surpresa nesse trabalho foi identificar que, embora nos sistemas de integração abordam problemas de planejamento de produção, transporte, alocação e gerenciamento de recursos, envolvendo a obtenção de diversas metas conflitantes e que devem ser atingidas simultaneamente, necessitando de ferramentas com enfoque multiobjetivo que permitam considerar todos os componentes e suas restrições, entretanto, não foi verificado o uso predominante dessa ferramenta matemática que é capaz de dar respostas a problemas dessa natureza. Assim, os trabalhos vistos nessa pesquisa dão respostas significativas quando consideram os problemas que não envolvem metas conflitantes. Dessa forma, terá um grande avanço na literatura, quando for avaliado os problemas englobando a lavoura, pecuária e a floresta e considerando os aspectos econômicos, sociais e ambientais, que esses utilizem a otimização multiobjetivo e que não são resolvidos usando técnicas analíticas convencionais.

Referências

[1]. Paes, MX, Gianelli, BF, Kulay, LA, De Medeiros, GA, Mancini, SD, 2014. Avaliação Do Ciclo De Vida Aplicada À Gestão De Resíduos Sólidos Urbanos: Um Estudo De Caso. Ambiente. Nat. Recurso. Res. 4 (4), 169e177.

[2]. Groot, JCJ, Rossing, WAH, 2011. Aprendizado Auxiliado Por Modelos Para O Manejo Adaptativo De Recursos Naturais: Uma Perspectiva De Design Evolucionário. Métodos Eco. Evolução 2, 643-650.

[3]. Wei, S., Ma, L., Jiang, R.F., Bai, Z.H.,Wu, D.M., Xia, L.J., 2016. Temporal And Spatial Changes Of Nitrogen And Phosphorus Utilization Efficiency And Emissão Of Pig Breeding Based On NUFER Model. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 32, 190–196.

[4]. Van Noordwijk M, Lusiana B, Khasanah N, Mulia R (2011) Wanulcas Version 4.0, Background On A Model Of Water Nutrient And Light Capture In Agroforestry Systems. World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor.

[5]. Cunha, R. C. C. A Geoeconomia Da Cadeia Produtiva Da Soja No Brasil. 313 F. Tese, (Doutorado Em Geografia), Universidade De Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

[6]. Balbino LC, Cordeiro LAM, Silva VP, Moraes A, Martÿ´Nez GB, Alvarenga RC, Kichel AN, Fontaneli RS, Santos HP, Franchini JC, Galerani PR (2011) Evolução Tecnológica E Arranjos Produtivos De Sistemas De Integração Lavoura-Pecuária-Floresta No Brasil. Pesqui Agropecu Bras 46:10. Https://Doi.Org/10.1590/S0100-204X2011001000001

[7]. Cunha, R. C. C., & Espíndola, C. J. A Geoeconomia Da Produção De Soja No Sul Do Maranhão: Características Sociais E Territoriais. Revista Da ANPEGE, Vol 11, N° 16, Pg 37-65, Jul/Dez - 2015.

[8]. Cunha, R. C. C., & Espíndola, C. J. A Relevância Do Progresso Técnico Na Consolidação Da Cadeia Produtiva Da Soja No Sul Do Estado Do Maranhão (Brasil).

[9]. Geografia (Londrina), Vol 25, N° 1, Pg 87-106, 2016.

[10]. Cunha, R. C. C., & De Melo Cruz, W. L. Aspectos Geoeconômicos Da Cadeia Produtiva Da Soja No Estado De Santa Catarina: Produção E Circulação. Geo Uerj, N° 31, Pg 745-769, 2017.

[11]. Cunha, R. C. C. A Geoeconomia Da Cadeia Produtiva Da Soja No Brasil. 313 F. Tese, 76 (Doutorado Em Geografia), Universidade De Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

[12]. Cunha, R. C. C. Recente Desempenho Da Dinâmica Produtiva E A Difusão Territorial Da Agropecuária Maranhense. Revista Entre-Lugar, Vol 11, N° 21, Pg 128-158, 2020.

[13]. Soares, T., & Jacometti, M. (2015). Strategies That Add Value In Agribusiness Segments In Brazil : A Descriptive Study. Reen - Estratégia E Negócios, 8(43), 93-120.

[14]. Cronin, P., Ryan, F., & Coughlan, M. (2008). Undertaking A Literature Review: A Step-By-Step Approach. British Journal Of Nursing, Vol 17, N° 1, Pg 38-43, 2008.

[15]. Groot, JCJ, Oomen, GJM, Rossing, WAH, 2012. Otimização Multiobjetivo E Projeto De Sistemas Agrícolas. Agrícola Sist. 119, 63–77.

[16]. Schoeneboom, J., Saling, P., Gipmans, M., 2012b. NSF – Metodologia Agbalancetm Da BASF Em Agosto De 2012. BASF SE, Ludwigshafen, Alemanha. Disponível Em: Http://Www.Nsf.Org/Newsroom/Basfs-Agbalancemethodology-August-2012/.

[17]. Wei, S., Ma, L., Jiang, RF, Bai, ZH, Wu, DM, Xia, LJ, 2016. Mudanças Temporais E Espaciais Da Eficiência De Utilização E Emissão De Nitrogênio E Fósforo Da Criação De Suínos Com Base No Modelo NUFER. Trans. Queixo. Sociedade Agrícola Eng. 32, 190–196.

[18]. Dos Reis, JC, Et Al., 2021. Sistemas Integrados Lavoura-Pecuária: Um Uso Sustentável Da Terra Alternativa Para A Produção De Alimentos No Cerrado E Na Amazônia Brasileira. J. Limpo. Prod. 283, 124580.

RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental
ISSN: 1981-982X
Submission date: 03/08/2024
Acceptance date: 05/10/2024
DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-120
Organization: Interinstitutional Scientific Committee
Chief Editor: Éverton Hillig
Assessment: Double Blind Review pelo SEER/OJS

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO: UM MODELO MATEMÁTICO PARA AUXÍLIO A GESTÃO DO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA

Gilson de Souza Costa [1]
Georgia Patrícia da Silva Ferko [2]
Sandro Dimy Barbosa Bitar [3]

RESUMO

Objetivo: O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo matemático baseado em otimização multiobjetivo para auxiliar os agricultores que adotaram o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), visando maximizar a produção com limitações de recursos.

Referencial Teórico: Neste tópico, discute-se a agricultura sustentável, gestão rural, e ferramentas matemáticas de otimização, fornecendo uma base sólida para a compreensão do contexto da investigação.

Método: Compreende uma abordagem aplicada, considerando os insumos principais, custos e receitas da produção necessários para a alimentação do modelo. Utilizou-se a ferramenta computacional Solver do Excel da Microsoft Corporation, versão 7.3.5.2(x64)/LibreOffice Community, devido à sua acessibilidade e praticidade para os produtores rurais.

Resultados e Discussão: O modelo matemático proposto proporciona auxílio na tomada de decisões, considerando a distribuição de áreas para diferentes produções com vistas à eficiência dos resultados. Na discussão, esses resultados são contextualizados à luz do referencial teórico, destacando-se as implicações e relações identificadas. Discrepâncias e limitações do estudo também são consideradas.

Implicações da Pesquisa: Os resultados podem ser aplicados na gestão rural e na agricultura sustentável. Essas implicações podem abranger a otimização dos recursos e a melhoria da eficiência produtiva dos agricultores que utilizam o sistema ILPF.

Originalidade/Valor: Considera o equilíbrio dos aspectos econômicos, sociais e ambientais no uso do sistema ILPF. A relevância e o valor desta pesquisa são evidenciados por sua potencialidade em melhorar a tomada de decisões e maximizar o uso eficiente dos recursos na agricultura sustentável.

Palavras-chave: Sistema ILPF, Agricultura Sustentável, Gestão Rural, Ferramentas Matemáticas, Otimização Multiobjetivo.

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION: A MATHEMATICAL MODEL TO HELP MANAGE THE CROP-LIVESTOCK-FORESTRY INTEGRATION SYSTEM

ABSTRACT

Objective: The objective of this study is to develop a mathematical model based on multi-objective optimization to assist farmers who have adopted the Crop-Livestock-Forest Integration (ILPF) system, aiming to maximize production with resource limitations.

[1]Universidade Federal de Roraima, Roraima, RR, Brasil. E-mail: gilson.costa@ufrr.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0007-3266-9066
[2] Universidade Federal de Roraima, Roraima, RR, Brasil. E-mail: geoufpe@yahoo.com.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0020-6557
[3] Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil. E-mail: sandrobitar@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6971-2477

Theoretical Framework: In this topic, sustainable agriculture, rural management, and mathematical optimization tools are discussed, providing a solid basis for understanding the research context.

Method: It comprises an applied approach, considering the main inputs, costs and production revenues necessary to power the model. Microsoft Corporation's Excel Solver computational tool, version 7.3.5.2(x64)/LibreOffice Community, was used due to its accessibility and practicality for rural producers.

Results and Discussion: The proposed mathematical model provides assistance in decision making, considering the distribution of areas for different productions with a view to achieving efficient results. In the discussion, these results are contextualized in light of the theoretical framework, highlighting the implications and relationships identified. Discrepancies and limitations of the study are also considered.

Research Implications: The results can be applied to rural management and sustainable agriculture. These implications may include optimizing resources and improving the productive efficiency of farmers who use the ILPF system.

Originality/Value: Considers the balance of economic, social and environmental aspects in the use of the ILPF system. The relevance and value of this research are evidenced by its potential to improve decision-making and maximize the efficient use of resources in sustainable agriculture.

Keywords: ILPF System, Sustainable Agriculture, Rural Management, Mathematical TOOLS, Multi-Objective Optimization.

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO: UN MODELO MATEMÁTICO PARA AYUDAR A LA GESTIÓN DEL SISTEMA DE INTEGRACIÓN CULTIVOS-GANADERO-FORESTALES

RESUMEN

Objetivo: El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo matemático basado en optimización multiobjetivo para ayudar a los agricultores que han adoptado el sistema de Integración Cultivos-Ganadería-Bosque (ILPF), con el objetivo de maximizar la producción con limitaciones de recursos.

Marco Teórico: En este tema se discuten la agricultura sostenible, la gestión rural y las herramientas de optimización matemática, proporcionando una base sólida para comprender el contexto de la investigación.

