Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.02, 2025
ISSN 2178-6925

A QUÍMICA VERDE APLICADA À AGRONOMIA NA PRODUÇÃO DE INSUMOS AGRÍCOLAS SUSTENTÁVEIS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

GREEN CHEMISTRY APPLIED TO AGRONOMY IN THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE AGRICULTURAL INPUTS: A LITERATURE REVIEW.

Artemio Bezerra de Mira

Graduando em Licenciatura em Química; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Rondônia.

E-mail: artemiomira10@gmail.com

Acácio Bezerra de Mira

Doutor em Agronomia; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia.

E-mail: acacio.mira@ifro.edu.br

Resumo

O artigo aborda o dilema da agricultura moderna entre atender à crescente demanda global por alimentos e minimizar os impactos ambientais associados às práticas agrícolas convencionais. Projeta-se que a população mundial alcance 10 bilhões de pessoas até 2050, pressionando o setor agrícola a adotar práticas intensivas que, embora aumentem a produtividade, causam degradação do solo, contaminação hídrica, perda de biodiversidade e emissão de gases de efeito estufa. Esses problemas agravam-se pelo uso excessivo de fertilizantes químicos e pesticidas, que contribuem para processos como a eutrofização e a intensificação das mudanças climáticas. Como resposta, o texto propõe a aplicação dos princípios da Química Verde, que visam reduzir a geração de resíduos, substituir substâncias tóxicas e aumentar a eficiência no uso de recursos naturais. Tecnologias emergentes, como fertilizantes de liberação controlada, nanopesticidas e biofertilizantes, são destacadas como alternativas promissoras para mitigar os impactos ambientais sem comprometer a produtividade. A nanotecnologia oferece soluções para a eficiência no uso de insumos e para a remediação de áreas degradadas, enquanto a biotecnologia permite o desenvolvimento de culturas mais resilientes e sustentáveis. Além disso, o texto explora o conceito de economia circular como estratégia para transformar o setor agrícola. Práticas como a reutilização de resíduos orgânicos, a produção de bioenergia e a integração de sistemas agroflorestais são citadas como meios de reduzir desperdícios, aumentar a eficiência produtiva e promover a sustentabilidade. Conclui-se que a integração entre ciência, políticas públicas e mudanças culturais é essencial para promover uma agricultura sustentável, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esse modelo agrícola busca atender às demandas alimentares globais, reduzir os impactos ambientais e garantir a preservação dos recursos naturais para as gerações futuras.

Palavras-chave: Química Verde; Agricultura sustentável; Impactos ambientais.

Abstract

The article addresses the dilemma of modern agriculture: balancing the growing global demand for food with minimizing the environmental impacts associated with conventional farming practices. It is projected that the global population will reach 10 billion by 2050, putting pressure on the agricultural sector to adopt intensive practices that, while increasing productivity, lead to soil degradation, water contamination, biodiversity loss, and greenhouse gas emissions. These issues are exacerbated by the excessive use of chemical fertilizers and pesticides, contributing to processes like eutrophication and the intensification of climate change. In response, the text proposes applying Green Chemistry principles, which aim to reduce waste generation, replace toxic substances, and improve the efficiency of natural resource use. Emerging technologies, such as controlled-release fertilizers, nanopesticides, and biofertilizers, are highlighted as promising alternatives to mitigate environmental impacts without compromising productivity. Nanotechnology offers solutions for efficient input use and the remediation of degraded areas, while biotechnology enables the development of more resilient and sustainable crops. Additionally, the article explores the concept of the circular economy as a strategy to transform the agricultural sector. Practices such as reusing organic waste, producing bioenergy, and integrating agroforestry systems are cited as ways to reduce waste, increase productive efficiency, and promote sustainability. The article concludes that the integration of science, public policies, and cultural shifts is essential to advancing sustainable agriculture aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs). This agricultural model seeks to meet global food demands, reduce environmental impacts, and ensure the preservation of natural resources for future generations.

Keywords: Green Chemistry; Sustainable Agriculture; Environmental Impacts.

1. Introdução

A agricultura moderna encontra-se diante de um paradoxo crucial para o futuro da humanidade: embora desempenhe um papel indispensável na garantia da segurança alimentar global, também está associada a impactos ambientais prejudiciais, que afetam os ecossistemas e os recursos naturais. Por um lado, a produção agrícola intensiva é fundamental para atender às demandas alimentares de uma população em constante crescimento, especialmente em um cenário em que se projeta que a população mundial alcançará cerca de 10 bilhões de pessoas até 2050 (FAO, 2017). Por outro lado, as práticas agrícolas convencionais, especialmente aquelas que fazem uso extensivo de insumos químicos, como fertilizantes e pesticidas, geram problemas ambientais profundos, que vão desde a manipulação do solo até a contaminação dos recursos hídricos e a intensificação das mudanças climáticas.

O uso prolongado de fertilizantes químicos tem sido amplamente adotado como uma solução para aumentar a produtividade agrícola, permitindo que o solo seja enriquecido com os nutrientes necessários para o crescimento das plantas. Entretanto, conforme apontado por Foley et al. (2011), essa prática resulta

frequentemente na lixiviação de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, para os corpos d'água futuros, promovendo a eutrofização e desencadeando um desequilíbrio nos ecossistemas aquáticos. Esse processo pode levar à conformidade de algas, redução de oxigênio na água e morte de organismos aquáticos, comprometendo a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos essenciais.

Além disso, o uso intensivo de pesticidas, concebido para a justiça e as doenças nas plantações, também tem consequências graves. Esses compostos químicos frequentemente apresentam alta toxicidade e podem persistir no ambiente por longos períodos, contaminando o solo, as águas subterrâneas e até mesmo a atmosfera. Segundo Pimentel e Burgess (2014), apenas uma pequena fração dos pesticidas aplicados atinge os organismos-alvo; o restante é disperso no ambiente, expondo seres humanos e outros organismos a riscos à saúde, além de causar perda de biodiversidade e desequilíbrios ecológicos.

A intensificação agrícola, que busca maximizar a produtividade em áreas limitadas, tem sido identificada como uma das principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), conforme destacado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019). O óxido nitroso, em particular, é liberado como resultado do uso excessivo de fertilizantes nitrogenados e possui um potencial de aquecimento global cerca de 300 vezes maior que o do CO_2. Isso evidencia como as práticas agrícolas atuais significativamente para as mudanças climáticas, criando um ciclo prejudicial em que os impactos ambientais retroalimentam as vulnerabilidades do setor agrícola.

