



Ano V, v.2 2025 | **submissão: 02/09/2025** | **aceito: 04/09/2025** | **publicação: 06/09/2025**

A integração entre engenharia agrônoma e cadeias de suprimentos: tratamento de sementes, agricultura de precisão e sustentabilidade nas culturas de soja e milho

The integration between agronomic engineering and supply chains: seed treatment, precision agriculture, and sustainability in soybean and corn crops

Lucas Marciano Relva - Engenheiro Agrônomo pelo Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium.

Resumo

A contínua expansão da demanda global por alimentos e biocombustíveis impõe à engenharia agrônoma o desafio de maximizar a produtividade das culturas de soja e milho mediante a otimização dos recursos naturais e tecnológicos. O presente artigo científico tem como objetivo realizar uma investigação multidisciplinar sobre a gestão dos fatores de produção em monoculturas de larga escala, analisando a intersecção entre a ecofisiologia vegetal e a eficiência da cadeia de suprimentos. A metodologia adotada consubstancia-se em uma revisão bibliográfica analítica de cunho dedutivo, amparada nos postulados da ciência dos materiais agrícolas e da logística de distribuição. O escopo do estudo aborda os mecanismos bioquímicos de proteção de plântulas via tratamento de sementes, a dinâmica de fertilidade dos solos tropicais, o impacto da aplicação de taxas variáveis orientadas por sistemas de posicionamento global e a necessidade de estruturação logística no fluxo de insumos sensíveis. Os resultados demonstram que o manejo integrado de biosoluções, quando alinhado a uma rede de distribuição que garanta a integridade físico-química dos produtos, reduz perdas sistêmicas e eleva a viabilidade do estande de plantas. Conclui-se que o domínio das variáveis agrônomicas, aliado à eficiência no fornecimento de insumos, constitui o vetor central para assegurar a resiliência produtiva e a sustentabilidade econômica exigidas pela agricultura de alta performance.

Palavras-chave: Engenharia Agrônoma. Tratamento de Sementes. Agricultura de Precisão. Cadeia de Suprimentos Agrícolas. Sustentabilidade.

Abstract

The continuous expansion of global demand for food and biofuels imposes on agronomic engineering the challenge of maximizing the productivity of soybean and corn crops by optimizing natural and technological resources. The main objective of this scientific article is to conduct a multidisciplinary investigation into the management of production factors in large-scale monocultures, analyzing the intersection between plant ecophysiology and supply chain efficiency. The methodology adopted consists of an analytical deductive literature review, supported by the postulates of agricultural materials science and distribution logistics. The scope of the study addresses the biochemical mechanisms of seedling protection via seed treatment, the fertility dynamics of tropical soils, the impact of variable rate application guided by global positioning systems, and the need for logistical structuring in the flow of sensitive inputs. The results demonstrate that the integrated management of biosolutions, when aligned with a distribution network that ensures the physicochemical integrity of the products, reduces systemic losses and increases the viability of the plant stand. It is concluded that the mastery of agronomic variables, combined with efficiency in input supply, constitutes the central vector for ensuring the productive resilience and economic sustainability required by high-performance agriculture.

Keywords: Agronomic Engineering. Seed Treatment. Precision Agriculture. Agricultural Supply Chain. Sustainability.

1. Introdução

A engenharia agrônoma atua no epicentro das transformações que visam garantir a segurança alimentar global, operando sob a premissa de que o aumento da produção agrícola deve

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

ocorrer mediante ganhos de produtividade vertical, sem a expansão indiscriminada sobre áreas de vegetação nativa. As culturas de *Glycine max* (soja) e *Zea mays* (milho) representam os alicerces dessa matriz produtiva, exigindo pacotes tecnológicos cada vez mais sofisticados para expressarem seu máximo potencial genético. No entanto, o ambiente de cultivo submete o material botânico a contínuos estresses abióticos, como o déficit hídrico e oscilações térmicas severas, além de estresses bióticos representados pela competição com plantas invasoras e o ataque de fitopatógenos. A mitigação dessas adversidades demanda a formulação de estratégias que englobem o tratamento prévio das sementes, o manejo assertivo da nutrição mineral e a adoção de técnicas de monitoramento espacial. A complexidade dessas intervenções exige que o profissional não atue de forma isolada no campo, mas compreenda as variáveis fisiológicas e químicas que determinam o comportamento das plantas sob diferentes regimes de manejo. A literatura científica demonstra que a eficiência no estabelecimento da lavoura dita a capacidade de interceptação de luz e o acúmulo de biomassa nas fases fenológicas subsequentes.