Método: Comprende un enfoque aplicado, considerando los principales insumos, costos e ingresos de producción necesarios para impulsar el modelo. Se utilizó la herramienta computacional Excel Solver de Microsoft Corporation, versión 7.3.5.2(x64)/LibreOffice Community, por su accesibilidad y practicidad para los productores rurales.

Resultados y Discusión: Los resultados obtenidos revelaron [sintetizar los principales resultados de la investigación]. En la sección de discusión, estos resultados se contextualizan a la luz del marco teórico, destacando las implicaciones y relaciones identificadas. En este apartado también se consideran posibles discrepancias y limitaciones del estudio.

Implicaciones de la investigación: El modelo matemático propuesto brinda asistencia en la toma de decisiones, considerando la distribución de áreas para diferentes producciones con miras a lograr resultados eficientes. En la discusión, estos resultados se contextualizan a la luz del marco teórico, resaltando las implicaciones y relaciones identificadas. También se consideran discrepancias y limitaciones del estudio.

Originalidad/Valor: Los resultados se pueden aplicar a la gestión rural y la agricultura sostenible. Estas implicaciones pueden incluir la optimización de recursos y la mejora de la eficiencia productiva de los agricultores que utilizan el sistema ILPF.

Palabras clave: Sistema ILPF, Agricultura Sostenible, Gestión Rural, Herramientas Matemáticas, Optimización Multiobjetivo.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1 INTRODUÇÃO

Os agricultores e pecuaristas enfrentam uma série de dificuldades ao gerenciar um empreendimento rural devido às flutuações de preços e mercado, condições climáticas adversas, variação nos custos de insumos, mão de obra qualificada, riscos de saúde animal e vegetal, e adaptação às novas tecnologias, entre vários outros. Essas dificuldades aumentam quando o produtor está inserido nos Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), pois exige uma gestão integrada e complexa das diferentes atividades agrícolas, pecuárias e florestais, demandando conhecimentos específicos e habilidades de gestão. Por outro lado, Balbino et al. (2011) e Reis (2021) afirmam que esse sistema representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento sustentável, oferecendo benefícios como preservação da qualidade do solo, conservação da água, aumento da produtividade animal e vegetal, recuperação de áreas degradadas, diversificação de produção, redução dos impactos ambientais e melhoria do bem-estar animal.

Essas vantagens tornam o sistema ILPF uma opção atraente para agricultores que buscam aumentar a sustentabilidade e a rentabilidade de suas operações, ao mesmo tempo em que promovem a conservação ambiental. Entretanto, a complexidade desses sistemas requer uma abordagem integrada e ferramentas adequadas para auxiliar os produtores rurais na tomada de decisões. Uma das alternativas é a otimização multiobjetivo, que, segundo Arroyo (2002), serve para encontrar soluções que maximizem a eficiência do sistema ILPF considerando diversos fatores, como aspectos sociais, econômicos e ambientais.

Coello (2006) define um problema de otimização multiobjetivo como aquele que envolve a otimização de duas ou mais funções objetivos, geralmente conflitantes e sujeitas a restrições. A solução para esses problemas, conhecida como Pareto-ótimo, consiste em um conjunto de soluções que representam um compromisso entre os objetivos, onde nenhuma outra solução viável é capaz de melhorar um critério sem piorar o outro. Lidar com essa categoria de problemas pode ser desafiador, mas é necessário. Para superar esse desafio, Pereira (2004) sugere encontrar soluções que considerem prioridades ou pesos associados aos objetivos, transformando o problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo. Alguns métodos clássicos utilizados são: método da soma ponderada, ε-restrito, de programação por metas, de otimização hierárquica, da negociação, de otimização de compromisso, do critério ponderado exponencial, do produto ponderado, min-max, entre outros. Assim, o uso da matemática para a solução de problemas de produção rural pode otimizar recursos, aumentar a eficiência e maximizar os resultados, oferecendo ferramentas e técnicas para tomada de decisões

estratégicas.

Este artigo tem como objetivo desenvolver um modelo matemático baseado em otimização multiobjetivo para auxiliar os agricultores que adotaram o sistema ILPF, buscando fornecer ao produtor rural uma ferramenta que considere os diversos aspectos abordados acima, por meio da determinação da melhor distribuição de áreas para as culturas agrícolas, pecuária e florestal. Deb (2001) destaca que, embora os gestores busquem principalmente o crescimento e a rentabilidade do empreendimento, a busca por esses objetivos resulta em conflitos devido à presença de várias variáveis e restrições nos problemas reais, como sazonalidade da demanda, influências climáticas e custos elevados de matéria-prima. Nesse contexto, o modelo foi criado para permitir o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão para o homem do campo, considerando o equilíbrio dos aspectos econômicos, sociais e ambientais, além da maximização do uso do sistema ILPF.

A pesquisa adota uma abordagem aplicada, levando em conta os principais insumos necessários para a produção agrícola, bem como os custos e receitas associados a essa produção. O modelo matemático proposto foi elaborado para resultar em uma ferramenta que auxilie na tomada de decisões estratégicas. Ele permite uma análise detalhada da distribuição de áreas para diferentes tipos de produção, sempre com o objetivo de alcançar a máxima eficiência nos resultados. Para implementar essa ferramenta, foi utilizado o Solver do Excel, da Microsoft Corporation, e a versão 7.3.5.2 (x64) do LibreOffice Community. A escolha dessas ferramentas computacionais se deve à sua acessibilidade e praticidade, características essenciais para os produtores rurais que buscam soluções práticas e eficientes. Ao considerar a acessibilidade da ferramenta, o resultado permite que mesmo os produtores com menor familiaridade com tecnologias avançadas possam beneficiar-se do modelo proposto.

2 MATERIAL É MÉTODO

Nesta seção, descreve-se o processo pelo qual foi desenvolvido o modelo matemático. Ele não se aplica a todos os problemas enfrentados pelos produtores rurais, por isso, é essencial seguir os passos abaixo para evitar expectativas irreais e otimizar sua eficácia no contexto específico ao qual este trabalho se propõe. O processo de construção do modelo matemático utilizado neste trabalho está de acordo com Vanderplaats (1999), Lobato (2008) e Kagan et al. (2009), que afirmam que um problema de otimização é caracterizado pela presença dos seguintes elementos matemáticos:

1. Variáveis do Modelo Matemático: São variáveis que representam as escolhas ou ações que podem ser tomadas dentro do contexto do problema, permitindo explorar diferentes cenários e atuando em conjunto com as funções objetivos;
2. Função Objetivo: É a função matemática que se deseja otimizar;
3. Restrições: São as condições ou limitações que as variáveis devem satisfazer, definindo o espaço de variáveis ou conjunto factível de candidatos às soluções.

Para compreender a necessidade de obter os elementos que o compõem, foi realizado o levantamento dos parâmetros, variáveis, restrições e funções objetivos que alimentarão o modelo, organizados nas seções a seguir.

2.1 DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS E PARÂMETROS

Esta seção é crucial para a construção adequada de um modelo matemático, de forma que ele reflita fielmente a realidade do problema. Os parâmetros representam os valores fixos ou as constantes, enquanto as variáveis são os elementos controláveis do problema que podem ser ajustados 3 para encontrar a solução ótima. Identificar corretamente esses elementos é essencial para definir o escopo do modelo e as possibilidades de otimização.

Para facilitar o levantamento dos parâmetros, segue uma relação conforme CONAB (2020) dos principais componentes do cálculo de custo e receita de produção:

1. Despesas de Custeio: Operação com animal; operação com avião; operação com máquinas próprias; aluguel de máquinas e animais; mão de obra; sementes e mudas; fertilizantes; agrotóxicos; receita; outros;
2. Outras Despesas: Transporte externo; despesas administrativas; despesas de armazenagem; beneficiamento; seguro da produção e do crédito; assistência técnica; impostos e taxas;
3. Despesas Financeiras: Juros de financiamento;
4. Depreciações: Depreciação de benfeitorias e instalações; depreciação de máquinas, implementos e conjuntos de irrigação; depreciação do cultivo ou exaustão do cultivo;
5. Outros Custos Fixos: Manutenção periódica de benfeitorias e instalações; encargos sociais; seguro do capital fixo; arrendamento;
6. Receitas: A receita em um sistema ILPF advém de diversas fontes, dependendo da combinação das culturas associadas a pecuária, lavoura e florestais.

Aqui deve-se tomar cuidado com os itens IV e V pois sendo fixos podem trazer problemas ao sistema já que seus valores não são proporcionais, dessa forma recomenda-se

deixá-lo fora do modelo. Para facilitar na organização segue, a título de exemplo, a relação entre as variáveis e parâmetros, associadas aos custos e receitas. Para não sobrecarregar o modelo será considerado apenas os custos relacionados aos insumos e mão de obra, entretanto, usando raciocínio análogo, pode ser feito para todos os componentes do cálculo de custo relacionados acima.

Tome x = (x_1, x_2, · · ·, x_n), onde cada x_i , $i \in \{1, 2, \cdots, n\}$, refere−se as áreas a serem ocupadas com as n culturas consideradas no sistema.

Sejam P Ij e QIj , respectivamente, o preço e a quantidade unitária do insumo j (R$/kg) usado na cultura i (kg/ha). Assim, o custo com insumos será:

$$CI(x) = \sum_{i,j=1} PI_j \cdot QI_j \cdot x_i. \tag{1}$$

Sejam PMOj e QMOj , respectivamente, o preço e a quantidade unitária da mão-de-obra j (R$/hora) usado na cultura i (hora/ha). Assim, o custo com serviços será:

$$CMO(x) = \sum_{i,j=1} PMO_j \cdot QMO_j \cdot x_i. \tag{2}$$

Portanto, o custo variável e operacional total da produção é dado por:

$$CT(x) = \sum_{i,j=1} (PI_j \cdot QI_j + PMO_j \cdot QMO_j) \cdot x_i. \tag{1}$$

(3)

Receitas: A produção no sistema ILPF, por ser diversificada, provém de várias fontes. Dessa forma, sejam Pj e Qj , respectivamente, o preço e a quantidade unitária do produto j (R$/kg) da cultura i (kg/ha). Assim, a receita será:

$$R(x) = \sum_{i,j=1} P_j \cdot Q_j \cdot x_i. \qquad (2)$$

(4)

No caso de outras despesas e receitas, basta seguir o raciocínio acima e acrescentar nas equações dadas, respectivamente, em (1) e (2).

