

CAPÍTULO 2

Monitoramento de risco, adaptação e sustentabilidade da agricultura nacional

Francislene Angelotti – Vanderlise Giongo – Carlos Eduardo Pacheco Lima – Danilton Luiz Flumignan – Rubens Sonsol Gondim – José Ricardo Macedo Pezzopane. – Patrícia Perondi Anção Oliveira – Wagner Bettiol – Giampaolo Queiroz Pellegrino – Fabia de Mello Pereira

Introdução

Os cenários de mudança do clima apontam que o aumento de 1,5 °C na temperatura média global é inevitável (IPCC, 2022). No Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), os cientistas reforçaram que, mesmo com os compromissos climáticos atuais, é provável que o aquecimento global ultrapasse 1,5 °C nas próximas décadas. Além do aumento da temperatura, prevê-se maior frequência de eventos extremos, como secas severas, chuvas torrenciais e ciclones tropicais, que podem provocar queda da produtividade, redução das áreas aptas ao cultivo agrícola e aumento na ocorrência de pragas e doenças.

Nas regiões tropicais, em cenários de médias e altas emissões de gases de efeito estufa (GEE), projeta-se que o aquecimento global resultará em condições climáticas sem precedentes até meados ou final do século XXI, com impacto direto no rendimento das culturas tropicais. Assim, o aumento na frequência de eventos climáticos extremos no Brasil evidencia a necessidade urgente de planejamento estratégico e de investimentos em ações que reduzam a vulnerabilidade dos sistemas de produção no presente e assegurem a competitividade da economia no futuro.

O impacto da mudança do clima nesses sistemas dependerá da capacidade de implementar estratégias de adaptação eficazes. Diante do elevado grau de vulnerabilidade do setor agropecuário, é imprescindível



identificar gargalos, fomentar investimentos em pesquisa e desenvolvimento e gerar dados que possam apoiar um planejamento estruturado e estratégico. Agir com rapidez e clareza na adoção de medidas que aumentem a capacidade adaptativa dos sistemas de cultivo, fortalecendo sua resiliência diante das condições climáticas adversas, será imperativo.

Além disso, é essencial promover uma atuação em rede, assegurando que os atores envolvidos no processo de tomada de decisão estejam bem informados e compreendam a complexidade dos desafios. Essa abordagem deve ser transversal, indo além dos limites da propriedade agrícola e abrangendo a infraestrutura de transporte, logística, energia e a definição de indicadores de eficiência e performance, criando um ambiente favorável para a sustentabilidade da agricultura nacional.

Nesse sentido, a pesquisa agropecuária brasileira tem avançado no enfrentamento das mudanças do clima, por meio do desenvolvimento e implementação de medidas de adaptação que promovem uma produção sustentável. Essas pesquisas estão voltadas para identificação de lacunas de informação e do conhecimento, desenvolvimento de modelos regionais e cenários de risco climático, uso sustentável dos recursos naturais, redução da pressão sobre os biomas, proteção da biodiversidade, recuperação de áreas degradadas e restauração de ecossistemas em apoio à sustentabilidade dos sistemas produtivos. Também têm sido desenvolvidas novas estratégias e soluções tecnológicas de produção compatíveis com os cenários de riscos climáticos futuros, incluindo o apoio ao desenvolvimento de pesquisa genética, conservação de recursos hídricos e do solo, capacitação e manejo dos serviços ecossistêmicos.

Os riscos climáticos inerentes ao ambiente tropical exigem do Brasil uma postura estratégica, assegurando que o desenvolvimento tecnológico, o diálogo e a capacitação dos tomadores de decisão envolvidos ocorram de forma coordenada e integrada. A adaptação aos impactos da mudan-

ça do clima é uma ação estratégica de desenvolvimento econômico e crucial para a manutenção da competitividade do País. Para isso, é necessário adotar uma abordagem multifuncional, caracterizada por uma produção que promova a conservação dos solos, da água, da biodiversidade e dos processos ecossistêmicos, considerando as especificidades locais e regionais. Essas ações também devem contribuir para o controle das emissões dos GEE, por meio da adoção de sistemas agropecuários regenerativos (Brasil, 2023).