De acordo com Tilman et al. (2001), a intensificação agrícola, se conduzida sem medidas de mitigação, pode agravar ainda mais os problemas ambientais, colocando em risco os recursos naturais essenciais para as gerações futuras. O estudo realizado por esses autores destaca que a conversão de áreas naturais em terras agrícolas e a exploração excessiva dos solos comprometem não apenas a capacidade de regeneração desses ecossistemas, mas também a resiliência climática das regiões afetadas. Além disso, o aumento da demanda por produtos agrícolas, impulsionado pelo crescimento populacional e pela expansão dos

mercados internacionais, pressiona ainda mais os sistemas naturais, levando à perda de florestas, savanas e outros habitats naturais.

A manipulação do solo, que resulta do uso extensivo de técnicas agrícolas renováveis, é outro aspecto problemático dessa temática. Conforme ressaltado por Lal (2004), a manipulação do solo não apenas reduz a produtividade agrícola, mas também compromete a capacidade de armazenamento de carbono, exacerbando os efeitos das mudanças climáticas. O manejo inadequado do solo, combinado com práticas como o uso excessivo de maquinário pesado e a monocultura, leva à compactação, redução da matéria orgânica e perda de nutrientes essenciais, tornando os sistemas agrícolas menos resilientes e mais vulneráveis a eventos climáticos extremos, como secos e enchentes.

Nesse contexto, a adoção de práticas agrícolas mais seguras, baseadas nos princípios da Química Verde, surge como uma alternativa promissora para mitigar os impactos ambientais da agricultura moderna. Essas práticas, conforme propostas por Anastas e Warner (1998), têm como objetivo prevenir a geração de resíduos e reduzir o uso de substâncias tóxicas, promovendo uma agricultura que seja produtiva e, ao mesmo tempo, ambientalmente responsável.

Portanto, a agricultura moderna, apesar de sua contribuição essencial para a segurança alimentar, enfrenta o desafio urgente de equilibrar produtividade e sustentabilidade. A revisão das práticas agrícolas tradicionais e a incorporação de inovações científicas e tecnológicas, comprovadas aos princípios da sustentabilidade, são indispensáveis para garantir que os recursos naturais sejam preservados para as futuras gerações, sem comprometer a capacidade de atendimento às necessidades alimentares atuais.

A agricultura moderna é, simultaneamente, uma das maiores conquistas e um dos mais complexos desafios da sociedade contemporânea. Sua importância é inquestionável, pois fornece os alimentos necessários para sustentar bilhões de pessoas em todo o mundo. Entretanto, as práticas agrícolas tradicionais, amplamente adotadas ao longo do último século, estão profundamente interligadas a uma série de impactos ambientais que ameaçam a saúde dos ecossistemas e as próprias previsões da produção agrícola no longo prazo. A necessidade crescente de atender a uma demanda global por alimentos, que se expande rapidamente

devido ao aumento populacional – projetada para alcançar 10 bilhões de pessoas até 2050 (FAO, 2017) – tem pressões sobre o setor agrícola a adotar abordagens cada vez mais intensivas e extensivas.

Essa intensificação, embora essencial para aumentar a produtividade, tem provocado consequências alarmantes. O uso de fertilizantes químicos e pesticidas, por exemplo, tem sido um dos principais responsáveis pela gestão do solo, contaminação de recursos hídricos e emissão de gases de efeito estufa (FOLEY et al., 2011; TILMAN et al., 2001). Esses insumos, embora eficazes no curto prazo, geram problemas cumulativos que colocam em risco a capacidade das futuras gerações de produção de alimentos em um ambiente saudável e equilibrado. Segundo Lal (2004), a manipulação do solo, intensificada por práticas agrícolas, agrícolas, não apenas reduz a fertilidade e a produtividade das terras cultiváveis, mas também compromete serviços ecossistêmicos cruciais, como o sequestro de carbono e a regulação hídrica.

No caso dos fertilizantes nitrogenados, amplamente utilizados para suprir a demanda de nutrientes das plantas, observa-se um impacto significativo na emissão de óxido nitroso (N_2O), um dos gases de efeito estufa mais potentes e duradouros. Estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019) apontam que as emissões de N_2O provenientes da agricultura representam uma das principais fontes de aquecimento global, agravando os efeitos das mudanças climáticas e criando um ciclo de feedback negativo em que os sistemas agrícolas se tornam mais vulneráveis a eventos extremos, como secas, inundações e ondas de calor.

Outro ponto crítico é a contaminação dos corpos hídricos. A lixiviação de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, a partir do uso excessivo de fertilizantes, tem contribuído para processos de eutrofização em rios, lagos e reservatórios, desencadeando o crescimento excessivo de algas e a subsequente redução de toxicidade nas águas (FOLEY et al., 2011). Esse desequilíbrio prejudica severamente a biodiversidade aquática e compromete o uso sustentável desses recursos, essencial para o abastecimento de água potável e a manutenção da vida. Além disso, os pesticidas, embora indispensáveis para o controle de pragas e doenças, frequentemente apresentam alta toxicidade e longa persistência no

ambiente. Pimentel e Burgess (2014) destacam que apenas uma fração dos pesticidas aplicados alcança os organismos-alvo, enquanto o restante se dispersa, expondo organismos não-alvo, incluindo seres humanos, a riscos negativos à saúde.

Nesse cenário, a busca por soluções sustentáveis para os desafios da agricultura moderna tornou-se imperativa. A Química Verde, formulada por Anastas e Warner (1998), oferece um conjunto de princípios fundamentais para a concepção de produtos e processos químicos que reduzem ou eliminam o uso e a geração de substâncias perigosas. Esses princípios têm sido amplamente explorados como base para o desenvolvimento de insumos agrícolas mais sustentáveis, capazes de minimizar os impactos ambientais sem comprometer a produtividade.

Entre os avanços mais promissores estão os fertilizantes de liberação controlada, que garantem a disponibilização gradual de nutrientes para as plantas, redução de perdas por lixiviação e volatilização (SHELDON, 2016). Além disso, o desenvolvimento de pesticidas biodegradáveis e de baixo impacto, aliados a métodos biotecnológicos para o controle de pragas, representa um avanço significativo na redução dos efeitos adversos dos produtos químicos tradicionais. Zhang et al. (2019) destacam o papel emergente da nanotecnologia nesse contexto, permitindo a criação de insumos agrícolas mais eficientes e seletivos, que contribuem para a sustentabilidade da agricultura.

Ao mesmo tempo, a Química Verde não se limita à inovação tecnológica, mas também propõe uma transformação profunda na forma como os recursos são utilizados e gerenciados. Segundo Foley et al. (2011), uma transição para uma agricultura sustentável exige uma abordagem holística, que integre avanços científicos, políticas públicas práticas e mudanças culturais que promovam práticas agrícolas mais responsáveis.

