



DE 14 À 19 DE OUTUBRO DE 2024
DEL 14 AL 19 DE OCTUBRE DE 2024

V SLACTIA

SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA
SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA AGROPECUARIA

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA RURAL APLICADA

MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE SUSTENTABILIDADE DA AGRICULTURA FAMILIAR NO CONTEXTO BRASIL - ARGENTINA

Vinicius Teixeira do Nascimento¹

Angel Sanchez Ramon Delgado²

Sergio Drumond Ventura³

Jose Omar Plevich⁴

RESUMO

O artigo aborda a importância da modelagem matemática e computacional como uma ferramenta crucial para promover a sustentabilidade na agricultura familiar, com ênfase nos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil e na Argentina. Esses sistemas integram atividades agrícolas, pecuárias e florestais, buscando maximizar o uso da terra e mitigar impactos ambientais. A modelagem matemática permite simular cenários de manejo, otimizando o uso de recursos e auxiliando na tomada de decisões estratégicas. No contexto da agricultura familiar, caracterizada por limitações de recursos e vulnerabilidade às mudanças climáticas, essa abordagem é particularmente relevante. O artigo destaca também os desafios enfrentados, como a falta de conectividade em áreas rurais, que limita o acesso às tecnologias necessárias para a implementação plena dessas práticas. Além disso, a modelagem computacional ajuda a prever impactos ambientais e econômicos, permitindo que os agricultores ajustem suas práticas para garantir a sustentabilidade de suas atividades. A integração dessa modelagem com políticas públicas, como o Plano ABC+, pode facilitar o acesso a essas tecnologias e promover o desenvolvimento rural sustentável. A modelagem matemática se apresenta como uma ferramenta poderosa para transformar a agricultura familiar, tornando-a mais resiliente, produtiva e ambientalmente responsável.

Palavras Chaves: Desenvolvimento Rural, Sistemas Agropecuários, Conservação Ambiental, Uso Eficiente de Recursos, Mudanças Climáticas.

¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação Em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária; UFRRJ; vinicius.nascimento@ufrj.br

² Professor do Programa de Pós-Graduação Em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária; UFRRJ; asanchez@ufrj.br

³ Professor do Departamento de Matemática; UFRRJ; ventura@ufrj.br

⁴ Professor do Departamento de Produção Vegetal; UNRC; oplevich@gmail.com

Mathematical and Computational Modeling as a sustainability tool for family farming in the Brazil - Argentina context

ABSTRACT

The article addresses the importance of mathematical and computational modeling as a crucial tool for promoting sustainability in family farming, with an emphasis on Crop-Livestock-Forest Integration systems in Brazil and Argentina. These systems integrate agricultural, livestock and forestry activities, seeking to maximize land use and mitigate environmental impacts. Mathematical modeling allows you to simulate management scenarios, optimizing the use of resources and helping to make strategic decisions. In the context of family farming, characterized by resource limitations and vulnerability to climate change, this approach is particularly relevant. The article also highlights the challenges faced, such as the lack of connectivity in rural areas, which limits access to the technologies necessary to fully implement these practices. Additionally, computer modeling helps predict environmental and economic impacts, allowing farmers to adjust their practices to ensure the sustainability of their activities. The integration of this modeling with public policies, such as the ABC+ Plan, can facilitate access to these technologies and promote sustainable rural development. Mathematical modeling presents itself as a powerful tool for transforming family farming, making it more resilient, productive and environmentally responsible.

Keywords: Rural Development, Agricultural Systems, Environmental Conservation, Efficient Use of Resources, Climate Change.

Modelación Matemática y Computacional como herramienta de sostenibilidad para la agricultura familiar en el contexto Brasil – Argentina

RESUMEN

El artículo aborda la importancia de la modelación matemática y computacional como herramienta crucial para promover la sostenibilidad en la agricultura familiar, con énfasis en los sistemas de Integración Cultivos-Ganadería-Bosques en Brasil y Argentina. Estos sistemas integran actividades agrícolas, ganaderas y forestales, buscando maximizar el uso del suelo y mitigar los impactos ambientales. El modelado matemático permite simular escenarios de gestión, optimizando el uso de recursos y ayudando a tomar decisiones estratégicas. En el contexto de la agricultura familiar, caracterizada por limitaciones de recursos y vulnerabilidad al cambio climático, este enfoque es particularmente relevante. El artículo también destaca los desafíos enfrentados, como la falta de conectividad en las zonas rurales, que limita el acceso a las tecnologías necesarias para implementar plenamente estas prácticas. Además, los modelos informáticos ayudan a predecir los impactos ambientales y económicos, lo que permite a los agricultores ajustar sus prácticas para garantizar la sostenibilidad de sus actividades. La integración de esta modelización con políticas públicas, como el Plan ABC+, puede facilitar el acceso a estas tecnologías y promover el desarrollo rural sostenible. La modelización matemática se presenta como una poderosa herramienta para transformar la agricultura familiar, haciéndola más resiliente, productiva y ambientalmente responsable.