Entre as estratégias prioritárias, destacam-se o melhoramento genético para o desenvolvimento de cultivares tolerantes a estresses abióticos e bióticos decorrentes da mudança do clima, a melhoria da ambiência por meio de sistemas que reduzam a temperatura interna, a proteção contra chuvas intensas e o aumento da disponibilidade hídrica também. São exemplos dessas estratégias o uso de cultivo protegido, os cultivos indoor, o manejo racional da irrigação, o uso de mulchings (plásticos ou de resíduos vegetais), o reúso e a reservação de água, bem como sistemas de cultivo sem solo, como a hidroponia e a aeroponia, entre outros.

O primeiro passo para adaptação consiste em entender a vulnerabilidade e o risco dos sistemas de produção tanto frente ao clima corrente quanto ao clima projetado para o futuro, identificando, por exemplo, a melhor época de plantio das culturas e a ocorrência de problemas fitossanitários. A partir da análise de risco, medidas preventivas de curto, médio e longo prazo precisarão ser implementadas. Essas medidas devem contemplar a integração de tecnologias, incluindo o uso combinado de cultivares tolerantes ao aumento da temperatura e ao déficit hídrico, práticas de conservação do solo (como uso de cobertura morta, rotação de culturas e do plantio direto), manejo racional da água e de insumos, uso de microrganismos promotores de crescimento e agentes de controle biológico e diversificação e integração de cultivos.

Práticas que priorizem a conservação do ecossistema contribuem para o enfrentamento da mudança

do clima. A adoção coordenada dessas tecnologias pode potencializar a capacidade adaptativa dos sistemas de produção, promovendo a segurança alimentar e sustentabilidade (Figura 2.1).

Entretanto, o processo de adaptação é contínuo, e as soluções propostas precisarão ser realizadas e aprimoradas dentro do contexto local e regional, bem como em função do cultivo, o que reforça o papel da pesquisa agropecuária.

Panorama atual – risco climático na agropecuária

A exposição dos cultivos aos riscos climáticos é uma realidade inerente à própria atividade agrícola, portanto é notório que o setor agrícola figure entre os mais vulneráveis aos impactos cor-

rentes e futuros da mudança do clima. Por si só, essa condição já imputa ao setor a necessidade de investimento significativo em capacitação e na compreensão dos desafios inerentes não só à variabilidade natural do clima, mas também das transformações já provocadas pela mudança do clima nas dinâmicas no campo – e que continuarão impactando de forma importante o setor agrícola ao longo das próximas décadas. Assim faz-se necessário a incorporação de conhecimentos e tecnologias na prática diária, a fim de conviver com esses riscos e reduzir seus efeitos.

Ray et al. (2015) estudaram, ao longo de três décadas (1979–2008), a influência da variabilidade interanual das condições climáticas sobre a produção nas principais regiões produtoras do mundo de milho (*Zea mays*), arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*) e soja (*Glycine max*). Segundo