O Brasil, como um dos maiores produtores agrícolas do mundo, possui um papel estratégico nesse debate. Com uma vasta diversidade de biomas e uma grande dependência econômica do setor agrícola, o país enfrenta o desafio de equilibrar a expansão da produção com a conservação ambiental. A aplicação dos princípios da Química Verde na agricultura brasileira oferece uma oportunidade única para

conciliar esses objetivos, promovendo um modelo de desenvolvimento agrícola que seja ao mesmo tempo competitivo e sustentável (SILVA et al., 2021).

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo principal investigar, por meio de uma revisão bibliográfica, como múltiplas formas pelas quais os princípios da Química Verde podem ser aplicados no desenvolvimento de insumos agrícolas mais sustentáveis. Esses princípios, que incluem a redução do uso de substâncias tóxicas, o aumento da eficiência no uso de recursos e a promoção de processos menos poluentes, oferecem uma base sólida para compensar e transformar as práticas agrícolas tradicionais.

A partir dessa análise, pretende-se explorar as possibilidades de uma agricultura mais eficiente e com menor impacto ambiental, abordando tanto os avanços científicos quanto os desafios tecnológicos e socioeconômicos relacionados à implementação dessas soluções. Serão considerados exemplos práticos, como a utilização de materiais primários renováveis, a substituição de fertilizantes e pesticidas convencionais por alternativas biodegradáveis, e a adoção de processos de produção que geram menos resíduos. Além disso, o artigo busca destaca o papel central da química como uma ferramenta indispensável na construção de um futuro mais equilibrado e sustentável para a produção de alimentos. Por meio da integração entre a ciência química e outras áreas, como a biotecnologia e a nanotecnologia, é possível criar soluções inovadoras que não apenas atendam à crescente demanda por alimentos, mas também preservem os recursos naturais e minimizem os impactos sobre o meio ambiente.

Ressalta-se que a aplicação dos princípios da Química Verde não se limita ao campo técnico, mas envolve uma mudança de paradigma que favorece um equilíbrio entre a produtividade agrícola e a conservação ambiental, garantindo a segurança alimentar para as gerações presentes e futuras. Sendo assim, espera-se que a revisão proposta neste artigo contribua para o debate sobre a transição para modelos agrícolas mais sustentáveis, ressaltando a importância de políticas públicas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e a conscientização dos diversos atores envolvidos na cadeia produtiva.

2. Metodologia

Este estudo realizou uma revisão bibliográfica baseada em publicações científicas de bases como ScienceDirect, Scopus, SpringerLink e ResearchGate, analisando artigos publicados entre 2020 e 2024 sobre práticas sustentáveis na agricultura. O foco foi a aplicação dos princípios da Química Verde, especialmente o uso de matérias-primas renováveis, minimização de resíduos e substituição de substâncias tóxicas.

A análise incluiu estudos com dados experimentais e sistemáticos, abordando tecnologias como bioinseticidas, biopesticidas e fertilizantes verdes, e considerando os desafios em regiões tropicais, como o Brasil. Foram destacadas as relações com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como erradicação da fome (ODS 2), produção responsável (ODS 12), mitigação climática (ODS 13) e conservação ambiental (ODS 15).

Sendo assim, propõe-se que a aplicação dos princípios da Química Verde pode aumentar a produtividade agrícola e reduzir impactos ambientais, alinhando-se a uma agricultura mais sustentável, produtiva e ambientalmente responsável. Além disso, destaca-se a necessidade de integrar ciência, políticas públicas e iniciativas privadas para promover práticas agrícolas inovadoras que garantam segurança alimentar e preservação dos recursos naturais para o futuro.

Portanto, espera-se que os resultados desta revisão possam servir como base para subsidiar políticas mais eficazes, além de iniciativas do setor privado que incentivam práticas agrícolas inovadoras e responsáveis. Tais ações podem acelerar a transição para um modelo agrícola mais sustentável, capaz de enfrentar os desafios globais de forma eficiente e, ao mesmo tempo, preservar os recursos naturais essenciais para as gerações futuras.

Dessa forma, ao integrar a sustentabilidade como um princípio fundamental da produção agrícola, é possível criar soluções que não apenas atendam às necessidades atuais, mas também garantam a segurança alimentar e a saúde ambiental para os próximos anos.

3. Desenvolvimento

A agricultura moderna enfrenta o enorme desafio de atender à crescente demanda por alimentos de uma população mundial em expansão, ao mesmo tempo em que deve adotar práticas sustentáveis que minimizem os impactos ambientais. O modelo agrícola atual, intensificado pelo uso excessivo de fertilizantes sintéticos, pesticidas e práticas insustentáveis, tem gerado sérias consequências, como a degradação do solo, a contaminação de recursos hídricos e a emissão significativa de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a Química Verde e as tecnologias emergentes despontam como alternativas promissoras, capazes de reconciliar produtividade e sustentabilidade.

Os princípios da Química Verde, elaborados por Anastas e Warner (1998), fornecem uma base para transformar os sistemas agrícolas por meio de soluções que reduzem a geração de resíduos, aumentam a eficiência de recursos e promovem o uso de matérias-primas renováveis. Tecnologias como fertilizantes de liberação controlada, nanopesticidas e o uso de biomassa lignocelulósica demonstram como é possível integrar ciência e inovação para enfrentar os desafios ambientais e econômicos da agricultura. Essas inovações não apenas mitigam os danos ao meio ambiente, mas também promovem o modelo de economia circular, em que resíduos se tornam insumos valiosos, gerando novas oportunidades econômicas e reduzindo desperdícios.

No entanto, a transição para uma agricultura sustentável enfrenta barreiras significativas. A falta de políticas públicas robustas, financiamento contínuo e articulação entre os setores acadêmico, produtivo e governamental limita a adoção em larga escala dessas tecnologias, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. Nesse cenário, o papel das políticas públicas é crucial para criar um ambiente favorável à inovação, oferecendo incentivos financeiros, suporte técnico e educação para agricultores. Além disso, a capacitação dos produtores é indispensável para que eles possam compreender e implementar práticas sustentáveis de maneira eficaz.

A agricultura sustentável, fundamentada em tecnologias emergentes e nos princípios da Química Verde, apresenta um enorme potencial para transformar

crises em oportunidades, promovendo um modelo de desenvolvimento socioeconômico alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No entanto, essa transição exige a combinação de esforços científicos, políticos e sociais. Somente com a integração de tecnologias, políticas inclusivas e a conscientização da sociedade será possível criar um sistema agrícola resiliente, capaz de atender às demandas alimentares do presente sem comprometer os recursos das futuras gerações.