Palabras clave: Desarrollo Rural, Sistemas Agropecuarios, Conservación Ambiental, Uso Eficiente de Recursos, Cambio Climático.

INTRODUÇÃO

A agricultura familiar desempenha um papel central na sustentabilidade ambiental, econômica e social em muitos países, especialmente no Brasil e na Argentina. Esses países, ricos em recursos naturais e diversidade agrícola, encontram na agricultura familiar um pilar fundamental para a segurança alimentar, a preservação ambiental e o desenvolvimento rural. No entanto, os desafios enfrentados por esses pequenos produtores são numerosos, incluindo o acesso limitado a tecnologias avançadas, mercados, crédito, e políticas públicas que muitas vezes não conseguem abordar suas necessidades específicas de forma eficaz. Nesse contexto, a modelagem matemática e computacional emerge como uma ferramenta poderosa para enfrentar esses desafios, oferecendo soluções inovadoras e acessíveis que podem aumentar a produtividade e a sustentabilidade da agricultura familiar.

O uso de ferramentas matemáticas e computacionais na agricultura não é um fenômeno novo, no entanto, a sua aplicação específica à agricultura familiar é uma área de estudo que vem ganhando relevância nas últimas décadas. Tradicionalmente, a modelagem matemática foi amplamente utilizada em grandes empreendimentos agrícolas para otimização de recursos, previsão de safras e gestão de riscos. Com os avanços tecnológicos e a democratização do acesso a ferramentas computacionais, essas mesmas técnicas estão se tornando acessíveis a pequenos agricultores. Além disso, a modelagem matemática oferece a possibilidade de simular cenários e tomar decisões informadas com base em dados concretos, o que é particularmente útil em contextos de incerteza climática e econômica, tão comuns no Brasil e na Argentina.

A sustentabilidade da agricultura familiar, no entanto, não depende apenas de aumentar a produtividade, é necessário considerar um equilíbrio entre os fatores econômicos, sociais e ambientais. Em muitos casos, as práticas agrícolas que maximizam os lucros a curto prazo podem ter impactos negativos a longo prazo sobre o solo, a biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas. Portanto, a modelagem matemática deve ser utilizada de forma integrada, levando em consideração não apenas a produção, mas também a conservação de recursos naturais, a redução de emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da qualidade de vida das comunidades rurais. Nesse sentido, a modelagem pode ajudar a encontrar soluções equilibradas que considerem todas essas variáveis, permitindo que os agricultores familiares adotem práticas mais sustentáveis.

No Brasil, a agricultura familiar representa aproximadamente 77% dos estabelecimentos agrícolas, segundo o Censo Agropecuário de 2017 em IBGE (2017), contribuindo significativamente para a produção de alimentos básicos como feijão, mandioca e