Embora o avanço na formulação de insumos agrícolas tenha proporcionado o desenvolvimento de moléculas químicas mais seletivas e agentes biológicos de alta viabilidade, a transferência dessas tecnologias dos laboratórios para o canteiro de semeadura enfrenta restrições de ordem logística e operacional. A degradação de inoculantes microbiológicos devido ao armazenamento inadequado ou o atraso na entrega de fertilizantes de base durante a estreita janela de plantio evidenciam que a eficácia agrônômica depende estritamente da infraestrutura de suprimentos. Autores como Ballou (2004) destacam a importância do fluxo de informações e materiais na manutenção da integridade dos produtos. O presente artigo investiga essa correlação direta entre a aplicação da ciência agrônômica nas frentes de plantio e a infraestrutura necessária para viabilizá-la. A hipótese que orienta o estudo sustenta que a otimização da produtividade em monoculturas de larga escala requer a integração do monitoramento agrônômico de precisão com a padronização dos processos de distribuição. Dessa forma, objetiva-se demonstrar que o conhecimento da fisiologia das culturas, aliado à gestão técnica dos insumos, consolida a sustentabilidade do sistema produtivo, reduzindo perdas econômicas e minimizando o impacto ambiental das operações agrícolas.

2. Fisiologia da germinação e a ciência do tratamento de sementes

A semente constitui a unidade de dispersão e perpetuação das espermatófitas, abrigando o embrião vegetal e as reservas metabólicas necessárias para o estabelecimento autotrófico da plântula. O processo de germinação inicia-se com a embebição, caracterizada pela rápida absorção de água que reidrata os tecidos e reativa o metabolismo enzimático, culminando no alongamento da radícula através do tegumento. Durante esta fase inicial, a semente encontra-se extremamente vulnerável ao ataque de microrganismos patogênicos habitantes do solo, como os fungos dos gêneros *Fusarium*,

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

Pythium e *Rhizoctonia*, que causam o tombamento de plântulas e a podridão radicular. O tratamento de sementes (TS) atua como uma barreira de proteção química e biológica aplicada diretamente sobre o tegumento, impedindo a penetração das hifas fúngicas e o estabelecimento da infecção. A formulação de caldas fungicidas envolve o uso de moléculas de contato, que promovem a desinfecção externa do propágulo, e moléculas sistêmicas, que são absorvidas pelo embrião e translocadas pelo xilema, estendendo o período de proteção para os tecidos aéreos recém-formados.

A escolha entre o Tratamento de Sementes Industrial (TSI) e o tratamento executado na propriedade rural (*On-Farm*) envolve análises criteriosas de dosagem, homogeneidade e viabilidade de ingredientes ativos. O TSI é realizado em unidades de beneficiamento equipadas com maquinários que controlam o volume de calda em proporção exata ao peso do lote, adicionando polímeros de recobrimento que fixam os ingredientes ativos, reduzem a liberação de poeira tóxica e melhoram a fluidez das sementes nos discos dos dosadores das plantadoras. Em contrapartida, o tratamento *On-Farm* oferece flexibilidade na formulação do coquetel químico, permitindo a adição de produtos específicos poucas horas antes do plantio. Esta técnica é particularmente vantajosa para a aplicação de produtos de natureza biológica, como bactérias diazotróficas, cuja sobrevivência é drasticamente reduzida quando o tratamento é realizado com meses de antecedência. A execução desta modalidade exige calibragem rigorosa das betoneiras ou tratadoras de rosca sem-fim para evitar a abrasão mecânica do tegumento e a superdosagem de solventes que poderiam causar fitotoxicidade ao embrião.

A inserção de agentes biológicos e promotores de crescimento no recobrimento das sementes representa um avanço significativo na indução de resistência a estresses abióticos. A inoculação da cultura da soja com cepas selecionadas de *Bradyrhizobium japonicum* estabelece uma relação simbiótica na qual o procarionte coloniza o sistema radicular e forma nódulos capazes de converter o nitrogênio molecular atmosférico em compostos amoniacais assimiláveis pela planta. Este processo, denominado Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), supre as altas exigências metabólicas da cultura para a síntese de aminoácidos e proteínas, eliminando a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos de alto custo energético. No caso de gramíneas como o milho, a utilização de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal, a exemplo do *Azospirillum brasilense*, induz a produção de fitormônios como o ácido indolacético (AIA), o qual estimula a proliferação de pelos radiculares, ampliando o volume de solo explorado e elevando a capacidade de interceptação de água e nutrientes solúveis.