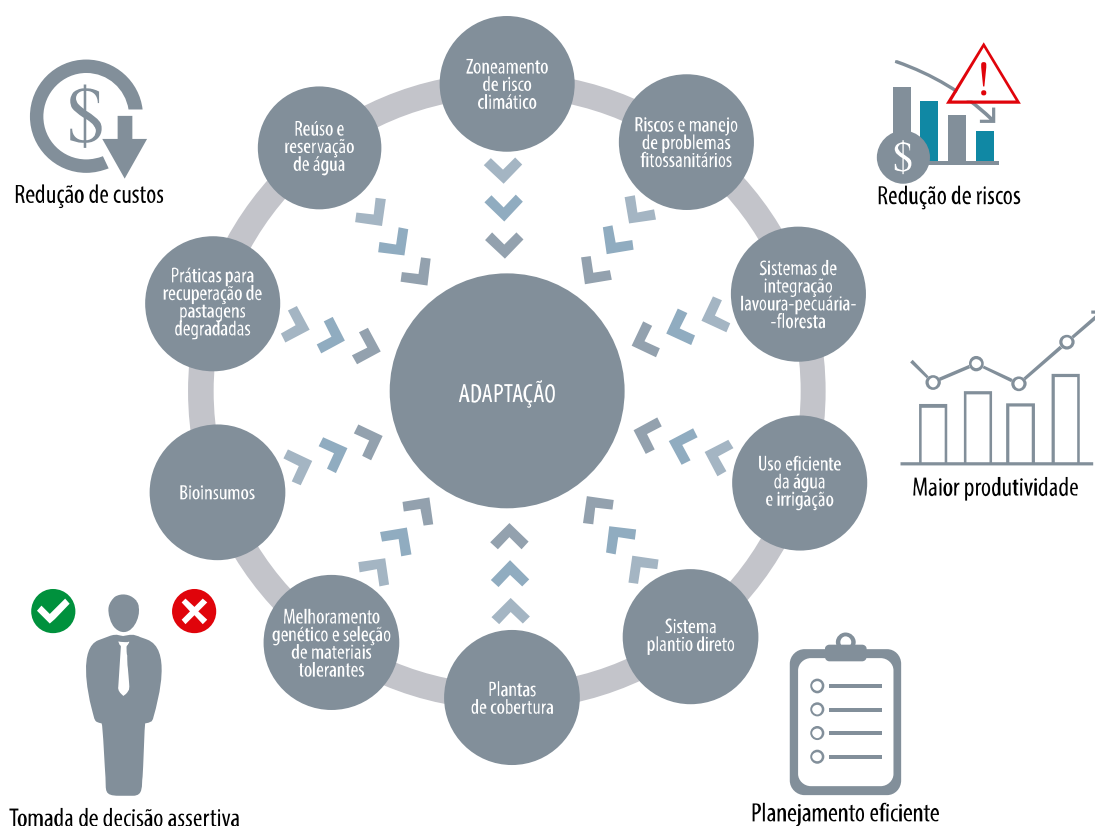


Figura 2.1. Vantagens da adoção de medidas de adaptação para a produção agropecuária.

os autores, embora nem todas as regiões tenham sofrido influência significativa do clima, foram identificadas áreas em que mais de 60% da variabilidade da produção era explicada por variação das condições meteorológicas ano a ano. Essa relação de causa (variabilidade climática) e efeito (variabilidade na produção) foi evidenciada na grande maioria das regiões produtoras de milho (70%), arroz (53%), trigo (79%) e soja (67%). Nessas regiões, concentravam-se 78% da produção mundial de milho, 52% de arroz, 75% de trigo e 67% de soja. O estudo demonstrou que, na maioria das regiões produtoras, a variabilidade do clima é responsável por 32 a 39% da variabilidade na produção desses cultivos.

Diante da crescente mudança do clima, que já altera padrões e produz impactos negativos na vida no campo, torna-se cada vez mais difícil planejar estratégias eficazes para lidar com os riscos climáticos. Essa dificuldade é particularmente potencializada em comunidades com baixo nível de compreensão das dimensões e complexidades associadas ao processo de mudança do clima, o que resulta em pouca adesão a tecnologias e práticas que poderiam reduzir os riscos. Como consequência, observa-se aumento da imprevisibilidade, elevação dos custos com seguro agrícola, perdas econômicas, sociais e ambientais e a insegurança alimentar em diversas escalas, em função da incerteza do clima. Esse cenário evidencia a importância estratégica do desenvolvimento científico e o papel da academia em amplo diálogo com a sociedade. A construção de pontes de entendimento entre ciência e sociedade acerca dos desafios e impactos impostos pela mudança do clima é uma estratégia fundamental de adaptação no setor agrícola. A decisão de priorizar investimentos estratégicos e estruturantes em pesquisa de longo prazo torna-se cada vez mais necessária como forma de antecipar riscos e gerar tecnologias adequadas para enfrentá-los.