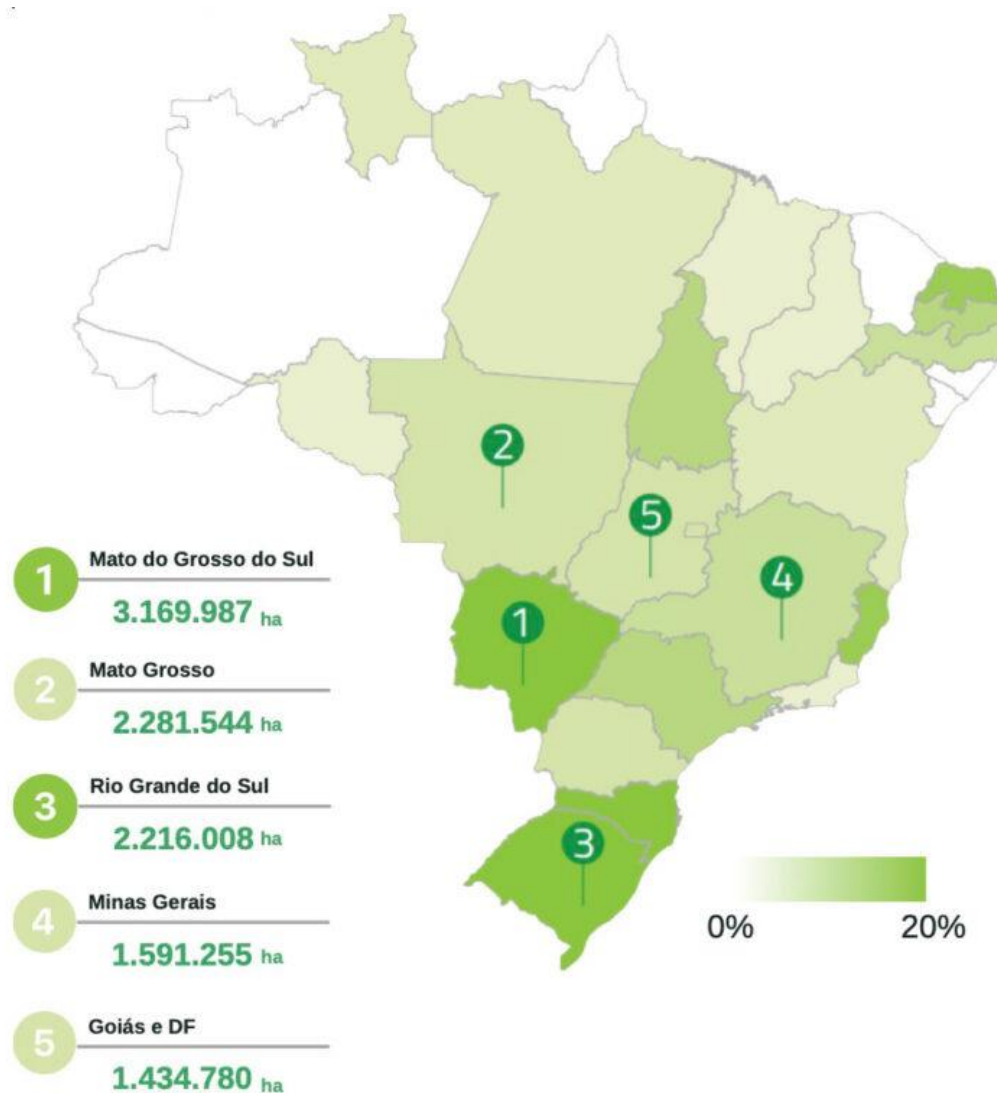
leite. Na Argentina, embora o modelo agrícola seja dominado por grandes propriedades voltadas para a exportação de commodities, a agricultura familiar também desempenha um papel importante, especialmente na produção de frutas, hortaliças e produtos agroecológicos. Ambos os países compartilham desafios semelhantes, como o acesso limitado a crédito, assistência técnica e mercados justos. Além disso, enfrentam pressões ambientais significativas, como desmatamento, erosão do solo e mudanças climáticas, que ameaçam a viabilidade da agricultura familiar a longo prazo.

É importante destacar que a modelagem matemática e computacional, para ser eficaz, precisa ser adaptada ao contexto local. No Brasil e na Argentina, as condições climáticas, os tipos de solo, as culturas predominantes e as práticas agrícolas variam amplamente de uma região para outra. Portanto, os modelos devem ser flexíveis o suficiente para incorporar essas variáveis locais e serem ajustados conforme necessário. Além disso, é fundamental que os agricultores familiares tenham acesso a essas ferramentas e saibam como utilizá-las, a capacitação técnica e o apoio contínuo são essenciais para garantir que a modelagem matemática e computacional realmente se traduza em benefícios concretos para os agricultores.

Visto isso, segundo Bungenstab (2012), um jeito muito eficiente de implementar essa modelagem é através da modelagem matemática e computacional aplicada dos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). O ILPF integra de forma sinérgica atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área, visando maximizar o uso da terra, aumentar a produtividade e mitigar os impactos ambientais, como a degradação do solo e as emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a implementação eficaz desses sistemas requer uma compreensão profunda das interações dinâmicas entre os diferentes componentes,

A Rede ILPF (2021), salienta sobre o Brasil e a Argentina, países com vastas extensões de terras agrícolas e uma forte dependência da agricultura e da pecuária, o ILPF tem sido promovido como uma estratégia promissora para enfrentar os desafios da intensificação sustentável. No entanto, as condições ambientais, como o clima e o solo, variam significativamente entre as regiões, exigindo abordagens adaptadas. Se analisarmos a safra 2015/2016 e safra 2020/202, houve um aumento estimado de 52% na área de ILPF no Brasil, na primeira tínhamos 11,5 milhões de hectares adotando essa prática, já na segunda temos 17,43 milhões de hectares dotando o ILPF. Na figura a seguir podemos observar os estados com maior área destinado ao ILPF no Brasil e também a intensidade de adoção do ILPF em cada estado, segundo a intensidade da cor verde, esta intensidade que pode variar de 0 a 20% do número todas de hectares disponíveis para a produção rural no estado, ainda importante salientar a presença do ILPF em todos os biomas brasileiros.