A eficiência destas biossoluções exige que a formulação do tratamento contemple a compatibilidade físico-química entre os agentes biológicos e os defensivos sintéticos. A aplicação conjunta de fungicidas de reação ácida com inoculantes líquidos pode causar a lise celular das bactérias antes mesmo da sementeira. O uso de aditivos osmo protetores e agentes estabilizantes na calda visa proteger a integridade das membranas celulares dos microrganismos durante o processo de

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

dessecação do polímero sobre a semente. Pesquisas na área de tecnologia de sementes avaliam o índice de sobrevivência bacteriana nas primeiras horas pós-tratamento, demonstrando que a ordem de adição dos produtos na máquina tratadora altera o resultado. O correto posicionamento dos biodefensivos exige, portanto, protocolos agrônômicos estritos que garantam a inocuidade dos químicos sobre os organismos vivos, assegurando que o número de Unidades Formadoras de Colônias (UFC) atinja o limite mínimo viável estabelecido pelas normativas regulamentares.

A proteção inicial da plântula determina a homogeneidade do estande de plantas, variável que influencia diretamente a arquitetura do dossel vegetativo e a capacidade de fechamento das entrelinhas. Falhas na emergência geram espaços vazios que reduzem a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e favorecem a germinação de plantas daninhas fotoblásticas positivas. O suprimento adequado de micronutrientes, notadamente molibdênio e cobalto, fornecidos diretamente via tegumento da semente, garante o funcionamento das enzimas nitrogenase e nitrato redutase nos processos simbióticos. Observa-se que a adoção de um programa de tratamento de sementes cientificamente embasado constitui uma ferramenta de manejo que antecede o plantio, atuando preventivamente contra as restrições bióticas do solo e conferindo à cultura o vigor necessário para estabelecer um sistema radicular profundo e resiliente, requisito fundamental para a sustentação das altas produtividades em sistemas agrícolas extensivos.

3. Dinâmica de nutrientes, fertilidade do solo e o manejo de biossoluções

A compreensão da química do solo e dos fenômenos de adsorção e dessorção de íons é o princípio basilar para o manejo da fertilidade em áreas de produção intensiva. Os latossolos e argissolos que predominam no bioma Cerrado apresentam características mineralógicas específicas, incluindo alta concentração de óxidos de ferro e alumínio, argilas de baixa atividade (caulinita) e pH naturalmente ácido. Estas propriedades conferem ao solo uma elevada capacidade de fixação de fósforo, processo no qual os ânions fosfato formam compostos insolúveis com o ferro e o alumínio precipitados, tornando o nutriente indisponível para a absorção radicular. Segundo Malavolta (2006), a correção da acidez mediante a aplicação de calcário eleva o pH, neutraliza o alumínio tóxico que inibe o crescimento das raízes e aumenta a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) efetiva. A aplicação de gesso agrícola complementa o manejo ao promover a descida de cálcio e sulfato para as camadas subsuperficiais do perfil do solo, mitigando o impedimento químico em profundidade e permitindo que as raízes busquem água durante períodos de restrição pluviométrica.

O suprimento de macronutrientes primários (nitrogênio, fósforo e potássio) obedece a curvas de absorção que variam conforme a fenologia das culturas. O milho requer altas taxas de reposição nitrogenada para a síntese de clorofila e a definição do número de óvulos nas espigas. A dinâmica do nitrogênio no solo é complexa e suscetível a múltiplas vias de perda; o uso de ureia na adubação de

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

cobertura pode resultar em volatilização de amônia caso a enzima urease hidrolise a molécula rapidamente na superfície do solo seco. Para contornar esse processo, a engenharia de fertilizantes desenvolveu inibidores de urease e tecnologias de recobrimento polimérico que retardam a liberação do nutriente, sincronizando a disponibilidade do elemento no solo com a taxa de extração pela cultura. O manejo do potássio exige atenção à dinâmica de lixiviação em solos de textura arenosa, requerendo parcelamentos da dose para evitar que as fortes precipitações carreguem o cátion para camadas inferiores, distantes da zona de interceptação radicular.

No âmbito da biologia dos solos, o conceito de fertilidade evoluiu para integrar a atividade da microbiota na ciclagem e mineralização dos nutrientes. O uso contínuo de práticas de agricultura conservacionista, aliadas à adoção de bio-soluções, promove o reestabelecimento das redes tróficas edáficas. O desenvolvimento de produtos à base de *Bacillus megaterium* ou fungos micorrízicos arbusculares tem o objetivo de solubilizar frações do fósforo fixado nas argilas ou acessar microporos do solo inacessíveis aos pelos radiculares. A secreção de ácidos orgânicos e fosfatases por esses microrganismos rompe as ligações dos fosfatos inorgânicos insolúveis, disponibilizando ortofosfatos para a solução da rizosfera. Esta engenharia microbiológica permite otimizar a eficiência da adubação fosfatada sintética aplicada no sulco de plantio, convertendo um estoque de nutrientes passivo e indisponível em um recurso acessível à planta, o que reflete diretamente na economia de insumos e na redução da dependência de mineração de rochas fosfáticas.