No Brasil, o impacto da mudança do clima sobre o setor agrícola tem sido estudado há década-

das, com particular atenção a partir de 2018 (Fiorini et al., 2024). As principais variáveis climáticas consideradas nesses estudos foram a temperatura do ar e a precipitação. As culturas mais investigadas incluem o milho, a soja e a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), embora também existam análises envolvendo culturas como o cacau (*Theobroma cacao*), arroz, feijão (*Phaseolus vulgaris*), trigo, mandioca (*Manihot esculenta*) e outras. Segundo Fiorini et al. (2024), dentre os estudos avaliados, 67% reportaram impactos negativos aos sistemas de produção em decorrência da mudança do clima, 15% reportaram tanto impactos negativos quanto positivos, 11% reportaram neutralidade e somente 7% reportaram impactos exclusivamente positivos.

Conforme dados do Banco Central do Brasil, o principal fator de risco climático na agricultura são os eventos de seca, responsáveis pela maior parte das perdas econômicas cobertas pelo Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro), entre os anos de 2013 a 2021. No caso da soja e do milho, por exemplo, as perdas associadas às secas contabilizaram 86,8 e 75% das indenizações pagas pelo programa, respectivamente. Por outro lado, para o trigo a seca é menos relevante (16%), se comparada à chuva excessiva (37%) e às geadas (39,4%) (Banco Central do Brasil, 2025).

Para a pecuária, o problema mais crítico é a estacionalidade da produção de forragem (sazonalidade), caracterizada pela oferta inconstante de alimento ao longo do ano. No período das águas, as condições ambientais são favoráveis e a oferta de alimento é abundante. Mas, no período da seca, com a diminuição da temperatura, da luminosidade e da precipitação, há escassez de forragem, ocasionando queda na produção e na taxa de reprodução dos animais (Oliveira, 2024a). Essa situação ainda se agrava pela degradação das pastagens, que facilita a perda de água e a erosão, pela presença de solo exposto, e, mais recentemente pelos eventos climáticos extremos decorrentes da mudança do clima, como secas mais prolongadas

e geadas na época de escassez de alimentos (Oliveira et al., 2022a).

Os cenários futuros para pastagem no Brasil até 2070 mostram que, embora possa haver aumento de produtividade decorrente do aumento de temperatura, também haverá variações na produção entre anos e estações. A estacionalidade da produção de forragem será acentuada, com maior produção na época das águas e menor na época de déficit hídrico — especialmente em solos com baixa capacidade de armazenamento de água, como os arenosos (Pezzopane et al., 2019) e os degradados. Esses cenários tornam o planejamento forrageiro imprescindível.

Embora o Brasil disponha de 12% da água doce superficial do planeta (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022), essa disponibilidade é distribuída de modo desigual ao longo do território nacional, com regiões que enfrentam excesso hídrico e outras que sofrem escassez crônica, como o Semiárido brasileiro.

Em geral, as projeções de mudança do clima indicam aumentos de até 1 mm/dia na evapotranspiração de referência (ET_0), principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste (Monteiro et al., 2024a). Esses aumentos evidenciam maior pressão sobre o balanço hídrico e a tendência de intensificação da deficiência hídrica na agricultura. O crescimento populacional também deve gerar pressão sobre os múltiplos usos dos recursos hídricos, tornando a situação ainda mais difícil.

Relatos de Coutinho e Cataldi (2023) mostram tendências de redução da disponibilidade hídrica entre 2020 e 2100, bem como aumento da magnitude e da frequência de eventos extremos nas bacias hidrográficas dos rios Parnaíba e São Francisco, na região Nordeste, e dos rios Iguaçu e Uruguai na região Sul. As projeções baseadas nos cenários do IPCC também apontam uma maior intensidade desses eventos nos cenários caracterizados por um maior uso de energia, combustí-

vel fóssil e outras demandas relacionadas ao atual modelo de desenvolvimento.