Figura 1- Mapa de Adoção de ILPF



Fonte: Rede ILPF, 2021

Zanasi (2019), afirma que na Argentina o ILPF tem ganhado importância nos últimos anos, especialmente nas regiões agrícolas das Pampas e no Norte do país. Nos Pampas, onde a agricultura intensiva predomina, o ILPF é visto como uma solução sustentável para a degradação do solo, permitindo uma rotação equilibrada entre cultivos e pastagens. No Norte da Argentina, em áreas mais áridas e com solos pobres, o ILPF tem sido adotado como uma estratégia para aumentar a produtividade e resiliência das fazendas, integrando árvores para proteção contra ventos e melhorar a retenção de água.

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta é dividida em quatro principais modalidades de interações entre as atividades associadas: rotacionada, onde cultivos e pastagens se alternam ao longo do tempo em uma mesma área; consorciada, que integra a produção de lavouras, pecuária e florestas simultaneamente na mesma área; sequencial, onde o uso da terra é dividido

entre as atividades ao longo do ano agrícola; e agrossilvipastoril, que combina árvores, pastagem e gado em uma única área, promovendo benefícios ambientais e produtivos. Ainda é importante saber que nem sempre é preciso ter todas as três atividades interagindo em uma mesma propriedade, duas das atividades já é considera um ILPF, ou seja, além da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Agrossilvipastoril podemos ter também: Integração Lavoura-Pecuária (ILP) ou agropastoril; Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril; Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Silviagrícola. No Brasil, o amplamente utilizado pela enorme maioria dos produtores é a integração lavoura-pecuária com 83% do total de área, e os ainda com tímida otimização integração lavoura-pecuária-floresta (9%), integração pecuária-floresta (7%) e integração lavoura-floresta (1%).

DESENVOLVIMENTO

Nascimento (2020), expõe que associação entre modelagem matemática e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) pode ser crucial para o sucesso da agricultura familiar, ao permitir uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos. A modelagem matemática oferece ferramentas para simular diferentes cenários de produção, otimizando o uso do solo, água e insumos, ao mesmo tempo em que minimiza os riscos associados a fatores climáticos e de mercado. Com isso, agricultores familiares podem tomar decisões mais embasadas, ajustando o sistema ILPF às suas condições específicas. Além disso, a modelagem auxilia na avaliação dos impactos econômicos e ambientais das práticas adotadas, permitindo o planejamento de longo prazo e garantindo a viabilidade econômica e a sustentabilidade do sistema produtivo. Assim, a integração entre modelagem matemática e ILPF pode transformar a agricultura familiar em uma atividade mais resiliente e produtiva, promovendo a conservação ambiental e o desenvolvimento rural sustentável.

A modelagem matemática de sistemas de ILPF é uma abordagem que utiliza equações matemáticas e algoritmos para representar e analisar a dinâmica e as interações entre os componentes agrícolas, pecuários e/ou florestais. Este tipo de modelagem permite simular cenários diversos, considerando variáveis como produtividade, sustentabilidade ambiental, uso de recursos e impactos econômicos. Geralmente com o objetivo de otimizar a alocação de recursos, prever o desempenho sob diferentes condições climáticas e de manejo, e minimizar os riscos e custos envolvidos, auxiliando na tomada de decisões estratégicas. Esse processo envolve o uso de modelos dinâmicos, estatísticos e computacionais que podem integrar dados

históricos, previsões climáticas e parâmetros biofísicos, criando uma ferramenta robusta para o planejamento agrícola sustentável.

Almeida (2015), traz que a modelagem de sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (ILPF) requer o uso de métodos matemáticos e computacionais sofisticados, capazes de capturar as complexas interações entre os componentes bióticos e abióticos que compõem esses sistemas. Dentre os métodos matemáticos mais comumente empregados, destacam-se as equações diferenciais ordinárias (EDOs) e parciais (EDPs), que são utilizadas para descrever a dinâmica temporal e espacial de processos como o crescimento de plantas, a evolução de populações animais, e o fluxo de nutrientes e água no solo. Essas equações permitem modelar o comportamento contínuo de variáveis críticas no sistema ILPF, sendo adequadas para representar fenômenos de natureza biofísica. Além disso, a modelagem estocástica é frequentemente aplicada para incorporar a variabilidade e a incerteza associadas a fatores externos, como condições climáticas e variabilidade biológica. Métodos estocásticos, como cadeias de Markov e simulações de Monte Carlo, possibilitam a inclusão de eventos aleatórios e suas probabilidades, conferindo maior realismo às previsões. Para resolver problemas de otimização dentro do sistema ILPF, métodos como a programação linear, não linear e dinâmica são essenciais, permitindo identificar estratégias de manejo que maximizem a produtividade e a sustentabilidade de forma simultânea.