A nutrição mineral de plantas contempla também a regulação de distúrbios fisiológicos através da aplicação de fertilizantes foliares formulados com micronutrientes complexados ou quelatados com aminoácidos. Durante períodos de elevado estresse oxidativo, como os provocados por déficits hídricos transitórios ou a desintoxicação após a aplicação de herbicidas sistêmicos, o metabolismo da cultura redireciona sua energia para a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). A aplicação de elementos como zinco, cobre e manganês via pulverização foliar atua diretamente na ativação do sistema enzimático antioxidante da planta, incluindo a superóxido dismutase. O boro desempenha papel crucial na estabilidade da parede celular e na formação do tubo polínico durante a fase de florescimento pleno; a ausência transitória desse elemento no tecido foliar pode ocasionar o abortamento de flores e a má formação de vagens na cultura da soja. O posicionamento técnico desses fertilizantes especiais no cronograma de pulverização garante o suporte fisiológico necessário para a translocação de carboidratos.

O manejo da fertilidade do solo consolidou-se como um processo contínuo de construção de um perfil quimicamente equilibrado e biologicamente supressivo a patógenos. A reposição de nutrientes não atende exclusivamente à demanda da cultura sucessora, mas visa à manutenção de níveis críticos adequados ao sistema de rotação de culturas. A palhada deixada por gramíneas de cobertura, como as espécies do gênero *Urochloa*, recicla volumes significativos de potássio que são

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

liberados gradualmente durante a decomposição da matéria seca. A estruturação do solo, promovida pelo sistema radicular fasciculado profundo dessas forrageiras, melhora a aeração e a taxa de infiltração de água, evitando o escoamento superficial e a erosão laminar. Assim, o agrônomo atua como o gestor desse equilíbrio termodinâmico, calculando as taxas de extração e exportação de nutrientes nos grãos colhidos para prescrever fórmulas corretivas que sustentem a longevidade dos recursos edáficos e o teto produtivo do agronegócio.

4. A implementação da agricultura de precisão e da ciência de dados no campo

A transição da agricultura de larga escala para os modelos de Agricultura de Precisão (AP) reconfigurou os processos de tomada de decisão no manejo de culturas agrônômicas. O conceito fundamenta-se na premissa de que a variabilidade espacial e temporal das propriedades físico-químicas do solo e do vigor das plantas é um fenômeno intrínseco aos ecossistemas cultivados, o que torna a aplicação de insumos em doses médias uniformes uma prática geradora de ineficiências agrônômicas e econômicas. O mapeamento dessa heterogeneidade inicia-se pela amostragem de solo em grade ou por zonas de manejo, utilizando receptores do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) para georreferenciar cada ponto de coleta. A análise geoestatística desses dados, frequentemente através da krigagem, permite a geração de mapas de interpolação que evidenciam o gradiente de fertilidade da área. A integração com sensores de condutividade elétrica aparente, rebocados por quadriciclos, revela variações na textura do solo e na capacidade de retenção de umidade, oferecendo um diagnóstico tridimensional do perfil edáfico a ser cultivado.

A aplicação da taxa variável (*Variable Rate Application* - VRA) converte os mapas de prescrição digitais em operações mecânicas em tempo real. Monitores de plantio e pulverizadores autopropelidos equipados com sistemas hidráulicos de precisão e bicos de controle PWM (*Pulse Width Modulation*) recebem os arquivos no formato *shapefile* e alteram o volume de sementes, corretivos ou fertilizantes liberados a cada metro percorrido. Em áreas que o mapa indica argila densa e alta fertilidade, o computador de bordo eleva a população de sementes de milho por hectare para explorar o potencial hídrico; em reboleiras arenosas e de baixo potencial, a taxa de semeadura e a dose de nitrogênio são automaticamente reduzidas para prevenir a competição intraespecífica em cenários de déficit de água. Este ajuste automático garante que o insumo seja posicionado de acordo com a capacidade suporte de cada metro quadrado da fazenda, otimizando o retorno marginal sobre o investimento em biotecnologia e adubação sintética.

O sensoriamento remoto consolidou-se como o método mais rápido e não destrutivo para a avaliação da biomassa e da atividade fotossintética da cultura ao longo de seu ciclo vegetativo e reprodutivo. Imagens orbitais captadas por satélites de alta revisita ou levantamentos aéreos realizados por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) dotados de câmeras multiespectrais

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

registram a refletância da luz nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho visível. O cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) permite detectar oscilações na concentração de clorofila foliar antes que o olho humano identifique o sintoma de clorose. Áreas do talhão que apresentam baixos índices de refletância indicam falhas de germinação, estresse hídrico agudo, compactação subsuperficial ou incidência de pragas mastigadoras. A partir dessas imagens, o agrônomo desloca equipes de monitoramento diretamente para os polígonos afetados, reduzindo o tempo de prospecção no campo e acelerando a adoção de medidas curativas de controle químico ou biológico.