Especificamente no bioma Cerrado, projeta-se que a água armazenada em reservatórios deverá diminuir no futuro, resultando em maiores riscos de falha no abastecimento, especialmente de reservatórios de menor porte. Espera-se que o aumento da evaporação reduza a disponibilidade de água em pequenos reservatórios durante a estação seca, podendo chegar a uma perda de até 10,4% nos cenários mais severos do IPCC (Althoff et al., 2020). Além disso, a recarga média mensal de águas subterrâneas pode diminuir em 21% no cenário intermediário e em 29,4% no cenário mais severo, o que comprometeria a disponibilidade hídrica e acentuaria os conflitos entre os usuários, especialmente durante a estação seca (Cambráia Neto et al., 2021).

No Nordeste brasileiro, segundo Medeiros e Oliveira (2022), os modelos climáticos projetam um aumento do número de dias secos ao longo do ano em todos os cenários, ampliando a seca da região, sobretudo no cenário mais severo do IPCC. Os modelos também sugerem uma maior intensidade da precipitação no verão, ou seja, o mesmo volume de chuvas ocorrendo em menor número de eventos, o que pode dificultar o manejo e impactar negativamente o rendimento das culturas. Por outro lado, a vazão de água que flui para os reservatórios e, conseqüentemente, a disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada e outros usuários, depende dessa chuva. Portanto, a segurança hídrica no Nordeste brasileiro poderá depender fortemente da capacidade de armazenamento e gestão dos recursos hídricos na região.

Além disso, com a evapotranspiração mais elevada, causada por temperaturas mais altas devido à mudança do clima, deverá haver maior demanda de água pelas culturas agrícolas. Dessa forma, mudanças climáticas e aumento da demanda por alimentos configuram-se como importantes elementos de pressão sobre os recursos hídricos, especialmente no que se refere à agricultura ir-

rigada. Diante disso, torna-se fundamental a implementação de políticas públicas com foco em medidas adaptativas que promovam a segurança hídrica e a resiliência dos sistemas de produção.

Soluções

Zoneamento agrícola de risco climático

Dada a importância de minimizar as perdas da produção agrícola no Brasil em função dos elementos climáticos, na década de 1990, a Embrapa e o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) deram início ao Projeto de Redução de Riscos Climáticos (Rosseti, 1998), que foi o ponto de partida para a consolidação da tecnologia Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc). O Zarc visa à avaliação de risco para os cultivos agrícolas a partir dos elementos agrometeorológicos e da estimativa da probabilidade de atendimento de requisitos climáticos das culturas agrícolas para as diferentes regiões e épocas de plantio.

O Zarc é realizado mediante o apoio técnico-científico da Embrapa, sendo mantido e atualizado pelo Mapa. Os resultados dos estudos do Zarc constituem informações oficiais e balizadoras para os entes envolvidos no setor agropecuário – como o setor produtivo, instituições de crédito e seguro rural e o poder público – na tomada de decisão acerca de práticas que minimizam o risco climático para a produção agropecuária. Logo, o Zarc atua como um forte indutor de boas práticas agrícolas que resultam em maior resiliência dos sistemas de produção de alimentos, fibras e energia.

As informações geradas pelo Zarc são formalizadas por meio de portarias publicadas pelo Mapa e servem como indicadores para elaboração de contratos no âmbito do Proagro, do Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), bem como para operações do seguro e crédito rural

(Monteiro et al., 2024b; Banco Central do Brasil, 2025). Essas atividades estão atreladas à Política Agrícola Nacional (Lei nº 8.171/1991). Em 2024, o valor enquadrado nas operações do Proagro, de acordo com a Matriz de Dados do Banco Central do Brasil, foi de R\$ 22,48 bilhões (Banco Central do Brasil, 2025). Já no PSR, a importância assegurada em 2023 superou os R\$ 51,6 bilhões (Brasil, 2024).