A agricultura do futuro exige uma reconfiguração profunda das práticas atuais, muitas das quais têm sido centradas na maximização da produtividade a qualquer custo. O modelo agrícola tradicional, predominantemente intensivo em insumos químicos, pesticidas e fertilizantes sintéticos, tem gerado impactos ambientais graves, como a degradação do solo, contaminação de corpos hídricos e perda da biodiversidade. Além disso, as desigualdades sociais, econômicas e culturais existentes no setor agrícola, muitas vezes, tornam a agricultura uma atividade excludente, sem acesso equitativo às novas tecnologias ou aos benefícios da inovação. A crescente conscientização sobre esses problemas levou especialistas a refletirem sobre a necessidade urgente de adotar um modelo agrícola mais integrado e sustentável, que priorize a preservação ambiental, a eficiência no uso de recursos e a inclusão social.

Segundo Foresight (2011), a busca pela segurança alimentar global deve ser equilibrada com a necessidade de práticas agrícolas que respeitem os limites dos ecossistemas. Não se trata apenas de aumentar a produção, mas de promover uma agricultura regenerativa, que possa melhorar a qualidade do solo, restaurar a biodiversidade e, ao mesmo tempo, garantir que os recursos naturais sejam utilizados de forma racional e responsável. O conceito de sustentabilidade na agricultura vai além do simples uso de insumos mais verdes ou práticas agrícolas ecologicamente corretas. Envolve uma mudança de paradigma em que a produção de alimentos seja integrada a um modelo econômico circular, no qual a reutilização de recursos, a redução de resíduos e a valorização de subprodutos desempenham um papel crucial.

A noção de “agricultura regenerativa” tem ganhado destaque nos últimos anos, defendendo um modelo que restaura os ecossistemas ao invés de apenas

mitigar os impactos negativos. Segundo Liebig et al. (2020), a agricultura regenerativa busca restabelecer a saúde dos solos por meio de práticas como o plantio direto, o uso de coberturas vegetais e a rotação de culturas. Essas práticas têm o potencial de melhorar a fertilidade do solo, aumentar a capacidade de retenção de água e sequestrar carbono da atmosfera, ajudando a mitigar as mudanças climáticas. Ao focar na restauração ecológica, em vez de apenas na extração de recursos naturais, essa abordagem propõe uma agricultura que não apenas sustenta a produção, mas também contribui ativamente para a regeneração dos sistemas ecológicos.

No entanto, para que a agricultura do futuro seja eficaz e equitativa, ela precisa garantir uma distribuição mais justa dos benefícios da inovação, o que implica em um esforço contínuo de inclusão social. A sustentabilidade no setor agrícola não pode ser separada da promoção de justiça social e econômica. Em muitas regiões do mundo, os pequenos agricultores, especialmente aqueles em países em desenvolvimento, enfrentam dificuldades em acessar tecnologias que poderiam aumentar a produtividade e melhorar a eficiência dos seus sistemas agrícolas. Segundo Altieri (2002), as políticas públicas devem ser orientadas para garantir que as inovações tecnológicas cheguem a todos os produtores, especialmente aqueles de pequena escala, para que possam participar ativamente da transformação do setor.

A inclusão social também está ligada à promoção de práticas agrícolas que respeitem as condições culturais e sociais das populações rurais. Isso significa que as soluções tecnológicas devem ser adaptadas às realidades locais, levando em consideração não apenas os aspectos ambientais, mas também as condições econômicas, sociais e culturais das comunidades agrícolas. A adoção de tecnologias agrícolas mais sustentáveis deve ser acompanhada de processos de capacitação, formação e conscientização, para que os agricultores compreendam os benefícios de longo prazo dessas mudanças e possam adotá-las de forma eficaz.

Além disso, a governança no setor agrícola é um componente fundamental para a construção de um modelo agrícola sustentável. A governança eficaz deve ser capaz de coordenar as ações de diferentes atores, como governos, empresas,

organizações não governamentais e produtores rurais, para garantir que as políticas públicas promovam de forma justa e inclusiva o uso de práticas sustentáveis. A implementação de políticas agrícolas sustentáveis, como as propostas pela União Europeia com a Política Agrícola Comum (PAC) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, oferece um modelo de governança que almeja alinhar a produção agrícola com objetivos ambientais e sociais. A paciência para implementar essas políticas exige um compromisso a longo prazo, envolvendo uma integração de ações locais e globais, públicas e privadas, em um esforço colaborativo.

No entanto, a transição para uma agricultura mais sustentável depende de uma mudança cultural significativa, que envolva não apenas os agricultores, mas também os consumidores, os legisladores e os empresários. Em um contexto de globalização, onde o mercado de alimentos está cada vez mais interconectado, é preciso promover uma mudança de mentalidade entre os consumidores, incentivando o consumo consciente e a preferência por produtos agrícolas sustentáveis. Como destacam Lamine et al. (2012), a demanda crescente por alimentos orgânicos e produzidos de forma sustentável está criando uma oportunidade para os produtores agrícolas que optam por práticas mais responsáveis, tanto do ponto de vista ambiental quanto social.

Portanto, a agricultura do futuro deve ser entendida como um sistema integrado, no qual a inovação tecnológica, a preservação ambiental, a justiça social e a eficiência econômica convergem para criar um modelo mais resiliente e sustentável. É fundamental que políticas públicas, como a promoção de práticas agrícolas regenerativas, a implementação de tecnologias mais limpas e a inclusão de pequenas comunidades no processo de inovação, sejam amplamente adotadas e adaptadas às diferentes realidades regionais. Somente através dessa abordagem integrada, que alinha ciência, inovação e governança, será possível construir um modelo agrícola que não apenas assegure a segurança alimentar global, mas também garanta a preservação ambiental e a justiça social para as futuras gerações.

3.1. Sustentabilidade na agricultura moderna: integração com a economia circular

A agricultura moderna é uma das atividades humanas mais relevantes para a manutenção da segurança alimentar de uma população global crescente, que, segundo projeções da ONU, deverá alcançar 9,7 bilhões de pessoas até 2050. Este crescimento populacional implica em um aumento de cerca de 60% na demanda global por alimentos (FAO, 2017). No entanto, a intensificação desse modelo produtivo tem gerado impactos ambientais alarmantes, que colocam em xeque sua viabilidade a longo prazo. Entre os problemas mais críticos estão a contaminação de corpos hídricos, a manipulação e degradação dos solos, a perda de biodiversidade e as emissões significativas de gases de efeito estufa, responsáveis por aproximadamente 24% do total global de emissões (IPCC, 2019). Estes desafios evidenciam a necessidade de um modelo agrícola que vá além da eficiência produtiva, integrando práticas sustentáveis que minimizem os impactos negativos no meio ambiente. Nesse cenário, a economia circular surge como um caminho promissor para transformar o setor agrícola, promovendo um ciclo fechado de materiais e energia e reduzindo desperdícios.