As tecnologias de telemetria embarcada e de piloto automático transformaram a dinâmica das operações mecanizadas, reduzindo a fadiga dos operadores e garantindo precisão milimétrica nas trajetórias. O direcionamento automático dos tratores, corrigido por antenas de sinal RTK (*Real Time Kinematic*), permite a implantação do Tráfego Controlado de Máquinas (TCM). Nessa técnica, todas as operações de plantio, pulverização e colheita ocorrem exatamente sobre as mesmas trilhas virtuais ou rodados georreferenciados, safra após safra. Ao restringir o pisoteio dos pesados pneus a linhas de trânsito específicas, preserva-se a estrutura porosa do solo nas faixas de cultivo, evitando a compactação física que inviabiliza o desenvolvimento do sistema radicular da soja. Além disso, a eliminação da sobreposição de faixas de aplicação (*remonte*) nos pulverizadores impede que seções das plantas recebam dosagens em dobro de herbicidas, prevenindo a fitotoxidez que atrasaria o metabolismo foliar.

O volume de dados gerado por essa infraestrutura tecnológica insere o setor agrícola na era do *Big Data*. Monitores de produtividade instalados no elevador de grãos das colheitadeiras medem instantaneamente o fluxo de massa e a umidade do material colhido a cada segundo, gerando os definitivos mapas de colheita. Estes mapas representam o registro fático do sucesso ou do fracasso das intervenções agrônômicas adotadas ao longo de toda a safra. O cruzamento das camadas de dados de produtividade final com os mapas originais de aplicação de calcário, declividade, precipitação acumulada e vigor vegetativo alimenta algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina. Tais modelos analíticos identificam correlações complexas entre as variáveis e recomendam ajustes nos limites de população de plantas e doses de adubação para o ciclo do ano seguinte, instaurando um processo contínuo de aprimoramento produtivo baseado em dados empíricos e análises estatísticas rigorosas.

5. Manejo integrado de pragas, plantas daninhas e a fitossanidade da lavoura

A integridade do índice de área foliar e a manutenção da saúde dos tecidos vasculares das plantas constituem fatores determinantes para a translocação de carboidratos aos drenos reprodutivos (vagens e espigas). A presença de organismos competidores e patógenos no agroecossistema requer

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

a implementação de um Manejo Integrado de Pragas e Doenças (MIP/MID), que estabelece métodos sistemáticos de amostragem populacional e define o momento exato de intervenção por meio do Nível de Ação (NA) e do Nível de Dano Econômico (NDE). A pulverização baseada no calendário cronológico ou na adoção profilática desmedida é substituída pelo monitoramento entomológico contínuo por meio da batida de pano e levantamento de danos foliares. Insetos sugadores, como os percevejos da espécie *Euschistus heros*, atacam as vagens da soja durante o estágio de enchimento de grãos, injetando toxinas que causam a má formação das sementes, reduzem o vigor germinativo e favorecem a entrada de fungos necrotróficos que comprometem os padrões de qualidade na classificação industrial do produto colhido.

O avanço da biotecnologia ofereceu à agronomia cultivares geneticamente modificadas que expressam proteínas cristalinas inseticidas derivadas da bactéria *Bacillus thuringiensis* (tecnologia Bt). A inserção destes genes no genoma da soja e do milho confere resistência endógena contra as principais larvas de lepidópteros desfolhadores e brocas do colmo, como a *Spodoptera frugiperda* e a *Helicoverpa armigera*. A ingestão do tecido vegetal pelas lagartas suscetíveis resulta na ligação da toxina Bt a receptores específicos no intestino médio do inseto, provocando a ruptura osmótica do epitélio e a morte do patógeno. Para retardar a evolução de resistência genética das populações de insetos a essas toxinas, o plantio de Áreas de Refúgio — blocos ou faixas de cultivares não-Bt semeados proporcionalmente à área total — é imperativo. O cruzamento entre os insetos resistentes, que eventualmente sobrevivem na lavoura Bt, e os insetos suscetíveis, preservados na área de refúgio, garante a diluição do alelo de resistência na população, preservando a vida útil e a durabilidade da tecnologia biotecnológica.