Segundo Martinez (2001), o ponto de vista computacional, técnicas de simulação dinâmica, por meio de softwares como SIMILE e STELLA, são amplamente utilizadas para explorar o comportamento temporal do sistema ILPF sob diferentes condições de manejo. Adicionalmente, algoritmos genéticos e técnicas de inteligência artificial (IA), como redes neurais artificiais, têm ganhado destaque na otimização de cenários de manejo e na predição de padrões complexos dentro do sistema. Esses métodos computacionais oferecem a possibilidade de testar múltiplos cenários e gerar soluções otimizadas para desafios específicos, como a alocação eficiente de recursos e o aumento da resiliência do sistema. Outro aspecto importante da modelagem de sistemas ILPF é a calibração e validação dos modelos, processos que envolvem técnicas computacionais como a análise de sensibilidade e a calibração automática de parâmetros, garantindo que os modelos matemáticos correspondam à realidade observada. Além disso, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) integra dados espaciais no modelo, permitindo uma abordagem espacialmente explícita, fundamental para representar a variabilidade geográfica dos fatores que influenciam o desempenho dos sistemas ILPF.

A combinação de métodos matemáticos e computacionais avançados permite uma modelagem precisa e integrada desses sistemas complexos, contribuindo para o

desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e resilientes. Esta interação está presente geralmente através de alguns softwares como: O STELLA é uma ferramenta de modelagem dinâmica que permite simular sistemas complexos com múltiplas interações; O SIMILE é uma plataforma de modelagem dinâmica projetada para lidar com sistemas ecológicos e agrícolas complexos; MATLAB, R e Python são linguagens de programação amplamente utilizadas para modelagem estatística e computacional, especialmente para análise de dados e desenvolvimento de modelos personalizados e aplicação de método matemático e simulações computacionais.

Artuzo (2017) afirma que o passo importante para testar o modelo é a simulação computacional das modelagens matemáticas do sistema ILPF, sendo uma ferramenta essencial para a compreensão e predição dos complexos processos envolvidos nesses sistemas multifuncionais, através da aplicação de algoritmos computacionais e métodos numéricos, é possível simular interações dinâmicas entre diferentes componentes, como o crescimento das culturas, a produtividade animal e o desenvolvimento florestal, em resposta a variáveis ambientais e de manejo, essa abordagem permite a análise de cenários a longo prazo. A precisão e a robustez dos resultados dependem da qualidade dos dados de entrada e da capacidade dos modelos em representar a realidade de maneira adequada, o que demanda contínuo aprimoramento nas técnicas de modelagem e validação com dados experimentais.

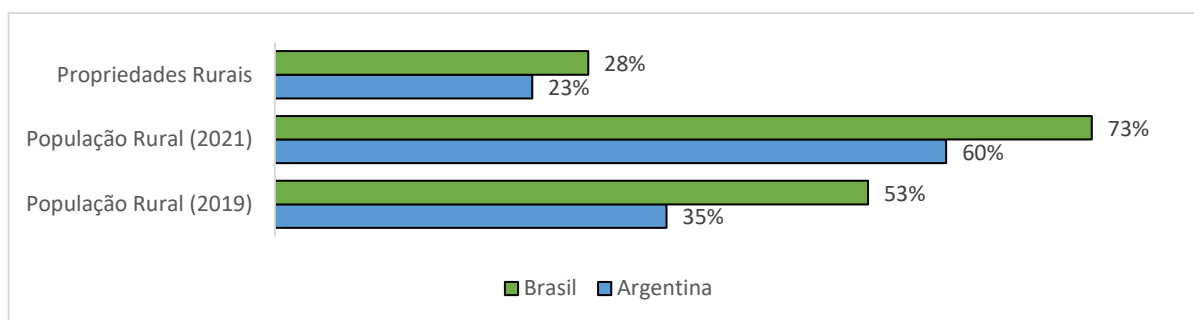
Porém para essa realidade temos um grande problema, a falta de acesso à internet nas propriedades rurais do Brasil e da Argentina representa um obstáculo significativo para o desenvolvimento do setor agropecuário em ambos os países. Em áreas rurais, a conectividade é essencial para a adoção de tecnologias avançadas, como a agricultura de precisão, a automação de máquinas e o uso de sensores para monitoramento ambiental. Sem acesso à internet, agricultores e pecuaristas enfrentam dificuldades para implementar sistemas modernos de gestão agrícola, obter informações em tempo real sobre clima e mercado, e se integrar a cadeias produtivas mais eficientes. Além disso, a ausência de conectividade limita o acesso à educação, capacitação técnica e assistência remota, fatores essenciais para aumentar a produtividade e a sustentabilidade das atividades rurais. Essa lacuna digital contribui para ampliar as desigualdades entre áreas urbanas e rurais, retardando o progresso tecnológico e econômico no campo, especialmente em grandes territórios agrícolas, como os encontrados no Brasil e na Argentina.