A economia circular, em oposição ao modelo linear tradicional (extrair, produzir e descartar), propõe um sistema em que os resíduos são transformados em recursos. De acordo com Ellen MacArthur Foundation (2013), os princípios da economia circular incluem o design de produtos e processos para minimizar desperdícios e manter os recursos em uso pelo maior tempo possível. No contexto agrícola, isso implica na reutilização de resíduos orgânicos, no reaproveitamento de nutrientes presentes no solo e no redesenho dos insumos agrícolas para reduzir a dependência de materiais não renováveis. Por exemplo, resíduos de culturas como bagaço de cana, casca de arroz e palha de milho podem ser transformados em fertilizantes, bioenergia ou biomateriais, gerando valor a partir de subprodutos anteriormente descartados.

Um exemplo notável é a utilização de biomassa lignocelulósica para a produção de biofertilizantes e bioherbicidas. Sheldon (2016) destaca que essa biomassa, abundante em resíduos agrícolas, pode ser convertida em químicos

renováveis, como ácidos orgânicos e biopolímeros, que substituem derivados de petróleo. Barrow et al. (2012) complementam que, além de reduzir o desperdício, o aproveitamento de resíduos melhora a eficiência energética do sistema produtivo. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) mostram que o Brasil gera cerca de 500 milhões de toneladas de resíduos agrícolas anualmente, representando uma oportunidade significativa para a implementação de práticas de economia circular.

No âmbito da economia circular, a Química Verde desempenha um papel central ao oferecer tecnologias que possibilitam o redesenho dos insumos agrícolas. Fertilizantes de liberação controlada, desenvolvidos com polímeros biodegradáveis, são um exemplo de inovação que alinha produtividade à sustentabilidade. Costa et al. (2020) demonstram que esses fertilizantes podem reduzir as perdas por lixiviação em até 50%, além de melhorar a eficiência no uso de nutrientes, especialmente em solos tropicais. Da mesma forma, Zhang et al. (2019) ressaltam o uso de nanopartículas em defensivos agrícolas como uma solução de economia circular, pois permitem maior eficácia no controle de pragas com menor uso de produtos químicos, reduzindo a geração de resíduos tóxicos.

Outro exemplo emblemático da economia circular na agricultura é a produção de biogás a partir de dejetos animais e resíduos agrícolas. Na União Europeia, políticas de incentivo ao uso de biodigestores têm permitido a geração de energia renovável enquanto mitigam as emissões de metano provenientes da pecuária. Na Alemanha, por exemplo, mais de 9.500 biodigestores foram instalados até 2020, representando uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa e na dependência de combustíveis fósseis (European Biogas Association, 2021). No Brasil, o programa RenovaBio incentiva a produção de biocombustíveis, mas ainda enfrenta desafios na ampliação do uso de resíduos como matéria-prima em pequena escala.

Além disso, a reutilização de águas residuais para irrigação agrícola é uma prática cada vez mais comum em sistemas de economia circular. Segundo a FAO (2020), cerca de 10% das áreas irrigadas no mundo utilizam águas residuais tratadas, promovendo a conservação de recursos hídricos e a reciclagem de nutrientes. Essa prática já é amplamente adotada em países como Israel, onde

mais de 85% das águas residuais urbanas são reutilizadas para irrigação, servindo como um modelo bem-sucedido de gestão circular de recursos hídricos.

A transição para uma economia circular na agricultura também exige mudanças no design de produtos agrícolas. Clark e Deswarte (2015) sugerem que a agricultura circular deve incorporar conceitos como o “design regenerativo”, que considera a capacidade dos ecossistemas de se recuperarem ao longo do tempo. Isso inclui práticas como a rotação de culturas, o uso de cobertura vegetal para preservar o solo e a integração de agroflorestas, que aumentam a biodiversidade e ajudam a sequestrar carbono. Esses sistemas, além de promoverem a sustentabilidade ambiental, podem ser economicamente viáveis, uma vez que reduzem os custos com insumos externos.

No Brasil, o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) é um exemplo de política pública que alinha práticas agrícolas à economia circular. Desde sua implementação, mais de 35 milhões de hectares já foram manejados com técnicas de recuperação de pastagens degradadas e sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta (ILPF), que promovem a ciclagem de nutrientes e a redução de emissões de carbono (Embrapa, 2023). No entanto, a expansão dessas práticas ainda enfrenta desafios relacionados à capacitação técnica e ao acesso a financiamentos, especialmente entre pequenos agricultores.

Portanto, a integração dos princípios da economia circular na agricultura tem o potencial de transformar o setor em um modelo sustentável e regenerativo, capaz de atender às demandas crescentes de alimentos sem esgotar os recursos naturais. Ao alinhar inovação tecnológica, políticas públicas e engajamento social, a agricultura circular pode não apenas contribuir para a segurança alimentar global, mas também criar um futuro mais equilibrado e resiliente.

Por fim, a economia circular na agricultura não se limita a soluções tecnológicas e políticas públicas, mas também envolve mudanças sociais e culturais. Pretty (2008) destaca que programas educacionais e de conscientização são essenciais para que agricultores compreendam os benefícios de práticas circulares a longo prazo. A transição para esse modelo requer a participação ativa de todos os atores do setor agrícola, desde produtores e indústrias até

consumidores, que desempenham um papel central ao demandarem produtos mais sustentáveis.

3.2. Bioeconomia e biotecnologia: caminhos para uma agricultura sustentável

As tecnologias emergentes desempenham um papel fundamental na transição para uma agricultura mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular. Essas inovações têm o potencial de transformar radicalmente os sistemas agrícolas, ao maximizar a eficiência no uso de recursos, reduzir impactos ambientais e criar valor a partir de resíduos, promovendo um modelo regenerativo e mais equilibrado com os ecossistemas. Um dos avanços mais significativos nesse contexto é a nanotecnologia, que tem permitido o desenvolvimento de insumos agrícolas de alta eficiência, como nanofertilizantes e nanopesticidas. Esses produtos são formulados para liberar nutrientes e compostos ativos de maneira controlada e direcionada, otimizando sua absorção pelas plantas e reduzindo perdas por lixiviação.