O manejo de plantas daninhas enfrenta o complexo desafio de conter a proliferação de espécies botânicas que desenvolveram mecanismos de resistência a herbicidas de amplo espectro de ação, como os inibidores da enzima EPSPs. O uso ininterrupto da mesma molécula ativa exerceu intensa pressão de seleção, favorecendo biótipos de *Conyza spp.* (buva), *Digitaria insularis* (capim-amargo) e *Amaranthus spp.* (caruru), capazes de metabolizar a molécula herbicida ou apresentar mutações no sítio-alvo enzimático. O controle dessas invasoras agressivas, que competem vigorosamente por água, luz solar e nitrogênio no início do ciclo da cultura, demanda a adoção de programas de manejo que envolvam a rotação de mecanismos de ação química. A aplicação de herbicidas pré-emergentes inibidores das enzimas PPO, ALS ou inibidores de divisão celular diretamente no solo forma um filme residual protetor que impede a germinação do banco de sementes invasoras, oferecendo um período de controle inicial limpo (fechamento no limpo) até que o dossel da soja feche as entrelinhas e impeça a passagem de radiação solar para o solo.

As doenças fúngicas epidêmicas, especialmente a ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), exigem programas fungicidas severos compostos por misturas de triazóis, estrobilurinas

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

e carboxamidas, acompanhados de fungicidas multissítios (protetores) à base de mancozebe ou clorotalonil. O patógeno biotrófico coloniza o tecido foliar e destrói o aparato fotossintético, gerando pústulas uredinais que rompem a epiderme, aumentam a taxa transpiratória descontrolada e aceleram a senescência e desfolha precoce da cultura, impedindo o acúmulo final de massa seca nos grãos. A estratégia fitossanitária requer pulverizações preventivas ou no primeiríssimo estágio da infecção, balizadas por modelos climáticos e pelo monitoramento dos esporos eólicos captadores instalados na região. O uso de tecnologia de aplicação avançada, regulando a pressão de trabalho, a vazão e o diâmetro da gota gerada pelos bicos de pulverização cônico ou leque, é vital para que a calda fúngica atravesse a barreira das folhas do terço superior da planta e consiga depositar o ingrediente ativo no terço inferior, onde o microclima úmido favorece a germinação precoce dos esporos.

O controle biológico inundativo consolida-se como ferramenta complementar no arsenal do MIP, mitigando os efeitos deletérios da aplicação contínua de inseticidas de amplo espectro que dizimam a fauna de insetos polinizadores e predadores benéficos. A liberação programada de microvespas parasitoides do gênero *Trichogramma* por meio de VANTs permite que as vespas localizem e parasitem os ovos das mariposas de pragas antes mesmo da eclosão da lagarta. Em consonância, aplicações foliares de fungos entomopatogênicos como a *Beauveria bassiana* ou *Metarhizium anisopliae* infectam o inseto hospedeiro via contato com a cutícula, germinando e invadindo sua hemocele sob condições de elevada umidade atmosférica. O agrônomo calibra a integração temporal dessas ferramentas; a supressão inicial biológica preserva os inimigos naturais e estabiliza a dinâmica populacional, enquanto as aplicações de agroquímicos ficam reservadas para os picos de pressão extrema que ameaçam romper a capacidade metabólica de tolerância e recuperação foliar da cultura.

6. Cadeia de suprimentos agrícolas e a gestão logística dos fatores de produção

A execução pontual e precisa das complexas recomendações agrônômicas no campo é intrinsecamente dependente da integridade e fluidez da rede de distribuição e fornecimento de insumos. A cadeia de suprimentos agrícolas caracteriza-se por acentuada sazonalidade, concentração de demanda em janelas temporais restritas por regimes pluviométricos e pela necessidade de preservar formulações químicas e microbiológicas sensíveis à degradação. As formulações elaboradas por Ballou (2004) acerca do gerenciamento do fluxo de materiais aplicam-se diretamente ao planejamento dos canais de distribuição de sementes, fertilizantes e biológicos. O atraso na entrega de lotes de sementes pré-tratadas com polímeros impede o aproveitamento da umidade ótima do solo gerada pelas primeiras chuvas da primavera, atrasando a data de semeadura e deslocando a fase sensível de pendoamento do milho safrinha para os meses de elevado déficit hídrico e risco de geadas precoces, o que reduz substancialmente o teto produtivo estipulado pelo zoneamento agrícola de risco climático.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

A distribuição de insumos de base biológica, como inoculantes líquidos contendo cepas vivas de bactérias fixadoras de nitrogênio ou fungos antagonistas de nematoides, impõe severas restrições termodinâmicas à logística de armazenamento e transporte. A viabilidade celular desses organismos decresce exponencialmente quando expostos a temperaturas acima dos limiares recomendados pelos fabricantes ou à radiação solar direta nos galpões de revendas. A infraestrutura de armazenagem dos centros de distribuição regionais e as câmaras frias estruturadas nas cooperativas rurais precisam manter um rigoroso controle de climatização. A falta de capacitação das equipes operacionais de logística no manuseio de agentes microbianos vivos resulta na inutilização total do princípio ativo antes de sua chegada à caixa de mistura do produtor rural. O transporte desses insumos sob o regime *Just-in-Time* exige sistemas integrados de previsão de demanda que conectem os relatórios agrônômicos de planejamento de safra das propriedades com a capacidade de formulação das indústrias agroquímicas e biológicas.