Para a elaboração do Zarc, são utilizadas séries históricas de dados meteorológicos com cerca de 30 anos em, aproximadamente, 3,5 mil pontos de observação distribuídos no território nacional (Monteiro et al., 2024b). Esses dados são aplicados em modelos de simulação para gerarem balanços hídricos de cada cultura agrícola zoneada. Os resultados são então confrontados com as necessidades específicas de cada cultura, cujo não atendimento pode comprometer o crescimento e a produção dos cultivos.

O processo de simulação é realizado em base decenal (36 decêndios ao ano), levando em consideração ciclos de maturação das cultivares e diferentes tipos de solo. A partir das informações do balanço hídrico e da temperatura do ar, calcula-se a frequência de ocorrência de condições meteorológicas favoráveis ou desfavoráveis ao cultivo ao longo das séries históricas. De acordo com Monteiro et al. (2024a), os seguintes eventos meteorológicos adversos podem ser levados em consideração: períodos de estiagem durante fases sensíveis, como o florescimento e enchimento de grãos; ocorrência de geadas; chuvas excessivas impedindo a mecanização da colheita ou afetando a qualidade dos grãos; excesso de umidade, favorecendo doenças fúngicas; e temperaturas muito altas, causando o abortamento de flores ou a queda de frutos em fase inicial de formação.

Com base nessas simulações, o Zarc apresenta como resultado final, no espaço (regiões ou municípios) e no tempo (épocas de plantio e cultivo), o risco climático para cada combinação de cultura, comprimento de ciclo e classe de solo, permitindo identificar locais e épocas do ano com maiores

chances de sucesso, ou seja, menores chances de frustrações de safra (Monteiro et al., 2024b).

Como instrumento de avaliação de risco climático, o Zarc é uma ferramenta dinâmica do ponto de vista temporal e metodológico, sendo constantemente aprimorada por meio de atualizações no suporte técnico-científico, conduzidas pela equipe do projeto de pesquisa. Nesse sentido, destaca-se a melhor definição do conceito de água disponível para as culturas (Monteiro et al., 2022), a qual estabeleceu seis níveis de água disponíveis do solo, ao invés dos três níveis adotados anteriormente.

Outra inovação em desenvolvimento é o Zarc Níveis de Manejo (Zarc NM), que incorpora critérios que levam em consideração a qualidade do manejo do solo adotado pelos produtores (Debiasi et al., 2022). A proposta baseia-se na premissa de que a adoção de práticas conservacionistas contribui significativamente para a melhoria da resiliência dos sistemas de produção e, assim, reduz a sua vulnerabilidade aos eventos meteorológicos adversos.

Além disso, diante do contexto de um mundo que experimenta a mudança do clima, a equipe do projeto Zarc está realizando análises iniciais sobre os riscos climáticos futuros, com base em projeções do IPCC. Esses estudos utilizam os cenários climáticos desenvolvidos na 6ª fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6)¹ e estão sendo aplicados nos modelos de simulação do Zarc para avaliar os impactos das mudanças projetadas no risco climático das culturas agrícolas ao longo do tempo.

Embora o Zarc seja uma ferramenta voltada prioritariamente à adaptação às mudanças climáticas, suas recomendações também incentivam práticas agrícolas mais sustentáveis, como o uso de sistemas conservacionistas e o manejo eficiente do solo e da água, o que pode resultar em contribuições indiretas para a mitigação de emissões de GEE.

Riscos e manejo de problemas fitossanitários

A nova geografia dos cultivos, devido à mudança do clima, impactará também na ocorrência de pragas e doenças. Essa é uma preocupação mundial, uma vez que 20 a 40% da produção agrícola global é perdida devido à ocorrência de problemas fitossanitários (IPCC, 2021). No Brasil, estudos de riscos ocasionados por fungos, bactérias, nematoides e vírus foram conduzidos em 32 cultivos de importância econômica. As análises indicam que, das 304 interações entre plantas e microrganismos avaliadas, 46% das doenças agrícolas tendem a apresentar aumento no risco de favorabilidade climática, o que pode intensificar a sua severidade (Angelotti et al., 2024). Esse é um sinal de alerta importante, uma vez que as estratégias de manejo precisarão ser acompanhadas, e até mesmo modificadas, para a efetividade no controle dos patógenos.