A razão principal da relação das variáveis e parâmetros é de evitar que haja permutas entre esses dois elementos, já que são indispensáveis para elaboração do modelo e seus papeis são distintos. Com os parâmetros e variáveis definidas, segue-se com as definições das funções objetivos e restrições.

2.2 FUNÇÕES OBJETIVOS E RESTRIÇÕES

Nesta seção serão definidas as restrições associadas aos recursos de investimentos, área disponível e não negatividade e as três funções objetivos, da seguinte forma:

1. Quanto as restrições - seja Ω o conjunto dos pontos x = (x1, x2, · · ·, xn) ∈ R n que satisfazem as restrições: Limitação de recursos: Seja C o capital de investimento, então Limitação de recursos: Seja C o capital de investimento, então:

$$\sum_{i,j=1} (PI_j \cdot QI_j + PMO_j \cdot QMO_j) \cdot x_i \leq C \qquad (5)$$

Limitação de área: Seja A a área disponível para as culturas, então:

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \leq A \qquad (6)$$

Restrições de não negatividade:

$$x_i \geq 0, i \in \{1, 2, 3, 4\}. \tag{7}$$

Outras restrições serão inseridas conforme o problema proposto.

2. Quanto as funções objetivos - dado x = (x1, x2, · · ·, xn), tem-se: **Problema de maximização:** Fator Econômico (associada aos lucro).

$$f_1(x) = \sum_{i,j=1} (P_j \cdot Q_j - PI_j \cdot QI_j - PMO_j \cdot QMO_j) \cdot x_i. \tag{3}$$

(8)

Problema de minimização: Fator Ambiental (associada às emissões de gases de efeito estufa - GEE). Seja αi a emissão de GEE pela cultura i.

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_i \tag{4}$$

(9)

Problema de maximização: Fator Social (associada à disponibilidade de horas para execução do trabalho).

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^{n} QMO_i x_i. \tag{5}$$

(10)

Tendo os parâmetros, variáveis, restrições e as funções objetivos, segue o modelo matemático.

2.3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático que atende ao problema proposto nesse trabalho, e cuja solução será configurada por meio do Solver do Excel, está definida por meio da função vetorial e que deverá ser maximizada:

$$F : \Omega \subset \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^3, F(x) = (f_1(x), -f_2(x), f_3(x)) \qquad (6)$$

(11)

onde:

fi está definida conforme (8), (9) e (10).

Observação: O sinal de menos que aparece com a segunda função serve para uniformizar. Deve-se maximizar F e como f2 está associada a questão ambiental (emissão), assume-se o problema matematicamente equivalente ao problema de minimização da f2.

O modelo pode ser sintetizado por:

$$\max_{x \in \Omega} F(x) \qquad (7)$$

(12)

Existem várias ferramentas para resolução de problemas multiobjetivos. Sendo o propósito desse trabalho sua acessibilidade não apenas para pessoas familiarizadas com ferramentas computacionais sofisticadas, assim, para resolver o problema multiobjetivo conforme modelo dado em (7), será necessário transformá-lo em um modelo matemático, inserido na classe de 6 problemas escalares, cuja metodologia de solução remete às técnicas para problemas clássicos com restrições de factibilidade e uma única função objetivo. São apresentados, a seguir, informações básicas sobre os métodos: Programação por metas e da soma ponderada.

- **Método da programação por metas** é uma técnica de otimização que permite a consideração simultânea de várias metas e é formulado conforme segue com base em em Gomes & Chaves (2004).

  Minimizar

$$Z = \sum_{i=1}^{k} \left(w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^- \right) \tag{13}$$

  Sujeito a

$$\begin{cases} f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = g_i & \forall i \in \{1, 2, \ldots, k\} \\ d_i^+, d_i^- \geq 0 & \forall i \in \{1, 2, \ldots, k\} \\ x_j \geq 0 & \forall j \in \{1, 2, \ldots, n\} \end{cases} \tag{14}$$

onde:

$x = (x_1, x_2, \ldots, x_n) \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$ são as variáveis de decisão;

f_i denotam as funções objetivo;

g_i são as metas definidas pelo gestor;

d^+_i e d^-_i são as variáveis auxiliares de desvio para cada meta g_i associada a f_i e revelam o quanto estaremos distante da meta (além ou aquém) ao considerarmos alguma solução;

w^+_i *e* w^-_i são os pesos associados aos desvios d^+_i e d^-_i.

Método da soma ponderada transforma um problema de otimização multiobjetivo em um problema de otimização de critério único, através da atribuição de pesos aos diferentes objetivos e está definida com base em em Zadech (1963). A função de soma ponderada F, dada em (7), é definida como:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{k} w_i f_i(x) \tag{15}$$

onde:

k é o número de funções objetivos;

fi é a função objetivos i;

w_i é o peso atribuído à função objetivo i, com $\sum_{i=1}^{k} w_i = 1 \text{ e } w_i \geq 0.$ Um peso maior atribuído a um objetivo indica que ele é relativamente mais importante no processo produtivo.

Esses elementos são necessários para compor o modelo, entretanto, as variáveis, parâmetros e restrições são ajustáveis conforme realidades individuais.

2.4 SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Um problema linear pode ser resolvido usando várias ferramentas computacionais disponíveis comercialmente ou não.

O método da soma ponderada será utilizado para a resolução do problema pois, além de converter um problema multiobjetivo em um problema de objetivo único, ele considera pesos que podem ser ajustados para refletir as preferências do decisor, permitindo uma grande flexibilidade na modelagem dos objetivos. Como ferramenta computacional, foi considerado o Solver do Excel da Microsoft Corporation, versão 7.3.5.2(x64)/LibreOffice Community devido à sua praticidade e por ser de fácil acesso.

O Solver está configurado para encontrar a solução ótima que maximiza as funções de mérito objetivando a melhor combinação viável de valores para as variáveis de decisão no formato proposto por este trabalho. Para utilizá-lo siga os passos abaixo e sempre que aparecer a função fi , considere i $\in$ {1, 2, 3}:

Passo 1. Construir a tabela com as principais variáveis e parâmetros conforme Tabela 1, a qual deverá ser vista como a tabela do Excel, onde a numeração corresponde ao número de linhas construída para melhor entendimento da configuração do Solver.

Tabela 1

Modelo de como deve ser preenchida a planilha no Excel, com sugestão de organização dos elementos que compõem o modelo.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Variáveis	Receita (R$/ha)	Custos (R$/ha)	Lucro (R$/ha)	Emissão $(CO2_e)$ (t/ha)	Sequestro $(CO2_e)$ (t/ha)	Mão-obra (h/ha)
2		R_1	C_1	$R_1 - C_1$	$k \cdot e_1$	s_1	QMO_1
3		R_2	C_2	$R_2 - C_2$	$k \cdot e_2$	s_2	QMO_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n		R_{n-1}	C_{n-1}	$R_{n-1} - C_{n-1}$	$k \cdot e_{n-1}$	s_{n-1}	QMO_{n-1}

Fonte: O autor.

Tabela 2

Configuração na planilha do Excel das funções f_i .

Função	Implemento no Solver
$f_1(x)$	$= somarproduto(A2 : A(n-1); D2 : D(n-1))$
$f_2(x)$	$= -(somarproduto(A2 : A(n-1); F2 : F(n-1)) - somarproduto(A2 : A(n-1); E2 : E(n-1)))$
$f_3(x)$	$= somarproduto(A2 : A(n-1); G2 : G(n-1))$

Fonte: O autor.

Passo 2. Insira as funções objetivos, na mesma planilha Excel (ver Tabela 1) conforme definidas na seção anterior. Observe que cada função fi definida na Tabela 2 está associada a um dos fatores: econômico, ambiental e social.

Passo 3. Encontrar uma solução que otimize as funções objetivos, e será feito usando o Solver do Excel e uma combinação linear ponderada dos pesos w1, w2 e w3 com w1 + w2 + w3 = 1. Assim, tem-se a Tabela 3 com a função geral a ser otimizada.

Observe que a função F definida em (6) é uma função vetorial, enquanto a função que está na Tabela 3 é escalar (não vetorial) e foi chamada de função G.

Tabela 3

Função a ser majorada e definida por meio da combinação linear.

$G(x) =$	$w_1 \cdot (= somarproduto(A2 : A(n-1); D2 : D(n-1))) +$ $-w_2 \cdot (= somarproduto(A2 : A(n-1); F2 : F(n-1)) -$ $somarproduto(A2 : A(n-1); E2 : E(n-1))) +$ $w_3 \cdot (= somarproduto(A2 : A(n-1); G2 : G(n-1)))$

Fonte: O autor.

Passo 4. Definir as restrições, as quais estão na Tabela 4. Aqui C é o custo total disponível para investimento e A é a área total disponível para as culturas.

Passo 5. Configurar o Solver: Para melhor entendimento, acompanhar conforme Figura 1, seguindo a sequência:

1. Em ”Célula objetivo” deve ficar a função G a ser otimizada e configurada conforme Tabela 3;
2. Como o objetivo é maximizar verifique se já está marcada em ”Otimizar para”;
3. Em ”Células variáveis” ficam as variáveis que estão na coluna A. Observe em Tabela 1 que o espaço está em braco e será preenchida com a solução encontrada pelo Solver;

Tabela 4

Tabela com as restrições básicas.

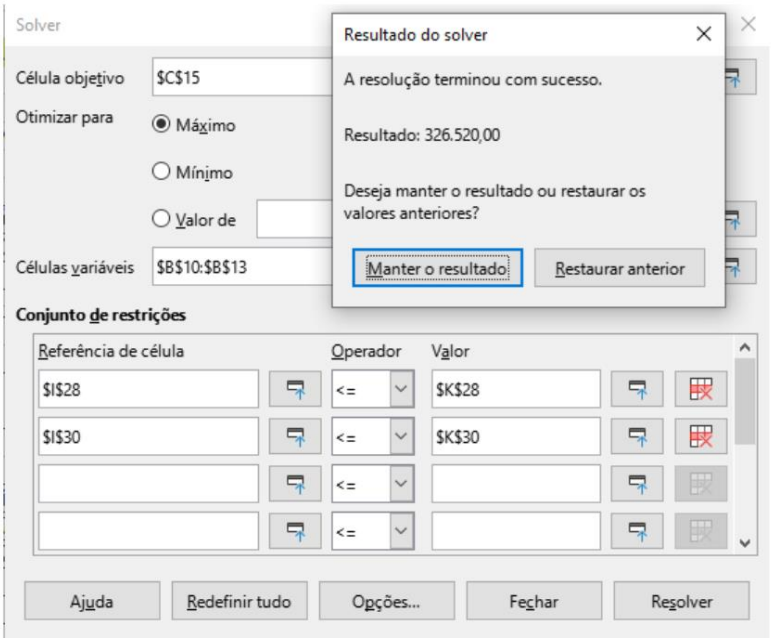
Limitação de recursos	$= somarproduto(A2 : A(n-1); C2 : C(n-1))$	$\leq$ C
Limitação de área	$= soma(A2 : A(n-1))$	$\leq$ A
Compensação GEE	$= somarproduto(A2 : A(n-1); F2 : F(n-1))$- $somarproduto(A2 : A(n-1); E2 : E(n-1))$	$\geq$ 0
Suplementação	$= (Hi - Ii)Ai^*$	$\geq$ 0
Não negatividade	A2 e A3	$\geq$ 0

*H_i é a qte produzida em x_i e I_i é a qte utilizada na suplementação dos animais com $i \in \{1, 2, ..., n\}$.
Fonte: O autor.