O fluxo de macrofertilizantes granulados (cloreto de potássio, superfosfato simples, ureia) mobiliza volumes físicos continentais que dependem das malhas de integração rodoferroviária e hidroviária. Os portos marítimos, que recebem a carga de minérios importados, precisam apresentar alta cadência de descarga para evitar o congestionamento de berços de atracação e taxas de sobre estadia. A gestão do frete desses materiais pesados em direção ao Meio-Oeste produtor demanda análises de engenharia de rotas para assegurar a chegada sincronizada dos *big bags* aos galpões das fazendas. A gestão de estoques intermediários nas distribuidoras e revendas especializadas é essencial para amortecer a volatilidade dos preços das *commodities* internacionais e suprir o produtor em situações de demanda imediata não programada, como o replantio de áreas assoladas por granizo. O dimensionamento adequado das frotas de transporte rodoviário, guiado por algoritmos de roteirização, evita a ociosidade do maquinário e minimiza os custos operacionais (OPEX) do frete final embutido na saca colhida.

O treinamento técnico contínuo das equipes comerciais e representantes que atuam nas distribuidoras e cooperativas atua como o elo de tradução tecnológica entre a pesquisa científica dos fabricantes e a realidade prática da fazenda. A comercialização de herbicidas seletivos, fungicidas multissítios e adubos de liberação gradual não se caracteriza como uma venda de produtos em prateleira, mas sim como a prescrição consultiva de soluções sistêmicas baseadas no diagnóstico de laudos laboratoriais de solos e análises fitopatológicas. O letramento das equipes da cadeia de distribuição sobre o mecanismo de ação das moléculas químicas previne a recomendação de caldas incompatíveis que, ao serem misturadas no tanque do pulverizador, poderiam precipitar compostos, entupir filtros e bicos, ou inativar o ingrediente ativo principal devido à elevação excessiva do pH da água de preparo. A capacitação transforma os centros regionais de distribuição em polos avançados de inteligência e extensão agrônômica, fortalecendo a segurança na tomada de decisão dos produtores.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

O emprego de sistemas digitais de *Enterprise Resource Planning* (ERP) e *Warehouse Management System* (WMS) pelas empresas do setor de insumos automatiza o controle da validade química dos agrotóxicos estocados por meio de protocolos de separação Primeiro a Vencer, Primeiro a Sair (FEFO). A complexidade fiscal inerente à circulação de produtos controlados, classificados em categorias toxicológicas rigorosas pelos órgãos de vigilância agropecuária e ambiental, requer rastreabilidade sistêmica contínua dos lotes comercializados. A digitalização das etapas logísticas reduz drasticamente a ocorrência de produtos devolvidos por avarias físicas ou por vencimento de eficácia agrônômica, blindando as margens de lucro dos distribuidores. Essa sincronia estrutural no suprimento de fatores de produção garante que o arsenal biológico, genético e químico desenvolvido pela engenharia agrícola alcance o solo e a folha das monoculturas em estado puro, garantindo o metabolismo da biomassa vegetal que sustenta os imensos fluxos de colheita.

7. Conclusão

A investigação sistêmica e aprofundada dos mecanismos que regem o estabelecimento, o desenvolvimento vegetativo e a proteção sanitária das culturas de soja e milho conduzem a conclusões fáticas e estruturais sobre a moderna engenharia de produção em larga escala. A análise rigorosa da literatura e dos fenômenos ecofisiológicos comprova peremptoriamente que o aumento contínuo do potencial produtivo não se apoia mais em intervenções agrônômicas baseadas na intuição empírica, mas sim na adoção da metrologia científica, do monitoramento espectral contínuo e na gestão estequiométrica dos corretivos de solo e defensivos. A complexidade do agroecossistema produtivo exige que o engenheiro agrônomo atue como um analista termodinâmico, calculando perdas sistêmicas de produtividade oriundas da competição invasora, avaliando o estresse biótico infligido por populações crescentes de lepidópteros e mitigando o esgotamento mineral da camada arável do perfil edáfico.