A avaliação desses riscos tem sido realizada por meio de modelagem e experimentação em campo (Angelotti et al., 2017; Araujo et al., 2019; Bissonard et al., 2020). Os avanços mais recentes destacam análises regionalizadas, como no caso das doenças da videira, cujo risco de ocorrência pode aumentar, dependendo da região produtora, uma vez que no Brasil a videira é cultivada tanto em regiões de clima temperado quanto tropical (Angelotti et al., 2017). Outro exemplo relevante é o da sigatoka-negra, doença de grande importância para a cultura da bananeira. Estima-se que o risco de infecção tende a aumentar em 44,2% nas áreas produtoras de banana da América Latina e Caribe (Bebber, 2019).

As doenças transmitidas por vírus também merecem atenção especial, uma vez que o aumento da temperatura pode impactar diretamente os vetores, como os pulgões, acelerando seus ciclos de vida e resultando no aumento da população, o que favorece a disseminação do vírus.

¹ Disponível em: <https://wcrp-cmip.org>.

Com base nas análises de risco, e considerando a interação entre o patógeno e o novo cenário climático, será necessário adotar estratégias de adaptação para a proteção fitossanitária dos cultivos. Entre as principais medidas destacam-se: a) a adoção de práticas preventivas para reduzir a disseminação de pragas e patógenos; b) o fortalecimento da vigilância fitossanitária; c) o uso de cultivares tolerantes ou resistentes a doenças; d) desenvolvimento de novas moléculas químicas ou bioquímicas; e) seleção de agentes de controle biológico adaptados ao aumento da temperatura do ar; f) a promoção de sistemas de cultivo diversificados; g) a integração de diferentes tecnologias de manejo; e h) o emprego de modelos de previsão e alerta de epidemias (Angelotti et al., 2024).

Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é uma estratégia de produção sustentável que integra atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado. A ILPF busca a diversificação da produção e os efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema em quatro modalidades de sistemas de produção: integração lavoura-pecuária – ILP (agropastoril); integração lavoura-floresta – ILF (silviagrícola); integração pecuária-floresta – IPF (silvipastoril); e integração lavoura-pecuária-floresta – ILPF (agrossilvipastoril).

A adoção de ILPF no Brasil foi estimada em 11,5 milhões de hectares na safra 2015/2016, com maior concentração nos estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal, São Paulo e Santa Catarina. Considerando uma taxa anual média de incremento de 0,96 milhão de hectares no período de 2005 a 2015, estima-se que, no Brasil, em 2020, existiam cerca de 16,27 milhões de hectares com alguma modalidade de ILPF (Polidoro et al., 2021).

A ILPF integra as ações do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), instituído em 2012, e revisado em 2020, quando passou a ser denominado Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020–2030) (Plano ABC+) (Brasil 2023). O Plano ABC+ prevê a expansão da área adotada em ILPF no Brasil em 9 milhões de hectares até 2030, contribuindo para o aumento de práticas agrícolas sustentáveis, a expansão da agropecuária para assegurar as demandas globais de alimento e a redução na emissão de gases de efeito estufa (GEE), sem a necessidade de abertura de novas áreas.