4. Em ”Conjunto de restrições” ficam as informações da Tabela 4 e, em cada linha da Figura 1, ficará uma linha da Tabela 4;
5. É importante que as variáveis sejam não negativas, então clique no botão “Opções” e marque em ”Assumir variáveis como não negativas”;
6. Por fim, clicando no botão ”Resolver” localizado na última linha a direita, aparecerá um retângulo ”Resultado do solver” conforme a Figura 1.

Figura 1

Resultados do Solver.



Fonte: O autor.

Em ”Resultado do solver” vai aparecer o valor majorado. Ao clicar em ”Manter o resultado”, aparecerá na Tabela 1 os valores das variáveis de decisão, o valor da função objetivo e os valores nas restrições. Agora, é hora de avaliar os resultados e como eles podem ser interpretados pelos produtores rurais.

Mais informações sobre a configuração do solver podem ser obtidas por meio do endereço: https://help.libreoffice.org/7.3/pt-BR/text/scalc/01/solver.

Observe sempre a variação das funções f ′ i s, lembrando que elas, isoladamente, refletem os aspectos: econômico, social e ambiental.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na seção anterior, foi apresentado o modelo de otimização, destacando os elementos que o compõem. Para ilustrar sua relevância prática, será fornecido um exemplo elucidativo, conforme demonstrado na Figura 2. Dessa forma, um produtor poderá encontrar a solução otimizada para sua produção agrícola, pois estará familiarizado com os componentes do modelo e saberá como resolvê-lo.

Para resolver esse problema no Solver do Excel, siga as etapas:

∗ **Definir as células de variáveis:** Defina as células nas cores verdes (células A1 e A2 da Figura 2) como variáveis. Elas serão preenchidas pelo Solver e terão como resultados os valores que majoram a função. Suponha que a célula A2 seja o valor da área a ser ocupada pelo gado e A3 por grãos e que as demais informações nas linhas 2 e 3 estão associadas a essas culturas, com suas devidas de medidas e que esses valores são por hectare. As unidades não foram acrescentadas na tabela para evitar sobrecarregá-la.

∗ **Configurar a função a ser otimizada:** A função F é dada pela combinação linear conforme linha 5 da Figura 2).

$$F(x) = w_1 \cdot f_1(x) - w_2 \cdot f_2(x) + w_3 \cdot f_3(x), \tag{16}$$

onde:

w_1 = 0.34, w_2 = 0.33 e w_3 = 0.33 (são pesos escolhidos aleatoriamente) e as funções f_1, f_2 e f_3 estão configuradas, respectivamente, nas células B7, B8 e B9, da seguinte forma:

f1(x) = *SOMARPRODUTO* (A2: A3; D2: D3);

f2(x) = *SOMARPRODUTO* (A2: A3; E2: E3);

f3(x) = *SOMARPRODUTO* (A2: A3; F2: F3).

Figura 2

Planilha com informações necessárias para alimentar o modelo.

	A	B	C	D	E	F
1	Variáveis	Receita	Despesas	Lucro	Saldo+ GEE	Mão-obra
2		1500	1100	400	1,2	5
3		1800	1450	350	1,7	25
4						
5	Max F(x) = w1*f1(x) + w2*f2(x) + w3*f3(x)				0,00	
6						
7	f1 (x) =	R$ 0,00	PESOS			
8	f2 (x) =	0	W1	0,34		
9	f3 (x) =	0	W2	0,33		
10			W3	0,33		
11						
12	**Restrições:**					
13	Área útilizada		0	≤	300	
14						
15	Limitação de recuros		R$ 0,00	≤	R$ 200.000,00	
16						
17	Mínimo de grãos		0	>=	10	

Fonte: O autor.

Assim, a primeira parte do modelo é está configurada na célula D5 da seguinte forma:

$$\text{Max } F(x) = SOMARPRODUTO(B7 : B9; D8 : D10). \tag{17}$$

Para obter a segunda parte do modelo, considere as restrições.

*** Configurar as restrições:** Suponha que o proprietário tenha 300 hectares a serem utilizados, tenha R$200.000,00 para investir e precise plantar no mínimo 10 hectares de grãos. Assim:

- A área utilizada deve ser menor ou igual a 300, portanto, na célula C13, coloque = A2 + A3 e tem-se a linha 13 da Figura 2;
- A limitação de recursos deve ser menor ou igual a R$ 200.000,00, então, na célula C15, coloque = *SOMARPRODUTO* (A2 : A3; C2 : C3) e tem-se a linha 15 da Figura 2;
- Considerando que precisa ter no mínimo 10 hectares de grãos, na célula C17 coloque = A2 tem-se a linha 19 da Figura 2.

A planilha está pronta para poder executar o solver.

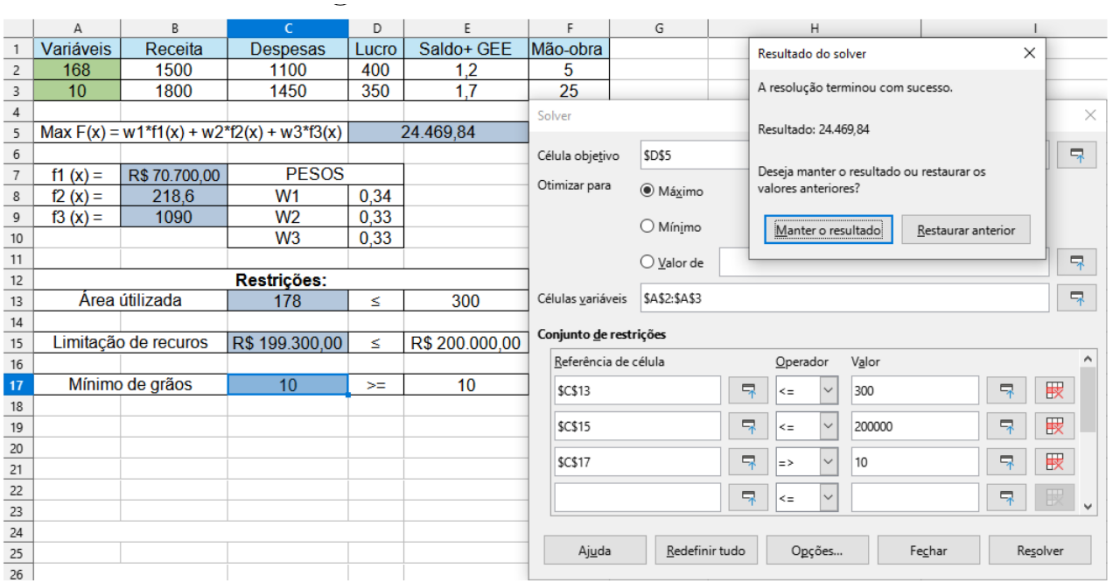
* **Executar o Solver:** Abra o Solver no Excel (normalmente em Ferramentas > Solver). Acompanhe conforme Figura 3:

- Em "Célula objetivo" deve ficar a função a ser otimizada e ela está configurada na célula D5; Como o objetivo é maximizar então já está marcada em "Otimizar para";
- Em "Células variáveis" ficarão as variáveis que estão nas células A2 e A3;
- Em "Conjunto de restrições" ficarão em "Referência de células" a configuração conforme, respectivamente, as células C13, C15 e C17;
- Clique no botão "Opções" e marque em "Assumir variáveis como não negativas";
- Execute o Solver e terá a Figura 3.

O Solver do Excel revelou, por meio da Figura 3, que a distribuição ótima ocorre quando são alocados 168 hectares para a área do gado e 10 hectares para os grãos.

Figura 3

Resultados do Solver.



Fonte: O autor.

Os valores das funções fi foram preenchidos e refletem os aspectos econômicos, sociais e ambientais do problema. É relevante ressaltar que, caso seja desejável, é possível ponderar uma das funções fi. Esta ação é equivalente a definir os demais pesos $wj = 0$ para $i \neq j$.

É importante notar que não foi necessário utilizar toda a área e nem todos os recursos disponíveis.

É possível adicionar mais restrições e/ou ajustar os pesos das funções de acordo com as necessidades específicas. Se os resultados forem satisfatórios, clique em "Manter o resultado".

Agora, é crucial avaliar os resultados obtidos e considerar como eles podem ser interpretados pelos produtores rurais para tomar a melhor decisão. Este processo envolve uma análise cuidadosa dos aspectos econômicos, sociais e ambientais envolvidos.

Caso a extensão do Solver não esteja disponível para acesso via barra de ferramentas, você encontra a orientação correta para acionar a extensão do Excel por meio do endereço: https://support.microsoft.com/pt-br/office/carregar-o-suplemento-solver-no-excel-612926fc-d53b-46b4-872c-e24772f078ca.

Em um modelo agrícola ILPF, parâmetros como a quantidade de chuva, a temperatura ou preços dos produtos agrícolas podem mudar devido a condições climáticas, econômicas ou outras influências externas. Assim, para trabalhos futuros, será interessante investigar novas propostas com a presença de incertezas sobre os parâmetros. É muito importante avaliar a sensibilidade do modelo e entender se pequenas perturbações nos parâmetros ocasionam pequenas perturbações na solução encontrada inicialmente.