A etapa do tratamento de sementes, dissecada ao longo das seções deste estudo, revela-se como a intervenção profilática primária de maior retorno sobre o capital empregado, ditando a homogeneidade arquitetônica do estande e assegurando a vitalidade do tegumento no ambiente hostil e obscuro da rizosfera profunda. A escolha criteriosa entre as formulações industriais automatizadas e as customizações rurais, acrescidas da delicada inoculação biológica promotora de simbiose radicular bacteriana, demonstra que a proteção química e hormonal no momento do plantio define o teto biológico da cultura. Paralelamente, o estudo físico-químico da dinâmica das reações de fertilidade mineral certificou que o uso combinado de calcário profundo, gesso lixiviador e a liberação lenta de nitrogênio formam o substrato indispensável para suportar o acúmulo massivo de fotoassimilados e proteínas exportadas nos grãos finais comercializados.

A consolidação irrefutável e a penetração massiva das tecnologias digitais englobadas sob o

Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

paradigma da agricultura de precisão transformaram a variabilidade espacial das fazendas em um ativo manejável. A utilização de algoritmos de krigagem para o desenho de mapas de prescrição e a adoção cirúrgica da taxa variável de sementes e nutrientes corrigem as anomalias topográficas em metros quadrados, extinguindo a prática dispendiosa e ineficaz da distribuição em taxas médias uniformes. A integração tática de sinais de telemetria baseados em RTK para o tráfego controlado, aliada à detecção precoce de lesões fúngicas foliares ou déficit estomático hídrico via reflectância de drones multiespectrais, elevou a capacidade de intervenção do engenheiro a um grau de precisão métrica que elimina o retrabalho, poupa formulações onerosas e evita a deriva indesejada de gotículas sobre os complexos de preservação ambiental permanente ripários.

O manejo integrado de organismos invasores patogênicos demonstrou que a dependência exclusiva da erradicação química em massa e de ingredientes de amplo espectro gerou a severa seleção de mutações genéticas de resistência no banco de ervas daninhas e na biologia reprodutiva das lagartas desfolhadoras das espigas e folhas. A preservação vital e prolongada da eficiência biotecnológica das variedades transgênicas expressoras de proteínas tóxicas depende estrita e obrigatoriamente da implantação matemática das áreas de refúgio isoladas susceptíveis e da conservação minuciosa do ecossistema habitado pelos insetos benéficos microparasitoides introduzidos pelo controle biológico sistêmico. O rodízio do mecanismo de ação celular dos defensivos sistêmicos paralisa a quebra de proteção enzimática e garante que o potencial destrutivo fúngico das endemias das folhas inferiores seja sufocado no período exato de umidade.

A análise profunda da cadeia de suprimentos provou, de maneira contundente, que o domínio técnico no interior das porteiras perde sua validade teórica e econômica se a infraestrutura logística e de armazenamento dos insumos sensíveis sucumbir a ineficiências de planejamento, prazos falhos, rotas desestruturadas e gargalos de transporte de longo curso em rodovias precárias. A sobrevivência das formulações bacterianas frias até a câmara de inoculação e a distribuição milimétrica *Just-in-Time* dos lotes densos de macronutrientes dependem da estruturação analítica dos sistemas operacionais e da alta fluidez no agendamento dos processos alfandegários portuários. O treinamento técnico corporativo sistemático e contínuo para o letramento da extensa rede das centrais cooperativas de distribuição difunde a base científica da recomendação de campo e assegura a padronização exata.

Conclui-se, portanto, que a engenharia agrônoma aplicada às monoculturas em larga escala opera em um ambiente complexo e multifatorial, onde a biologia molecular vegetal, a ciência computacional de dados e o controle estatístico logístico estão intrinsecamente e indissociavelmente fundidos e interligados no processo da geração do volume final de colheitas globais. O controle severo sobre as interações e trocas do solo, o manuseio inteligente dos defensores e a implantação sistêmica do projeto de *supply chain* formam o esteio da segurança contínua nacional. O avanço desta ciência assegura e determina a preservação econômica da margem rentável financeira estrita do produtor,



Ano V, v.2 2025 | submissão: 02/09/2025 | aceito: 04/09/2025 | publicação: 06/09/2025

pavimentando solidamente e de maneira sustentável as exigentes fundações do progresso e do desenvolvimento ininterrupto de safras contínuas vigorosas que ancoram os mercados mundiais das exportações agrárias limpas contemporâneas.

Referências

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial: Transportes, Administração de Materiais e Distribuição Física**. Tradução de Hugo T. Y. Yoshizaki. Porto Alegre: Bookman, 2004.

BORÉM, A. et al. **Tecnologia de Sementes**. Viçosa: Editora UFV, 2015.

EMBRAPA. **Agricultura de Precisão: Resultados de um Novo Olhar**. Brasília: Embrapa, 2014.

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.