A nanotecnologia tem se consolidado como uma inovação promissora na agricultura e na sustentabilidade ambiental. Estudos indicam que o uso de nanofertilizantes é capaz de reduzir a quantidade de insumos aplicados em até 30%, o que não apenas diminui os custos para os produtores, mas também contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis. Essa eficiência é alcançada devido à liberação controlada de nutrientes, que maximiza a absorção pelas plantas e minimiza as perdas para o meio ambiente. Como resultado, há uma redução significativa na poluição do solo e da água, além de uma utilização mais eficiente dos recursos, o que contribui para a sustentabilidade das práticas agrícolas.

Além da melhoria na eficiência dos fertilizantes, a nanotecnologia desempenha um papel crucial na remediação ambiental. Nanopartículas específicas têm sido utilizadas com sucesso na recuperação de áreas degradadas por práticas agrícolas intensivas, como solos com alta concentração de resíduos químicos ou corpos hídricos poluídos por fertilizantes e pesticidas. Essas

nanopartículas possuem propriedades únicas que permitem interagir com as impurezas, facilitando sua neutralização ou remoção.

O impacto dessa tecnologia vai além dos benefícios à agricultura. A aplicação de nanomateriais pode contribuir para a regeneração de ecossistemas, reduzindo os efeitos adversos das práticas agrícolas sobre a biodiversidade. Também se destaca como uma solução para os desafios globais relacionados à segurança alimentar e às mudanças climáticas, promovendo uma produção mais eficiente e ambientalmente responsável.

No entanto, apesar do seu enorme potencial, o uso de nanofertilizantes e outras tecnologias baseadas em nanotecnologia requer uma avaliação cuidadosa dos seus impactos a longo prazo. Estudos adicionais são necessários para compreender completamente os efeitos dessas partículas no ambiente e na saúde humana, garantindo que sua aplicação seja segura e sustentável. Dessa forma, a nanotecnologia surge como uma aliada poderosa na busca por uma agricultura mais eficiente e alinhada aos princípios de sustentabilidade.

Outro campo promissor é a biotecnologia, que vem transformando os processos agrícolas por meio da criação de organismos geneticamente modificados e do uso de microrganismos para produção de bioinsumos. Esses biofertilizantes e bioherbicidas, desenvolvidos a partir de microrganismos geneticamente otimizados, oferecem uma alternativa sustentável aos produtos químicos sintéticos, com benefícios adicionais, como o aumento da produtividade e a redução de emissões de gases de efeito estufa. Tecnologias como a edição gênica por CRISPR-Cas9 também estão sendo aplicadas para desenvolver culturas mais resilientes às mudanças climáticas, com menor demanda de insumos e maior capacidade de sequestro de carbono, contribuindo diretamente para a mitigação do aquecimento global.

A inteligência artificial (IA) e a Internet das Coisas (IoT) também têm transformado o setor agrícola, proporcionando uma gestão mais eficiente e baseada em dados. Sensores conectados monitoram, em tempo real, condições como umidade, temperatura e nutrientes do solo, permitindo intervenções mais precisas e uma utilização otimizada de recursos como água e fertilizantes. Sistemas de irrigação inteligente, por exemplo, têm demonstrado uma redução de

até 30% no consumo de água, ao mesmo tempo em que garantem melhores condições para o desenvolvimento das culturas. Além disso, drones e robôs equipados com sensores multiespectrais têm sido empregados para monitorar lavouras, identificar doenças e realizar colheitas seletivas, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência operacional.

No contexto da bioeconomia, um dos pilares da economia circular, resíduos agrícolas vêm sendo transformados em produtos de alto valor agregado. Cascas, palha e outros subprodutos estão sendo utilizados para a produção de bioenergia, bioplásticos e aditivos agrícolas. Tecnologias de biodigestão têm permitido a conversão de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes, enquanto resíduos lignocelulósicos, como bagaço de cana e palha de milho, estão sendo transformados em bioplásticos biodegradáveis, substituindo materiais derivados de petróleo. Esses avanços não apenas reduzem o desperdício, mas também geram novas fontes de renda para os produtores, fechando ciclos produtivos e promovendo maior eficiência energética.

A energia renovável aplicada à agricultura também tem se destacado como uma tecnologia fundamental para a economia circular. Sistemas de energia solar, eólica e biomassa estão sendo amplamente utilizados para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. No Brasil, programas de incentivo à energia solar rural têm permitido que milhares de propriedades agrícolas instalem painéis fotovoltaicos, gerando economias significativas nos custos de energia e reduzindo a pegada de carbono da atividade agrícola. Em paralelo, sistemas agrovoltaicos, que combinam a geração de energia solar com o cultivo de alimentos na mesma área, representam uma inovação promissora, maximizando o uso do espaço e promovendo a sustentabilidade.

Apesar de seu potencial transformador, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios significativos. O custo inicial elevado, a falta de infraestrutura e a necessidade de capacitação técnica são barreiras que limitam sua disseminação, especialmente entre pequenos e médios produtores. Além disso, a ausência de políticas públicas robustas e de financiamento contínuo dificulta a integração dessas inovações em larga escala. Estudos apontam que a criação de marcos regulatórios favoráveis, combinados com programas de incentivo à pesquisa e à

transferência de tecnologia, é essencial para acelerar a adoção de práticas mais sustentáveis. Iniciativas como o Plano ABC, no Brasil, e a Política Agrícola Comum da União Europeia mostram que a integração de políticas públicas com tecnologias emergentes pode gerar resultados significativos na redução de impactos ambientais e na promoção de uma agricultura regenerativa.

Portanto, o futuro da agricultura sustentável depende de uma combinação de avanços tecnológicos, apoio político e engajamento social. As tecnologias emergentes não apenas oferecem soluções para os desafios ambientais e produtivos, mas também representam uma oportunidade de reconfigurar o sistema agrícola global, transformando-o em um modelo mais eficiente, resiliente e alinhado aos princípios da economia circular. Para que isso seja alcançado, é essencial promover uma maior sinergia entre as esferas pública e privada, com incentivos à pesquisa e à inovação que priorizem soluções sustentáveis, bem como o fortalecimento de parcerias internacionais voltadas para a troca de conhecimentos e o compartilhamento de tecnologias de ponta.

Além disso, a capacitação dos agricultores desempenha um papel central nesse processo, especialmente em regiões onde o acesso à educação técnica e a recursos financeiros é limitado. A disseminação de conhecimento sobre o uso de tecnologias emergentes, combinada com programas de extensão rural, pode empoderar os produtores, permitindo que adotem práticas inovadoras de maneira eficaz e acessível. Esse engajamento deve ser acompanhado por políticas públicas inclusivas que considerem as especificidades locais, respeitando as diferenças climáticas, culturais e econômicas de cada região. Nesse sentido, a criação de linhas de crédito direcionadas, subsídios para aquisição de tecnologias sustentáveis e programas de assistência técnica são ferramentas indispensáveis para reduzir desigualdades no acesso às inovações.