5 CONCLUSÃO

Este estudo propôs um modelo matemático baseado em otimização multiobjetivo como uma ferramenta para auxiliar os agricultores na gestão do sistema de ILPF. Por meio do uso do Solver do Excel, foi possível propor um instrumento que permite a distribuição de áreas para as diferentes atividades, considerando diversos aspectos, como lucro, impacto social e sustentabilidade ambiental, ajustando as funções objetivo. O resultado oferece aos produtores rurais mais uma alternativa para a tomada de decisões, contribuindo para aprimorar a eficiência e a viabilidade do sistema ILPF.

Além disso, o modelo matemático foi desenvolvido para ser flexível e adaptável às diferentes condições e necessidades dos produtores rurais, permitindo ajustes conforme variáveis específicas de cada região e tipo de cultivo. Esse nível de customização é essencial para maximizar a aplicabilidade e o impacto positivo do modelo na prática agrícola diária. Este estudo destaca a relevância da aplicação de ferramentas matemáticas em temas ligados à agricultura para promover práticas sustentáveis e eficientes, visando o melhor uso dos recursos disponíveis e o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficazes.

REFERÊNCIAS

Arroyo, Jose Elias Claudio. Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo. 2002. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2002.

Balbino, L. C.; Cordeiro, L. A. M.; Porfírio-da-silva, V.; Moraes, A. de; Martínez, G. B.; Alvarenga, R. C.; Kichel, A. N.; Fontaneli, R. S.; SantoS, H. P. dos; Franchini, J. C.; Galerani, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 46, n. 10, 2011.

Coello, C. A. C. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. IEEE Computational Intelligence Magazine, p. 28-36, fev. 2006.

CONAB. Norma Metodologia do Custo de Produção 30.302. SUINF/GECUP. 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/images/arquivos/normativos/30000_sistema_de_operacoes/30.302_Norma_Metodologia_de_Custo_de_Producao.pdf. Acesso em: 10 jan. 2024.

Deb, K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. New Jersey: John Wiley & Sons, 2001. 518 p.

Gomes, C. F. S.; Chaves, M. C. C. Aplicação da Programação por Metas e Método Lexicográfico ao Método STEM - nova proposta de algoritmo de formulação linear multiobjetivo. 2004.

Kagan, N. et al. Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2009.

Lobato, F. S. Otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas de engenharia. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

Reis, J. C. dos et al. Sistemas integrados lavoura-pecuária: um uso sustentável da terra alternativa para a produção de alimentos no Cerrado e na Amazônia brasileira. Journal of Cleaner Production, v. 283, p. 124580, 2021.

Vanderplaats, G. N. Numerical Optimization Techniques For Engineering Design. Terceira Edição. Colorado Springs, USA: VR&D Inc., 1999.

REVISTA CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES

Otimizando ganhos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta: aplicação da otimização multiobjetivo

Optimizing gains in the crop-livestock-forest integration system: application of multi-objective optimization

Optimización de ganancias en el sistema de integración cultivos-ganadería-bosque: aplicación de la optimización multiobjetivo

DOI: 10.55905/revconv.17n.6-002

Originals received: 05/03/2024
Acceptance for publication: 05/24/2024

Gilson de Souza Costa
Mestre em Matemática
Instituição: Universidade Federal de Roraima
Endereço: Roraima - Roraima, Brasil
E-mail: gilson.costa@ufrr.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0007-3266-9066

Geórgia Patrícia da Silva Ferko
Doutora em Políticas Públicas
Instituição: Universidade Federal de Roraima
Endereço: Roraima - Roraima, Brasil
E-mail: georgia.ferko@ufrr.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0020-6557

Sandro Dimy Barbosa Bitar
Doutor em Engenharia Elétrica
Instituição: Universidade Federal do Amazonas
Endereço: Roraima - Roraima, Brasil
E-mail: sandrobitar@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6971-2477

Jalison Lopes
Doutor em Zootecnia
Instituição: Universidade Federal de Roraima
Endereço: Roraima - Roraima, Brasil
E-mail: jalison.lopes@ufrr.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6163-0183

RESUMO
O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF é uma abordagem agrícola integrada que visa maximizar a eficiência produtiva e a sustentabilidade ambiental. O objetivo deste estudo foi aplicar ferramentas matemáticas, especialmente a otimização multiobjetivo, para identificar soluções que equilibram os aspectos econômicos, ambientais e sociais do sistema ILPF. Este

estudo de caso investigou o equilíbrio na produção de um sistema de ILPF na Fazenda São Paulo, em Iracema-RR. Utilizando técnicas de otimização multiobjetivo, foram exploradas diferentes combinações de culturas agrícolas, criação de gado e plantio de árvores. Usando o solver do Excel, foi encontrado a melhor distribuição da área cultivada para otimizar a produção de grãos, árvores e criação de gado, levando em consideração a emissão e sequestro do metano. No caso, houve uma ferramenta testada para o apoio à tomada de decisão para produtores rurais em busca da sustentabilidade e eficiência nos sistemas ILPF, contribuindo assim para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e resilientes.

Palavras-chave: modelagem matemática, eficiência produtiva, distribuição de áreas, sistema ILPF.

ABSTRACT

The Crop-Livestock-Forest Integration system - ILPF is an integrated agricultural approach that aims to maximize productive efficiency and environmental sustainability. The objective of this study was to apply mathematical tools, especially multi-objective optimization, to identify solutions that balance the economic, environmental and social aspects of the ILPF system. This case study investigated the balance in the production of an ILPF system at Fazenda São Paulo, in Iracema-RR. Using multi-objective optimization techniques, different combinations of agricultural crops, livestock farming and tree planting were explored. Using the Excel solver, the best distribution of the cultivated area was found to optimize the production of grains, trees and livestock, taking into account the emission and sequestration of methane. In this case, there was a tested tool to support decision-making for rural producers in search of sustainability and efficiency in ILPF systems, thus contributing to the development of more sustainable and resilient agricultural practices.

Keywords: mathematical modeling, production efficiency, ILPF system.

RESUMEN

El sistema de Integración Cultivos-Ganadería-Bosques - ILPF es un enfoque agrícola integrado que tiene como objetivo maximizar la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental. El objetivo de este estudio fue aplicar herramientas matemáticas, especialmente optimización multiobjetivo, para identificar soluciones que equilibren los aspectos económicos, ambientales y sociales del sistema ILPF. Este estudio de caso investigó el equilibrio en la producción de un sistema ILPF en la Fazenda São Paulo, en Iracema-RR. Utilizando técnicas de optimización multiobjetivo, se exploraron diferentes combinaciones de cultivos agrícolas, ganadería y plantación de árboles. Utilizando el solucionador Excel se encontró la mejor distribución del área cultivada para optimizar la producción de granos, árboles y ganado, teniendo en cuenta la emisión y el secuestro de metano. En este caso, se encontró una herramienta probada para apoyar la toma de decisiones de los productores rurales en busca de sostenibilidad y eficiencia en los sistemas ILPF, contribuyendo así al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes.

Palabras clave: modelación matemática, eficiencia productiva, sistema ILPF.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Bassanezi (2002), a modelagem matemática diz respeito ao primor de pegar problemas reais e os transpor para o plano matemático buscando assim resolvê-los e interpretar suas soluções na linguagem do mundo real. De acordo com Coello (2006), a maior parte dos problemas reais encontrados na área de otimização envolve a obtenção de diversas metas que devem ser atingidas simultaneamente e estão sujeitas a restrições e, em geral, elas são conflitantes já que não existe uma única solução que otimize todas ao mesmo tempo.

Para Reis (2021), os sistemas de integração oferecem uma série de benefícios, incluindo a preservação da qualidade do solo, a conservação da água, o aumento da produtividade animal e a recuperação de áreas degradadas. No entanto, a complexidade desses sistemas exige uma abordagem integrada e ferramentas adequadas para auxiliar os produtores rurais nas tomadas de decisões.

Diante dessa necessidade, surge a importância da utilização de ferramentas matemáticas, em especial a otimização multiobjetivo, para encontrar soluções que maximizem a eficiência do sistema ILPF considerando os diversos fatores envolvidos, como aspectos sociais, econômicos e ambientais. De acordo com Arroyo (2002), os problemas que envolvem otimização e a obtenção de diversas metas conflitantes que devem ser atingidas simultaneamente e satisfazendo a um conjunto de restrições são chamados de problemas de otimização multiobjetivo.

Este estudo, realizado na Fazenda São Paulo, localizada em Iracema-RR, teve como objetivo aplicar ferramentas matemáticas, especialmente a otimização multiobjetivo, para identificar soluções que equilibram os aspectos econômicos, ambientais e sociais do sistema ILPF, buscando resposta para o seguinte questionamento: como a otimização multiobjetivo pode auxiliar o produtor rural a decidir a melhor forma de promover a integração entre as atividades agrícola, florestal e pecuária alcançando o máximo de eficiência e considerando os fatores sociais, econômicos e ambientais?

A justificativa para este estudo em utilizar ferramentas matemáticas para otimizar a produção em um sistema ILPF, investigando a distribuição ideal da área cultivada e os efeitos da emissão e sequestro de metano pelas árvores teca, foi motivada por dois principais fatores. Primeiramente, busca-se destacar alternativas que possam aprimorar o sistema, considerando além do aspecto econômico, os aspectos ambientais e sociais ao mesmo tempo em que contribui

como soluções inovadoras e sustentáveis podendo ser usadas para garantir aumento na produção de alimentos. Em segundo lugar, diante da escassez de ferramentas matemáticas específicas, especialmente no contexto da otimização multiobjetivo, que poderiam servir como um recurso importante para os produtores rurais (Costa, Ferko, 2024).

2 MATERIAL E MÉTODO

Nesta seção descreve-se o processo de construção do modelo matemático utilizado neste trabalho. Segundo Vanderplaats (1999), Lobato (2008) e Kagan *et al*. (2009), um problema de otimização é caracterizado pela presença dos seguintes elementos matemáticos:

- Variáveis do Modelo Matemático: São variáveis que permitem explorar diferentes cenários e são definidas como as variáveis de decisão que atuam em conjunto com as funções objetivos.
- Função Objetivo: Está associado com o objetivo que será mensurado no sistema e é representada por uma função matemática;
- Restrições: Definem o espaço de variáveis de decisão ou conjunto factível de candidatos às soluções.