Com base em um trabalho realizado pelo Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária (INTA) na Argentina no início de 2021, foram obtidas informações sobre 311 localidades rurais pertencentes a 21 províncias. Na pesquisa foi registrado que mais de 40% dos

indivíduos não tinham conexão com a Internet. Para reduzir essa iniquidade, a agência realizou diversos projetos que buscavam melhorar e ampliar a cobertura dos serviços. Articulando, assim, diferentes administrações estaduais, áreas governamentais e instituições locais com o objetivo de promover políticas públicas que aumentem o acesso à Internet.

Dados obtidos através do Instituto Nacional de Estatística e Censos da Argentina (INDEC) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelam como organizados na figura a seguir que, apenas 23% das propriedades rurais na Argentina, tem conectividade com a internet, quanto no Brasil são 28%. Ainda podemos observar que 73% da população brasileira rural tem acesso a internet, enquanto 60% da argentina. Mas se compararmos aos dados da população rural com acesso a internet em 2019, podemos observar um aumento de 20% e 25%, entre Brasil e Argentina, respectivamente. Esse rápido aumento entre a população rural com acesso à internet e a chegada de outras tecnologias como Starlink, nos dá esperança que a quantidade de propriedades rurais conectadas dispare nos próximos anos.

Figura 2- Conectividade à Internet da população Rural



Fonte: Desenvolvido pelo Autor

Esta conectividade da propriedade rural a internet é um requisito para a implementação do processo de melhoria baseado na modelagem matemática e computacional, primeiramente para o pequeno proprietário ter acesso aos profissionais capacitados de computação/matemática que geralmente estão localizados em grandes centros urbanos, além de cursos e suporte para implementação e manutenção do sistema. Outro ponto que necessita de acesso à internet é o processamento dos dados, resolução dos modelos e realização das simulações numéricas, devido a serem modelo complexos, estes exigem grande capacidade computacional de processamento, que geralmente só encontramos em servidores, sendo estes extremamente difíceis de serem implementados em pequenas propriedades pelo seu alto custo de instalação e manutenção, utilizando servires online e compartilhados esses custos são também compartilhados resultando em um custo muitas vezes menor.

Ainda temos que citar, a nova agricultura que vem se apresentando, que gera dados que pode alimentar os modelos em propriedades conectadas. A agricultura 4.0 representa uma

nova revolução no setor agrícola, marcada pela integração de tecnologias digitais avançadas, como inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), big data e automação. Essas inovações permitem o monitoramento em tempo real de lavouras, animais e condições ambientais, facilitando a tomada de decisões mais precisas e eficientes. O uso de sensores, drones e sistemas de mapeamento por satélite, por exemplo, possibilita o manejo otimizado de recursos como água, fertilizantes e defensivos, reduzindo custos e impactos ambientais. Além disso, a agricultura 4.0 melhora a produtividade e a sustentabilidade, ao mesmo tempo em que contribui para a segurança alimentar global, ao aumentar a resiliência das operações agrícolas em face de mudanças climáticas e flutuações de mercado. No entanto, sua implementação ainda enfrenta desafios, como o acesso à conectividade nas áreas rurais e o alto custo de adoção inicial para pequenos e médios agricultores.

No futuro, a agricultura 4.0, com a agricultura 4.0, grandes volumes de dados podem ser gerados em tempo real a partir de sensores de solo, clima e biomassa, alimentando modelos matemáticos que simulam a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas ILPF. Ferramentas como equações diferenciais e algoritmos de otimização permitirão ajustar em tempo real práticas de manejo para maximizar a eficiência do uso de recursos, como água e nutrientes, além de prever os impactos de diferentes cenários climáticos e de mercado, indicando a melhor decisão a ser tomada pelo produtor, com por exemplo qual cultura plantar, o quanto a plantação deve ser irrigada, entre outros.

Harfuh (2022), afirma que ainda temos um fator a mais para pequeno e médio produtor adotar o ILPF, o Plano ABC e o ABC+ são iniciativas do Ministério da Agricultura e Pecuária do Brasil que visam promover práticas agrícolas sustentáveis e a melhoria da produtividade no setor agropecuário. O Plano ABC, implementado em 2010, introduziu um conjunto de diretrizes para a agricultura de baixo carbono, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a recuperação de áreas degradadas, a integração lavoura-pecuária-floresta e o uso eficiente de recursos naturais. Em 2020, o Plano ABC+ foi lançado como uma atualização e ampliação do plano original, incorporando novas metas e ações para fortalecer ainda mais o compromisso com a sustentabilidade. O ABC+ enfatiza a adoção de tecnologias mais avançadas e práticas inovadoras, ampliando o escopo de ação para incluir novos desafios e oportunidades no contexto das mudanças climáticas e da segurança alimentar. Ambos os planos refletem a estratégia do governo brasileiro de alavancar a sustentabilidade ambiental enquanto promove o desenvolvimento econômico do setor agrícola, alinhando-se com compromissos internacionais e nacionais para a redução das emissões e a proteção dos recursos naturais. Com isso muitos proprietários rurais estão implantando o ILPF em suas fazendas, visto que é um dos jeitos de se