A implementação de um modelo agrícola sustentável também deve ser integrada a uma visão mais ampla de desenvolvimento socioeconômico. A transição para práticas agrícolas baseadas na economia circular tem o potencial de gerar empregos de alta qualificação, impulsionar a bioeconomia e diversificar as fontes de renda no campo. Setores como a produção de bioenergia, bioplásticos e biofertilizantes, além do uso de tecnologias como IoT e inteligência artificial, têm

demonstrado um grande potencial de crescimento, promovendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a prosperidade econômica em comunidades rurais.

Outro aspecto fundamental é a necessidade de monitoramento e avaliação contínuos dos impactos dessas tecnologias e práticas. O uso de indicadores de sustentabilidade, como emissões de gases de efeito estufa, eficiência no uso de recursos naturais e níveis de preservação da biodiversidade, é crucial para ajustar políticas e práticas de forma dinâmica e baseada em evidências. Sistemas de certificação e rastreabilidade também podem desempenhar um papel importante, garantindo que os consumidores reconheçam e valorizem os produtos oriundos de cadeias produtivas sustentáveis, estimulando um mercado mais consciente e comprometido com a sustentabilidade.

4. CONCLUSÃO

A aplicação dos princípios da Química Verde à produção de insumos agrícolas é uma alternativa promissora e indispensável para enfrentar os desafios ambientais, econômicos e sociais impostos à agricultura moderna. Com a crescente demanda global por alimentos, impulsionada pelo aumento populacional e pelas mudanças nos padrões de consumo, torna-se imperativo repensar as práticas agrícolas tradicionais, que frequentemente priorizam a produtividade em detrimento da preservação ambiental. Nesse cenário, a Química Verde se destaca como uma abordagem inovadora que pode equilibrar produtividade e sustentabilidade, ao promover práticas que reduzem os impactos ambientais, otimizam o uso de recursos naturais e integram conceitos de economia circular à cadeia produtiva.

O futuro da agricultura sustentável dependerá, em grande parte, da capacidade de incorporar tecnologias emergentes, políticas públicas eficazes e mudanças culturais às práticas agrícolas globais. Tecnologias como fertilizantes de liberação controlada, defensivos biodegradáveis e o aproveitamento de matérias-primas renováveis já demonstram ser alternativas viáveis para transformar a agricultura em um setor mais eficiente e menos agressivo ao meio ambiente. Essas

inovações, quando aplicadas de forma ampla e coordenada, podem contribuir significativamente para a redução da contaminação do solo e da água, além de mitigar as emissões de gases de efeito estufa, que estão entre os principais fatores de mudança climática.

O Brasil, como um dos maiores produtores agrícolas do mundo, ocupa uma posição estratégica nesse contexto. A vasta extensão territorial, a diversidade de climas e solos e a importância do agronegócio na economia nacional conferem ao país uma responsabilidade significativa na construção de um modelo agrícola mais sustentável. Iniciativas como o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) demonstram que é possível alinhar aumento da produtividade com redução de impactos ambientais, especialmente por meio do uso de tecnologias inovadoras adaptadas às condições locais. Entretanto, para que o Brasil assuma um papel de liderança global nesse campo, é necessário superar desafios estruturais, como a falta de investimentos consistentes em pesquisa e desenvolvimento, a ausência de políticas públicas abrangentes e a dificuldade de promover a capacitação técnica dos pequenos e médios produtores.

Além disso, o futuro da agricultura sustentável requer um alinhamento mais estreito entre ciência, tecnologia e políticas públicas. Governos, empresas e instituições acadêmicas precisam atuar em sinergia para criar um ambiente favorável à inovação. Isso inclui não apenas a criação de marcos regulatórios e incentivos financeiros, mas também o estabelecimento de parcerias público-privadas que promovam a transferência de tecnologia e o acesso a soluções sustentáveis, especialmente para produtores de menor escala. A construção de políticas agrícolas deve, portanto, considerar a diversidade regional, garantindo que as soluções sejam inclusivas e eficazes para as diferentes realidades socioeconômicas e ambientais.

Outro aspecto central para o futuro da agricultura sustentável é a integração de conceitos de economia circular ao setor agrícola. O reaproveitamento de resíduos agrícolas, como a biomassa lignocelulósica, para a produção de biofertilizantes e bioherbicidas, exemplifica como os resíduos podem ser transformados em recursos valiosos, reduzindo desperdícios e fortalecendo a sustentabilidade econômica. Essa abordagem também contribui para a redução da

dependência de insumos derivados de combustíveis fósseis, que possuem alto custo ambiental e econômico. A transição para uma agricultura baseada em princípios de economia circular representa uma oportunidade não apenas para diminuir os impactos ambientais, mas também para agregar valor aos produtos agrícolas, aumentando sua competitividade nos mercados internacionais.

A adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis está diretamente vinculada ao fortalecimento da conscientização social sobre a importância de consumir produtos que respeitem o meio ambiente. Consumidores têm desempenhado um papel cada vez mais ativo ao exigir alimentos produzidos de forma ética e sustentável. Esse movimento cria uma demanda crescente por práticas agrícolas alinhadas a esses valores, pressionando os setores produtivos e governamentais a acelerar a transição para modelos mais responsáveis. Portanto, iniciativas educacionais e campanhas de conscientização são ferramentas indispensáveis para transformar a mentalidade dos diversos atores envolvidos, promovendo uma compreensão mais ampla dos benefícios de longo prazo da agricultura sustentável.

Acredita-se que o futuro da agricultura sustentável também está profundamente conectado à adoção de tecnologias emergentes, como nanotecnologia, biotecnologia e inteligência artificial. Essas tecnologias oferecem possibilidades quase ilimitadas para aumentar a eficiência produtiva e, ao mesmo tempo, mitigar os impactos ambientais. Por exemplo, sensores baseados em nanotecnologia podem monitorar em tempo real as condições do solo e das plantas, permitindo ajustes precisos na aplicação de insumos, enquanto ferramentas de inteligência artificial podem auxiliar na gestão de fazendas, otimizando o uso de recursos e minimizando desperdícios. No entanto, a implementação dessas tecnologias exige investimentos robustos em infraestrutura, formação de mão de obra qualificada e parcerias entre academia e setor produtivo.