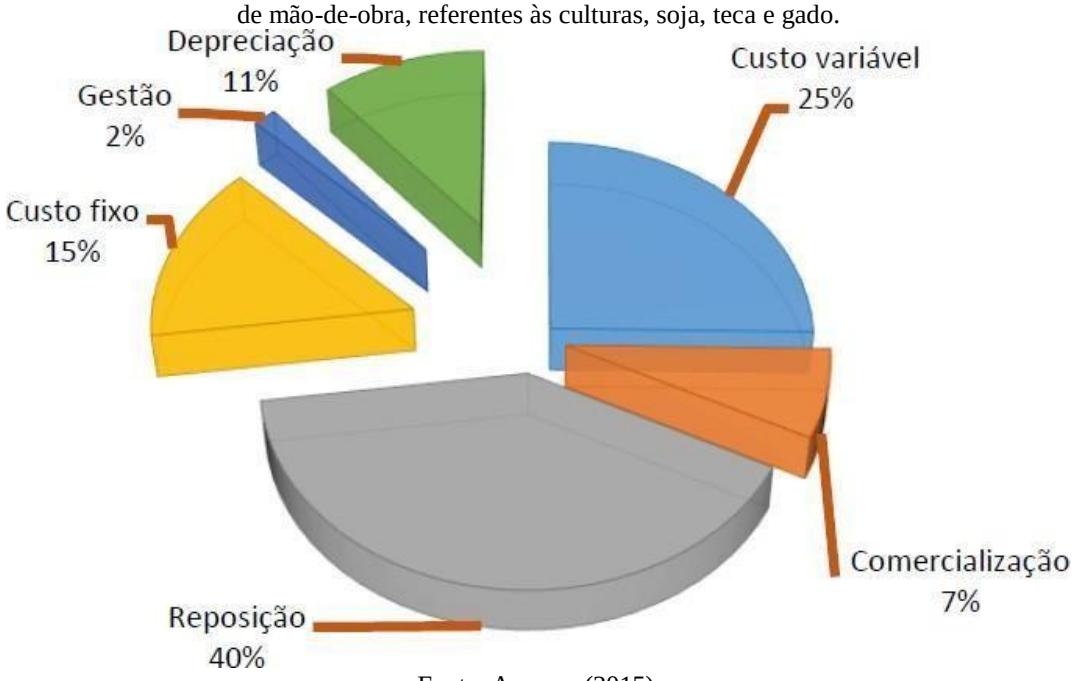
Para compreender a necessidade de obter os elementos que o compõem, foi realizado o levantamento dos parâmetros, variáveis e restrições que alimentarão o modelo e estão organizadas nas seções a seguir.

2.1 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS

Este levantamento é crucial para a construção adequada do modelo, fornecendo os dados e limitações necessários para sua correta aplicação. Serão discutidos os métodos de coleta de dados, a justificativa para a escolha de determinados parâmetros e variáveis, bem como as restrições que devem ser consideradas durante a análise.

Os principais custos considerados no sistema estudado podem ser vistos nas tabelas 122, 123 e 124 (Amaury, 2015). A Figura 1 ilustra a distribuição desses custos anuais totais, sem os valores de mão-de-obra.

Figura 1 – Divisão percentual dos custos fixos e variáveis que foram levantados no sistema estudado, sem valores de mão-de-obra, referentes às culturas, soja, teca e gado.

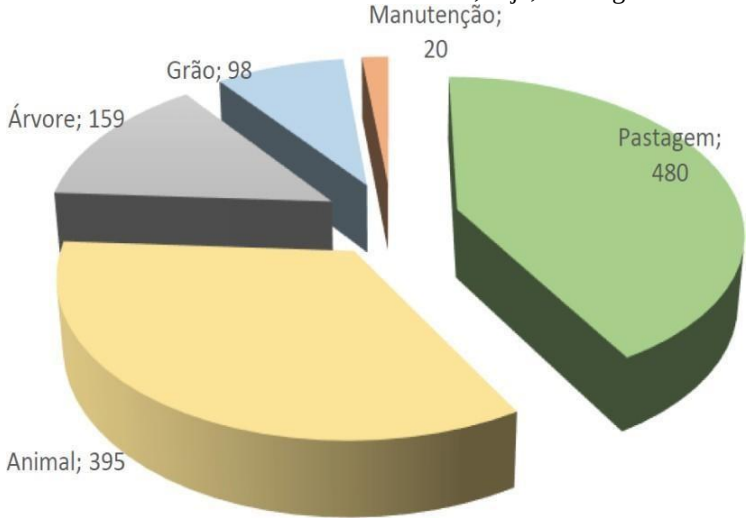


Fonte: Amaury (2015).

Considerando os valores da Figura 1 relacionados ao custo variável, gestão, comercialização, reposição e administrativo correspondem a R$74% do valor investido.

A mão-de-obra é importante na contabilização dos custos, assim foi considerada a Figura 2 que apresenta a distribuição da mão-de-obra (homens dia/ano) contratada na propriedade *São Paulo* em 2011. As Figuras 1 e 2 não consideram a cultura do arroz.

Figura 2 – Representação gráfica da distribuição da mão-de-obra (homens dia/ano) contratada na propriedade São Paulo em 2011 referentes às culturas, soja, teca e gado.



Fonte: Amaury (2015).

De acordo com Amaury (2015), a mão-de-obra corresponde a cerca de 11% das despesas totais e que seriam necessários 1152 homens/dia/ano para realizar as tarefas. Assim, foi possível obter os custos com serviços conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidades e valores médios anuais da mão-de-obra por componente da propriedade *São Paulo* em 2011 (homens dia/ano).

Componente	Quantidade	Total
Gado	875	R$43.268,75
Soja	98	R$4.846,10
Teca	159	R$55.977,40
Arroz	-	R$3.410,75
TOTAL		R$59.388,15

Fonte: Autor.

Em Amaury (2015), na Tabela 106, encontram-se os custos por hectare sem considerar a mão-de-obra para os componentes gado, grão e árvore, respectivamente, de R$157,63; R$2.561,83 e R$534,28. Neste trabalho, considerando a Tabela 1, tem-se os custos também com mão-de-obra. Dessa forma, a Tabela 2 apresenta os principais elementos que influenciam nos custos por hectares com gado, soja, árvore e arroz e são, respectivamente, R$1.842,13; R$3.491,98, R$3.815,15 e R$2.052,50.

Tabela 2 – Custos médios anuais totais em reais por componente da propriedade São Paulo em 2011.

Discriminante	Gado	Soja	Teca	Arroz
Custo Variável	21.748,30	4.398,15	12.524,80	3.188,72
Reposição	205.830,00	0,00	0,00	0,00
Comercialização	14.575,46	21.824,00	0,00	941,2
Administração	5.845,64	854,68	1.287,68	213,68
Mão-de-obra	43.268,75	4.846,10	7.862,55	4.035,76
Insumos	3.472,00	77.580,40	8.846,20	8.040,64
TOTAL	294.740,15	109.503,33	30.512,23	16.420,00

Fonte: Adaptado de Amaury (2015).

A informação quanto ao impacto ambiental associado à emissão de metano foi obtida com base na proposta metodológica apresentada em BR Corte (2020), considerando um rebanho de 340 animais com peso médio de 450 kg, apresentando um ganho de peso diário de 950 g, alimentados com 8,87 kg de *Brachiaria brizantha CV Marandu*.

A avaliação do impacto ambiental relacionado ao sequestro de metano foi conduzida utilizando o aplicativo SisILPF-teca, descrito por Oliveira (2021) como um software destinado ao manejo e análise econômica de plantações florestais.

Para a coleta dos dados, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Índice de Sítio: 20,0;
- Densidade (árvores por hectare): 140;
- Porcentagem de sobrevivência (1º ano): 99 %;
- Equação de Sítio: Embrapa;
- Equação de Volume: Embrapa;
- Equação de sortimento: MADI, J.P.S (2017).

Com as informações principais obtidas, seguem a Tabela 3 com os parâmetros e as variáveis necessárias para alimentação do modelo. Aqui, $a_{i,j}$ é o parâmetro, com $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ e $j \in \{1, 2, \cdots, 11\}$ e x_i refere-se as culturas (gado, teca, soja, arroz).

Tabela 3 – Parâmetros e variáveis associadas às operações realizadas na propriedade e incorporadas à na função objetivo para um período de 1 (um) ano.

	Parâmetros Gado	**Valor**
y_1	receita gado a base de suplementação (R$/ha)	7.172,75
y_2	custo com o gado a base de suplementação (R$/ha)	5.326,47
$a1,1$	receita venda do gado (R$/ha)	2.963,55
$a1,2$	custo variável com o gado (R$/ha)	1.422,36
$a1,3$	custo mão-de-obra com gado (R$/ha)	270,43
$a1,4$	custo administração com gado(R$/ha)	36,54
$a1,5$	custo comercialização com o gado (R$/ha)	91,10
$a1,6$	custo óleo diesel aplicado no gado (R$/ha)	4,50
$a1,7$	custo sementes pastagem para o gado (R$/ha)	17,20
$a1,8$	custo NPK usado no pasto (R$/ha)	0,00
$a1,9$	custo calcário usado no pasto (R$/ha)	0,00
$a1,10$	custo KCL usado no pasto (R$/ha)	0,00
$a1,11$	custo FTE BR12 usado no pasto (R$/ha)	0,00
a	capacidade lotação gado (cab/ha)	2,13
b	emissão de metano (kg/ha)	121,86
d	necessidade de soja na suplementação (kg/ha)	1.282
e	necessidade de arroz na suplementação (kg/ha)	1.772
b_1	necessidade mão-de-obra com o gado (hom/ha)	5,47
	Parâmetros teca	**Valor**
y_3	produção teca (m^3/ha)	0,16
$a2,1$	receita venda da teca (R$/ha)	3.554,57
$a2,2$	custo variável com a teca (R$/ha)	84,40
$a2,3$	custo mão-de-obra com a teca (R$/ha)	982,82
$a2,4$	custo administração com a teca (R$/ha)	8,04
$a2,5$	custo comercialização da teca (R$/ha)	0,00
$a2,6$	custo óleo diesel usado no cultivo da teca (R$/ha)	147,00
$a2,7$	custo sementes da teca (R$/ha)	0,00
$a2,8$	custo NPK aplicado na teca (R$/ha)	289,28
$a2,9$	custo calcário aplicado na teca (R$/ha)	7,18
$a2,10$	custo KCL aplicado na teca (R$/ha)	365,75