adequar as exigências e conseguir os financiamentos referentes aos planos. Estes recorrem também a modelagem matemática e computacional, na hora que implementação e manutenção de modelos ILPF visando a diminuição de risco nesse processo, sendo importante lembrar que o processo de implementação de ILPF não é nada trivial, requerendo profissionais habilitados, muitas vezes também são feitas simulações buscando atrair o proprietário rural, que geralmente se sente entusiasmado pela possibilidade do aumento do lucro líquido da propriedade, que muitas das vezes é feita apenas com a adição de mas uma atividade a propriedade, o que diversifica a ponte de receita, não deixando produtor dependente da única atividade.

Oliveira (2016), diz que a associação entre a modelagem matemática e o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) surge como uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar. Ao otimizar o uso de recursos e prever cenários produtivos, essa abordagem não apenas promove uma gestão mais eficiente e resiliente das propriedades rurais, como também integra avanços tecnológicos fundamentais para a modernização do setor. No entanto, a falta de conectividade em áreas rurais representa um desafio significativo para a implementação plena dessas tecnologias, limitando o acesso a dados, especialistas e infraestrutura computacional de alto desempenho. A superação desse obstáculo, aliada ao avanço de políticas públicas como o Plano ABC+, poderá viabilizar a expansão do ILPF e consolidar a agricultura 4.0 como uma realidade acessível para pequenos e médios produtores.

CONCLUSÕES

A modelagem matemática e computacional representa um avanço significativo na promoção da sustentabilidade da agricultura familiar no Brasil e na Argentina, oferecendo ferramentas capazes de lidar com a complexidade e os desafios específicos desse setor. Esse segmento enfrenta desafios como a limitação de recursos, a vulnerabilidade às mudanças climáticas e o acesso desigual a tecnologias e mercados. Nesse contexto, a modelagem matemática e computacional emerge como uma solução promissora, capacitando os agricultores familiares a tomar decisões mais precisas e informadas, melhorar a eficiência dos sistemas produtivos e adotar práticas sustentáveis.

Um dos principais benefícios da modelagem matemática na agricultura familiar é a capacidade de simular cenários e prever resultados com base em dados concretos. Em sistemas agrícolas complexos, como os praticados por agricultores familiares, a interação entre diferentes fatores, como condições climáticas, características do solo, rotação de culturas e

manejo de recursos, pode ser difícil de prever sem ferramentas adequadas. A modelagem permite integrar essas variáveis em um sistema dinâmico, oferecendo simulações que podem ajudar os agricultores a otimizar o uso de insumos, como água e fertilizantes, escolher as melhores práticas de manejo e maximizar a produtividade de forma sustentável. Além disso, esses modelos permitem prever o impacto de práticas agrícolas sobre o meio ambiente, como a emissão de gases de efeito estufa e a conservação da biodiversidade, facilitando a adoção de estratégias que minimizem os danos ambientais.

No contexto das mudanças climáticas, a modelagem matemática torna-se ainda mais crucial. A agricultura familiar, especialmente no Brasil e na Argentina, é particularmente vulnerável às variações climáticas, como secas, inundações e mudanças na estação de crescimento. A modelagem computacional permite prever como essas mudanças podem impactar as colheitas e a produtividade, permitindo que os agricultores se adaptem com antecedência. Por exemplo, simulações climáticas podem ajudar a determinar as culturas mais resilientes para plantar em determinadas regiões ou a ajustar o calendário de plantio para otimizar as condições de crescimento. Essas ferramentas, quando aliadas a políticas de suporte e capacitação, podem aumentar a resiliência dos sistemas de agricultura familiar, ajudando os agricultores a mitigar riscos e a garantir a continuidade de sua produção.

Outro aspecto relevante é o potencial da modelagem matemática para integrar aspectos econômicos, sociais e ambientais, promovendo uma visão holística da sustentabilidade na agricultura familiar. Tradicionalmente, o foco da modelagem em sistemas agrícolas estava na maximização da produtividade ou do lucro. No entanto, no contexto da agricultura familiar, é essencial que esses modelos também considerem os impactos sociais e ambientais. Modelos mais avançados podem incorporar variáveis como o acesso a mercados, a qualidade de vida das comunidades rurais e a preservação dos recursos naturais. Isso permite que os agricultores tomem decisões que não apenas maximizem a produção, mas também promovam o desenvolvimento sustentável a longo prazo, equilibrando as necessidades econômicas com a proteção do meio ambiente e o bem-estar social.