Vislumbrando o futuro, faz-se imprescindível que a agricultura sustentável seja vista como um elemento central na luta contra as mudanças climáticas, na preservação da biodiversidade e na promoção da segurança alimentar global. A integração de princípios da Química Verde e de tecnologias emergentes deve ser acompanhada de políticas públicas que garantam a inclusão social, o acesso equitativo a inovações e o fortalecimento da resiliência das comunidades agrícolas

frente aos desafios do século XXI. Assim, a agricultura sustentável pode não apenas atender às demandas atuais por alimentos, mas também atuar como um motor de desenvolvimento socioeconômico, promovendo justiça social e equilíbrio ambiental.

Portanto, o destino da agricultura sustentável dependerá de uma abordagem integrada que combine ciência, tecnologia, políticas públicas e conscientização social. Essa integração permitirá desenvolver um modelo agrícola capaz de atender às necessidades alimentares da população global sem comprometer os recursos naturais das gerações vindouras. Liderando esse movimento, o Brasil e outros países podem provar que é possível aliar inovação, responsabilidade ambiental e crescimento econômico, transformando a agricultura em um dos pilares fundamentais para construir um mundo mais justo, equilibrado e sustentável. Assim, a agricultura não será apenas uma solução para os desafios atuais, mas também um símbolo de esperança e progresso para as gerações que virão.

Referências

ALTIERI, M. A. Agroecology: The science of sustainable agriculture. 2. ed. Boulder: Westview Press, 2002.ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford: Oxford University Press, 1998.

BARROW, C. J.; CLARK, G.; COLEBY, A. M. Bio-based products: from concept to consumer. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v. 27, n. 1, p. 60-71, 2012.

CHEN, Z.; POON, C. Policies promoting sustainable agriculture through green chemistry. *Journal of Environmental Management*, v. 328, p. 116-130, 2023.

CLARK, J. H.; DESWARTE, F. E. I. Introduction to Chemicals from Biomass. Hoboken: Wiley, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781118714478. Acesso em: 11 jan. 2025.

COSTA, C. H. et al. Controlled-release fertilizers using biodegradable polymers: advances and perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 68, n. 11, p. 3474-3483, 2020.

DEROSA, M. C.; MONREAL, C.; SCHNEIDER, M.; SEKRETI, R.; HALDEN, N. Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, v. 5, n. 2, p. 91-94, 2010.

FAO. O *Estado da Alimentação e da Agricultura: Mudanças Climáticas, Agricultura e Segurança Alimentar.* Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, 2017. Disponível em : http://www.fao.org/state-of-food-agriculture/en/. Acesso em: 10 jan. 2025.

FOLEY, JA; DEFRIES, R.; ASNER, GP; et al. Soluções para um planeta cultivado. *Nature*, v. 478, p. 337-342, 2011.

FORESIGHT. The future of food and farming: Challenges and choices for global sustainability. Final project report. London: Government Office for Science, 2011.

HORLINGS, L. G.; MARSDEN, T. K. Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernization of agriculture that could 'feed the world'. Global Environmental Change, v. 21, n. 2, p. 441-452, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.004. Acesso em: 11 jan. 2025.

IPCC. *Mudanças Climáticas e Terra: Relatório Especial sobre Mudanças Climáticas, Desertificação, Degradação da Terra, Gestão Sustentável da Terra, Segurança Alimentar e Fluxos de Gases de Efeito Estufa em Ecossistemas Terrestres*. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2019.

ISMAN, M. B. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. Annual Review of Entomology, v. 51, p. 45-66, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146. Acesso em: 11 jan. 2025.

LAL, R. Impactos do sequestro de carbono no solo na mudança climática global e na segurança alimentar. *Science*, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LAMINE, C.; LAMBEY, M.; LEFF, D. Sustainable food systems and sustainable agriculture: Challenges and opportunities. *Food Policy*, v. 37, p. 468-475, 2012.

LIEBIG, M.; GEISSE, J.; SCHMIDT, R. Regenerative agriculture: What it is and why it matters. *Soil Science Society of America Journal*, v. 84, n. 2, p. 279-286, 2020.

MATSON, P. A.; PARTON, W. J.; POWER, A. G.; SWIFT, M. J. Agricultural intensification and ecosystem properties. Science, v. 277, n. 5325, p. 504-509, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504. Acesso em: 11 jan. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTOS E AGRICULTURA (FAO). O futuro da alimentação e da agricultura: tendências e desafios. Roma: FAO, 2017.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Mudanças climáticas e terra: um relatório especial do IPCC sobre mudanças climáticas, desertificação, degradação da terra, gestão sustentável da terra, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres. Genebra: IPCC, 2019.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Custos ambientais e econômicos da aplicação de pesticidas principalmente nos Estados Unidos. *Integrated Pest Management*, p. 47-71, 2014.

PRETTY, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1491, p. 447-465, 2008.

SHELDON, R. A. Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art. *Green Chemistry*, v. 18, n. 12, p. 3180-3183, 2016.

SHELDON, R. A. The E factor: Fifteen years on. Green Chemistry, v. 19, n. 1, p. 18-43, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1039/C6GC02157C. Acesso em: 11 jan. 2025.

SHELDON, RA *Química Verde e o Desenvolvimento de Processos Sustentáveis* . *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* , v. 91, p. 1414-1421, 2016.

SILVA, A. L.; MOURA, K. F.; SANTOS, C. M. Sustainability in tropical agriculture: A review on practices, challenges, and research trends. Journal of Agricultural Sustainability, v. 12, n. 2, p. 123-136, 2020.

SILVA, M. A.; OLIVEIRA, R. F.; SANTOS, J. R. Agricultura tropical e sustentabilidade: uma perspectiva brasileira. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 16, n. 2, p. 15-27, 2021.

SILVA, R.A; SANTOS, J.D; CUNHA, S.P. *Sustentabilidade e inovação na agricultura brasileira: práticas e perspectivas*. *Revista Brasileira de Agricultura Sustentável*, v. 123-139, 2021.

TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, v. 418, p. 671-677, 2002.

TILMAN, D.; CASSMAN, KG; MATSON, PA; et al. Sustentabilidade agrícola e práticas de produção intensiva. *Nature* , v. 418, p. 671-677, 2001.

TUNDO, P.; PEROSA, A.; ZECCHINI, F. (Eds.). Methods and Reagents for Green Chemistry: An Introduction. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
ZHANG, H. et al. Nanotechnology and its impact on agriculture. *Advanced Materials*, v. 31, n. 1, p. 1-18, 2019.

ZHANG, H.; LI, W.; et al. Nanotecnologia na agricultura: perspectiva e limitações.

Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 67, n. 30, p. 8215-8222, 2019.

Zhang, Q., Zhang, Z., & Li, Y. *Aplicações da nanotecnologia na agricultura: uma revisão*. *Nanotecnologia para agricultura sustentável*, v. 6, p. 18-29, 2019.