$a2,11$	custo FTE BR12 aplicado na teca (R$/ha)	37,50
c	capacidade sequestro de metano (kg/ha/ano)	117,05
b_2	necessidade mão-de-obra com a teca (hom/ha)	2
	Parâmetros soja	**Valor**
y_4	produção soja (kg/ha)	2.452
$a3,1$	receita venda da soja (R$/ha)	3.455,63
$a3,2$	custo variável com a soja (R$/ha)	137,44
$a3,3$	custo mão-de-obra com a soja (R$/ha)	151,44
$a3,4$	custo administração com a soja (R$/ha)	26,71
$a3,5$	custo comercialização com a soja (R$/ha)	682,00
$a3,6$	custo óleo diesel usado no cultivo da soja (R$/ha)	158,44
$a3,7$	custo sementes da soja (R$/ha)	1.185,94
$a3,8$	custo NPK aplicado na soja (R$/ha)	517,51
$a3,9$	custo calcário aplicado na soja (R$/ha)	230,00
$a3,10$	custo KCL aplicado na soja (R$/ha)	296,88
$a3,11$	custo FTE BR12 aplicado na soja (R$/ha)	35,63
b_3	necessidade mão-de-obra com a soja (hom/ha)	3,06
	Parâmetros arroz	**Valor**
y_5	produção arroz (kg/ha)	2.686
$a4,1$	receita com a venda do arroz (R$/ha)	1.880,16
$a4,2$	custo variável com o cultivo do arroz (R$/ha)	398,59
$a4,3$	custo mão-de-obra com o arroz (R$/ha)	504,47
$a4,4$	custo administração com o arroz (R$/ha)	26,71
$a4,5$	custo comercialização do arroz (R$/ha)	117,65
$a4,6$	custo óleo diesel aplicado no cultivo do arroz (R$/ha)	147,00
$a4,7$	custo sementes arroz (R$/ha)	103,78
$a4,8$	custo NPK aplicado no arroz (R$/ha)	238,12
$a4,9$	custo calcário aplicado no arroz (R$/ha)	230,00
$a4,10$	custo KCL aplicado no cultivo do arroz (R$/ha)	171,18
$a4,11$	custo FTE BR12 aplicado no arroz (R$/ha)	115,00
b_4	necessidade mão-de-obra com o arroz (hom/ha)	8,63

Fonte: Autor.

Com os parâmetros e variáveis definidas, segue-se com as definições das Funções objetivos e restrições.

2.2 FUNÇÕES OBJETIVOS E RESTRIÇÕES

Nesta seção serão definidas as restrições associadas aos recursos de investimentos, área disponível e compensação de metano e as três funções objetivos.

Quanto as restrições: Seja Ω o conjunto os pontos $(x_1, x_2, x_3, x_4) \in R^4$ que satisfazem, simultaneamente, as restrições ou limitações apresentadas abaixo:

Limitação de recursos:

$$\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=2}^{11} a_{i,j}x_i + \sum_{i=1}^{2} a_i x_i \leq 451.185,76 \quad (1)$$

Limitação de área:

$$\sum_{i=1}^{4} x_i \leq 200 \quad (2)$$

Compensação de metano:

$$-117,05x_2 + 121,88x_1 \leq 0 \quad (3)$$

Restrições de não negatividade:

$$x_i \geq 0, i \in \{1,2,3,4\}. \quad (4)$$

Quanto as funções objetivos:

Problema de maximização: Fator Econômico (associada aos lucro).

$$f_1(x_1,x_2,x_3,x_4) = \sum_{i=1}^{4} a_{i,1}x_i - \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=2}^{11} a_{i,j}x_i - \sum_{i=1}^{2} a_i x_i \quad (5)$$

Problema de maximização: Fator Ambiental (associada às emissões e sequestro de carbono).

$$f_2(x_1,x_2,x_3,x_4) = cx_2 - bx_1 \quad (6)$$

Problema de maximização: Fator Social (associada à disponibilidade de horas para execução do trabalho).

$$f_3(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{i=1}^{4} b_i x_i \tag{7}$$

2.3 MODELO MATEMÁTICO

Para o modelo multiobjetivo e considerando as funções das em (1.1), (1.2) e (1.3) usa-se a seguinte função vetorial, a qual será maximizada:

$$F : \Omega \subset \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}^3, F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x)) \tag{8}$$

De forma sintetizado tem-se:

$$\max_{x \in \Omega} F(x) \tag{9}$$

Esses elementos são necessários para compor o modelo, entretanto, as variáveis, parâmetros e restrições são inajustáveis conforme realidades indi- viduais. Agora é hora de programar o Solver e terá a solução.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da otimização das funções objetivos relacionados ao modelo proposto foram alcançados usando a combinação linear das $f_i's$ ponderada com os pesos w_1, w_2 e w_3, com $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, ou seja, $F(x) = w_1f_1(x) + w_2f_2(x) + w_3f_3(x)$, e estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Canários das soluções associadas aos pesos e dando os valores majorados dos aspectos: econômicos, ambiental e social.

Cenário	Pesos	Solução	Econômico	Ambiental	Social
1	$w_1 = 1$ e $w_2 = w_3 = 0$	$x = (192, 8, 0, 0)$	228.373,44	-22.463,60	1.066,24
2	$w_1 = w_3 = 0$ e $w_2 = 1$	$x = (8, 8, 43, 134)$	0	0	1.346,42
3	$w_1 = w_2 = 0$ e $w_3 = 1$	$x = (10, 8, 32, 150)$	0	-328,17	1.461,57

4	$w_1 = 0,34$, $w_2 = 0,33$ e $w_3 = 0,33$	$x = (192, 8, 0, 0)$	228.373,44	-22.463,60	1.066,24

Fonte: Autor.

Os pesos w_1, w_2 e w_3, indicam a relevância relativa de cada função objetivo f_i na busca pela solução ótima e podem variar dependendo do contexto do problema e dos objetivos específicos da otimização e isso é visto ao analisar os dados da Tabela 4 onde, por exemplo, no Cenário 1 em que $w_1 = 1$ e $w_2 = w_3 = 0$ indica que a importância foi atribuída apenas ao fator econômico em comparação com os fatores ambientais e sociais, mesmo assim, a solução mostra um déficit associado ao fator ambiental e, o mais importante, o valor associado ao fator. Avaliação análoga serve para os Cenários 2 e 3. Assim, ao atribuir valores distintos aos pesos, é possível priorizar um único fator. Isso permite uma análise mais detalhada e focada, ajudando a identificar oportunidades de melhoria ou áreas críticas que precisam de atenção especial, permitindo avaliar o impacto de diferentes estratégias ou políticas em relação a um determinado critério de interesse. No Cenário 4, os pesos foram ajustados para alcançar um equilíbrio entre os benefícios econômicos, ambientais e sociais e, coincidentemente, teve o mesmo resultado do Cenário 1.

Ao considerar a área destinada pelo proprietário da fazenda que foi de 160 hectares para gado, 8 para teca e 32 para soja, verifica-se que ele teve um lucro R$193.564,16, ou seja, valor inferior ao se ele estivesse usado o modelo, e ainda teria evitado o trabalho com a soja, além disso, o modelo indica que ele necessitava usar apenas R$416.620,56 de investimento, inferior ao valor de R$451.185,76.

Esse método reflete a importância relativa de cada critério na solução final já que destaca a importância de cada aspecto (econômico, ambiental e social) na tomada de decisão, razão pela qual ele foi adotado. Portanto, a relevância aqui reside na aplicação de ferramentas matemáticas para calcular a viabilidade de um investimento, exigindo restrições como exemplo, à compensação entre a emissão e o sequestro dos gases de efeito estufa.

Segundo Amaury (2015), os bovinos foram alimentados exclusivamente com pastagem *(Braquiária Brizantha CV Marandu)*. Entretanto, por meio da aplicação da otimização multiobjetivo, foi possível examinar se seria mais vantajoso vender os grãos produzidos ou destiná-los (total ou parcialmente) à alimentação dos animais. Devido à ausência de suplementação alimentar, não foi viável calcular os custos com base nos dados da fazenda. No

entanto, uma análise bibliográfica das culturas de soja e arroz possibilitou uma estimativa das receitas e despesas que seriam incorridas caso a alimentação fosse suplementada.

Segundo Marques (2010), é possível melhorar o desempenho dos animais em termos de ganho de peso por meio de uma suplementação proteica, energética e mineral. Ao considerar as recomendações de Br Corte (2020) e realizar os cálculos necessários, verificou-se que, para alcançar um ganho de peso diário de 1,4 kg por animal, é necessária uma suplementação composta por 1.282 kg de soja e 1.772 kg de arroz por cabeça/ano. Esses dados foram então incorporados ao modelo, e com base nessas informações, concluiu-se que seria mais vantajoso utilizar os grãos na alimentação dos animais, vendendo apenas o excedente. Em outras palavras, para cada 2.452 kg/ha de soja e 2.686 kg/ha de arroz produzidos, recomenda-se utilizar 1.282 kg de soja e 1.772 kg de arroz na alimentação do gado, tornando uma informação importante.

Um aspecto não avaliado, mas potencialmente relevante, é a capacidade de mostrar a melhor distribuição dos gados por hectare usando a suplementação na alimentação, evitando a necessidade de expansão territorial.

Durante o desenvolvimento deste estudo, identificaram-se diversas oportunidades para investigações posteriores e refinamentos nas abordagens adotadas. A seguir, são apresentadas sugestões específicas para ampliar a compreensão do problema em questão e otimizar as estratégias propostas:

- Destaca-se, inicialmente, a importância de considerar a linearidade do problema em questão, no sentido de manter sua solução acessível por meio de softwares de custo e recursos computacionais menos exigentes.
- Expandir análise para incluir outras partes do ecossistema além da teca;
- Explorar outros gases além do metano (CH_4), como o dióxido de carbono (CO_2) e o óxido nitroso (N_2O) para um balanço de carbono mais abrangente.

A pesquisa bibliográfica considerou um trabalho realizado na fazenda *São Paulo*, localizada no município de Iracema-RR de coordenadas geográficas 2°17’33”N 61°14’48”W e altitude de 88 metros, tendo clima segundo Koppen, e Awa, com temperatura média anual de 26,95 °C e precipitações pluviométricas anuais estimadas por interpolação em 2009, 2010 e 2011 foram, respectivamente, de 1.604, 2.288 e 2.282 mm, e o solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico textura médio-argilosa (Amaury, 2015). Os resultados das análises

das amostras de solo da propriedade, nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm estão descritos conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Médias gerais dos nutrientes obtidos por meio da análise de solo, na Fazenda São Paulo, em 2011, utilizadas no estudo da correlação.