A aplicação de modelagem matemática e computacional na agricultura familiar, no entanto, não está isenta de desafios. Um dos principais obstáculos é o acesso a essas tecnologias por parte dos pequenos agricultores. Embora as ferramentas de modelagem tenham se tornado mais acessíveis nos últimos anos, ainda há uma lacuna significativa em termos de capacitação técnica e suporte. Muitos agricultores familiares não possuem o conhecimento necessário para utilizar esses modelos de forma eficaz, ou enfrentam dificuldades no acesso a equipamentos e softwares adequados. Além disso, a falta de infraestrutura digital em áreas rurais pode limitar

o uso dessas tecnologias. Para superar esses desafios, é fundamental que haja investimentos em capacitação e extensão rural, além de políticas públicas que promovam o acesso equitativo às tecnologias digitais no campo.

Ademais, a modelagem matemática e computacional deve ser adaptada ao contexto local para ser eficaz. No Brasil e na Argentina, as condições ambientais, as práticas agrícolas e as culturas predominantes variam amplamente de uma região para outra. Portanto, os modelos devem ser flexíveis o suficiente para incorporar essas variações e serem ajustados conforme necessário. Isso requer uma abordagem participativa, onde os agricultores familiares sejam envolvidos no processo de desenvolvimento e adaptação dos modelos, garantindo que as ferramentas reflitam suas realidades e necessidades específicas.

Outro ponto relevante é a integração da modelagem com políticas públicas voltadas para a agricultura familiar. Modelos matemáticos podem fornecer informações valiosas para a formulação de políticas, ajudando a identificar as intervenções mais eficazes para apoiar os pequenos agricultores e promover práticas sustentáveis. Por exemplo, a modelagem pode ser utilizada para avaliar o impacto de diferentes subsídios ou incentivos fiscais sobre a adoção de tecnologias sustentáveis, ou para prever como mudanças nas políticas comerciais podem afetar os mercados agrícolas locais. Ao integrar a modelagem matemática no processo de formulação de políticas, os governos podem tomar decisões mais informadas e baseadas em evidências, garantindo que as políticas públicas sejam alinhadas com os objetivos de sustentabilidade da agricultura familiar.

A modelagem matemática e computacional se apresenta como uma ferramenta poderosa para promover a sustentabilidade da agricultura familiar no Brasil e na Argentina. Ao permitir uma análise integrada dos aspectos econômicos, ambientais e sociais, essas ferramentas podem ajudar a transformar a agricultura familiar em uma atividade mais eficiente, resiliente e sustentável. No entanto, para que seu potencial seja plenamente realizado, é necessário enfrentar os desafios de acesso, capacitação e adaptação ao contexto local. Com o apoio adequado, a modelagem matemática pode desempenhar um papel central na construção de um futuro mais sustentável para a agricultura familiar, contribuindo para a segurança alimentar, a preservação dos recursos naturais e o desenvolvimento rural em toda a região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. M. W.; SILVA, H. C. **A matematização em atividades de modelagem matemática**. Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia, v. 8, n. 3, p. 207-227, 2015.

ARTUZO, F. D., FOGUESATTO, C. R.; SILVA, L. X., Agricultura de precisão: inovação para a produção mundial de alimentos e otimização de insumos agrícolas. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 13, n. 29, p. 146-161, 2017.

BUNGENSTAB, D. J. **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

HARFUCH, L. **ABC+ 2020-2030: o que esperar para o próximo decênio?**. AgroANALYSIS, v. 42(5), p. 26-27, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Síntese de Indicadores Sociais – Uma análise das condições de vida da população brasileira 2021**. Disponível: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101892.pdf>. Acesso em 03 de set. de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**. Resultados Definitivos. 2017a. Disponível: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em 02 de set. de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSOS (INDEC). **Acceso y uso de tecnologías de la información y la comunicación**. Disponível: https://www.indec.gob.ar/uploads/informesdeprensa/mautic_05_24F87CFE2258.pdf. Acesso em 05 de set. de 2024.

MARTINEZ, J. M., SANTOS, S. A., **Métodos computacionais de otimização**. Colóquio Brasileiro de Matemática, Apostilas, v. 20, 1995.

NASCIMENTO, V. T., DELGADO, A. R. S., VENTURA, S. D. **A modelagem como ferramenta de sustentabilidade na integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 3, p. 12943-12954, 2020.

OLIVEIRA, S. A. **Percepção de pequenos e médios produtores rurais sobre a tecnologia Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) no município de Ipameri-GO**. Dissertação do Mestrado Profissional Ambiente, Saúde e Sustentabilidade. Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. 2016.

REDE ILPF. **ILPF em números**. 2021. Disponível: <https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/>
Acesso em 03 de set. de 2024.

ZANASI, C. **Conceitos, ferramentas e iniciativas para agricultura sustentável**. ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília, DF: Embrapa. EMBRAPA, p. 59-69, 2019