Variável	Unidade	0 - 20 cm	20 - 40 cm
pH	-	5,55	5,41
Ca	mmolc dm^{-3}	15,19	11,90
Mg	mmolc dm^{-3}	4,56	3,34
K	mmolc dm^{-3}	2,64	2,02
Al	mmolc dm^{-3}	0,81	0,88
Al+H	mmolc dm^{-3}	19,12	24,62
P	mg dm^{-3}	19,12	5,82
MO	g kg^{-1}	12,66	16,49

Fonte: Amaury (2015).

Por fim, no desenvolvimento desse trabalho foram encontradas várias bibliografias que, além de abordarem apenas o aspecto econômico, ainda consideram os custos fixos, o que é uma armadilha comum na otimização, já que, devido à falta de proporcionalidade, otimizar esses custos é inviável e ainda pode distorcer os resultados e prejudicar a eficácia das estratégias propostas.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que este estudo proporcionou esclarecimentos valiosos para a otimização da produção em sistemas ILPF. A aplicação de ferramentas matemáticas revelou-se fundamental para encontrar soluções que equilibram os aspectos econômicos, ambientais e sociais do sistema. Os resultados destacam a importância de considerar uma abordagem integrada na tomada de decisões, levando em conta, além da melhor distribuição da área, a proporcionalidade entre a emissão e o sequestro de gases de efeito estufa, bem como a relação entre o número de animais por hectare, a suplementação e a produção de grãos. É crucial ressaltar que o modelo desenvolvido neste estudo fornece uma estrutura flexível e adaptável, capaz de lidar com diferentes realidades regionais e particularidades de cada contexto.

Assim, este trabalho determina diretamente as melhores práticas, apresentando uma ferramenta poderosa para avaliar e orientar as decisões dos produtores rurais em busca da

sustentabilidade e eficiência em sistemas ILPF. Uma sugestão para uma nova pesquisa seria voltada para uma abordagem mais sofisticada, onde se poderia avaliar o vetor (w_1, w_2, w_3) como gradiente da função que combina linearmente as três funções f_1, f_2 e f_3, observando como pequenas per- turbações do gradiente em torno de w_i podem modificar a solução e, consequentemente, avaliar o grau de estabilidade.

Considerar que a técnica de otimização depende das características específicas do problema, dos recursos disponíveis e dos objetivos da pesquisa. Esse trabalho apresenta uma abordagem suficiente para atingir os objetivos do estudo de forma eficaz e eficiente, razão pela qual foi escolhida essa abordagem de combinações lineares, e a ferramenta sugerida para solução foi o Solver do Excel, pois assim fica acessível ao homem do campo.

REFERÊNCIAS

ARROYO, Jose Elias Claudio. Heurísticas **e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo**. 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2002.

BASSANEZI, R. C. **Ensino Aprendizagem com Modelagem Matemática:** Uma Nova Estratégia. São Paulo, 2002.

BENDAHAN, A. B. **Système intégré culture - Elevage – Arbre (SILPF) dans l'État du Roraima, Amazonie Brésilienne**. 2015. Tese (Doutorado) - AgroParisTech, Paris.

COELLO, C. A. C. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 1, n. 1, p. 28-36, fev. 2006.

KAGAN, Nelson *et al*. **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2009.

LOBATO, Fran Sérgio. **Otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas de engenharia**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

MARQUES, H.R.; OLIVEIRA, M.C.; CARMO, E.L. Suplementação protéica e energética para bovinos de corte. **PUBVET**, Londrina, v. 4, n. 4, ed. 109, art. 732, 2010.

OLIVEIRA, E. B. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais:** Plantios puros e ILPF. Colombo: Embrapa Florestas, 2021.

REIS, JC *et al*. Sistemas integrados lavoura-pecuária: um uso sustentável da terra alternativa para a produção de alimentos no Cerrado e na Amazônia brasileira. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124580, 2021.

VALADARES FILHO, Sebastião de Campos; LOPES, Sidnei Antônio. Sistema BR-CORTE. **Revista Científica de Produção Animal**, v. 21, n. 2, p. 77–87, 2020. Disponível em: https://periodicos.ufpb.br/index.php/rcpa. Acesso em: 24 maio. 2024.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques For Engineering Design**. Terceira Edição. Colorado Springs, USA: VR&D Inc., 1999.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propõe a utilização de técnicas de otimização multiobjetivo, aplicada à unidade produtiva agropecuária (fazenda), visando o desenvolvimento de modelo de planejamento das atividades agrícolas e pecuárias, e a mensuração dos eventuais ganhos pela integração entre as diferentes culturas.

Nesta investigação, destaca-se a importância da aplicação de ferramentas matemáticas, especialmente a otimização multiobjetivo, para equilibrar os aspectos econômicos, ambientais e sociais dos sistemas ILPF. Essa abordagem permitiu uma visão integrada na tomada de decisões, considerando fatores como a proporção entre emissão e sequestro de gases de efeito estufa e o impacto do número de funcionários nos aspectos financeiros. O estudo ressalta a subutilização da otimização multiobjetivo, apesar da complexidade dos sistemas de integração e da escassez de ferramentas capazes de lidar com metas conflitantes, como aquelas relacionadas à lavoura, pecuária e floresta.

Em resposta, apresenta-se um modelo que fornece uma estrutura flexível e adaptável, capaz de lidar com diferentes realidades regionais e particularidades de cada contexto, com soluções obtidas pelo Solver do Excel. Este modelo matemático, baseado em otimização multiobjetivo, permitiu a distribuição de áreas para diferentes atividades, considerando lucro, impacto social e sustentabilidade ambiental, ajustando as funções objetivos conforme necessário. Embora a pesquisa não determine diretamente as melhores práticas, oferece uma ferramenta para otimizar o desempenho dos sistemas ILPF, representando um avanço no campo e ajudando a evitar armadilhas potenciais.

Esse trabalho, por meio do primeiro artigo um, elenca os principais países, a diversificação das atividades produtivas, as variáveis ambientais, os sistemas de integração mais praticados e as principais ferramentas utilizadas para identificar o fator econômico no sistema de integração e ele atende ao primeiro objetivo específico.

No segundo artigo, apresenta-se um modelo de otimização multiobjetivo acessível, que possa integrar as atividades agrícolas, florestais e pecuárias de forma prática, projetado de maneira a ser compreensível e utilizável por agricultores que não estejam familiarizados com matemática avançada ou linguagem de programação computacional, garantindo sua aplicabilidade e utilidade no contexto agrícola.

Por fim, por meio do último artigo, identifica-se as melhores distribuições das áreas para as combinações de culturas agrícolas, florestais e criação de animais que possam

maximizar a produtividade e a eficiência do sistema integrado, fazendo uso da otimização multiobjetivo e ele atende ao terceiro objetivo específico.

Em um contexto agrícola, variáveis como precipitação, temperatura e preços dos produtos estão sujeitas a flutuações devido a condições climáticas, econômicas e outras influências externas. A pesquisa reconhece a importância de investigar propostas que incorporem incertezas sobre esses parâmetros. Isso é crucial para avaliar a robustez e a confiabilidade das decisões tomadas com base nos modelos, considerando a variabilidade natural e as mudanças imprevistas no ambiente operacional.

Para trabalhos futuros, é recomendável explorar novas propostas e metodologias que abordem efetivamente as limitações identificadas. Isso pode incluir o desenvolvimento de técnicas avançadas de otimização não linear, a aplicação de métodos de análise de sensibilidade mais sofisticados e a utilização de abordagens de modelagem que incorporem incertezas de maneira robusta.

A pesquisa atual enfrentou dificuldades devido à falta de suporte do Solver do Excel para resolver problemas não lineares. Isso representa uma lacuna, pois muitos sistemas agrícolas e ambientais possuem comportamentos não lineares complexos que não podem ser adequadamente representados por modelos lineares simples. Portanto, futuros estudos devem explorar métodos e ferramentas que permitam lidar com problemas não lineares, possibilitando uma modelagem mais precisa e realista.

REFERÊNCIAS

ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo.** 2002. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

BALBINO, l. C. et al. **Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil.** Edição 10. Brasília: EMBRAPA, 2011.

BALBINO, L. et al. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações**.** In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta:** a produção sustentável. Brasília: Embrapa, 2012. 12 - 18 p.

BASSANEZI, R. C. **Ensino Aprendizagem com Modelagem Matemática:** Uma Nova Estratégia**.** São Paulo: Contexto, 2002. 392 p.

BENDAHAN, A. B. **Système intégré culture - Elevage – Arbre (SILPF) dans l'État du Roraima, Amazonie Brésilienne**. 2015. 445 f. Tese (Doutorado em Ciências agronômicas) – Institut Des Sciences Et Technologies, AgroParisTech, Paris, 2015.

COELLO, C. A. C. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, Mexico, v.15, n. 4, p. 28-36. fev. 2006.

COSTA, G. S. FERKO, G. P. S. Uma revisão sobre o uso de ferramentas para avaliar o fator econômico associado ao sistema de integração lavoura, pecuária e floresta. **IOSR Journal of Business and Management**, v. 26, n. 1, p. 16-19, jan. 2024.

CUNHA, R. C. C. **A geoeconomia da cadeia produtiva da soja no Brasil.** 2020. 313 f. Tese, (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade de Santa Catarina, Universidade de Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

DEB, K. et al. **A fast and elitist multiobjective genetic algorithm:** NSGA-II. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/996017 Acesso em: 2 jan. 2024.

GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. (2015). Adoption and development of integrated crop–livestock–forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 199, p. 394-406, 1991.

KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, H. (Org.). **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Blucher, 2009. 228 p.

LOBATO, F. S. **Otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas de engenharia**. 2008. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

PEREIRA, G. W. **Aplicação da técnica de recozimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjetivo**. 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-graduação em Ciências da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

REIS, J. C. et al. Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 2-13, 2021.

SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (Org.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil:** estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos. Brasília: Embrapa, 2019. 379 p.

VANDERPLAATS, G. **Numerical Optimization Techniques For Engineering Design**. Colorado: Spring, 1999. 449 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA, UFRR. **Resolução n° 008/2017 – CEPE que aprova as Normas para Apresentação dos Trabalhos Técnico Científicos da UFRR.** Disponível em: https://ufrr.br/bibliotecas/manual-de-normas-da-ufrr/ Acesso em: 01 jan. 2024.