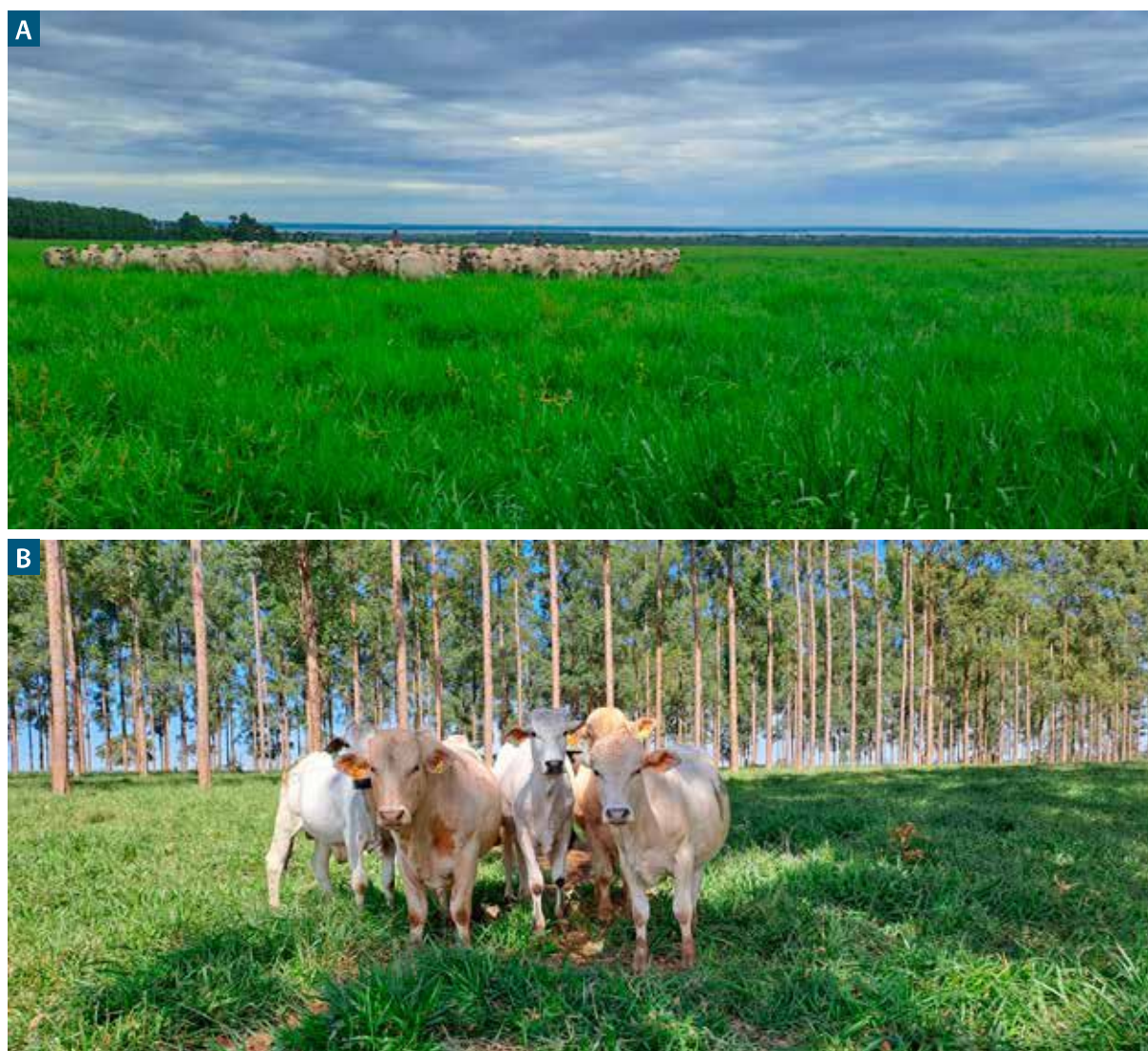
A ampliação das áreas cultivadas nas diversas modalidades de ILPF proporciona ao Brasil um modelo de uso sustentável da terra, com menor impacto ambiental e diversificação de renda. Esse resultado decorre de características inerentes ao sistema, como a diversificação e o aumento de produção por área, a provisão de serviços ambientais, a redução de emissão de GEE e o aumento do sequestro de carbono, além do efeito poupa-terra, que favorece a preservação ambiental (Oliveira et al., 2024b). As características positivas desses sistemas de produção determinam o elevado potencial de expansão da sua adoção no País, principalmente incorporando áreas improdutivas, incluindo as grandes extensões de pastagens degradadas.

Diversas pesquisas demonstram que sistemas de integração lavoura-pecuária aumentam o teor de matéria orgânica do solo e favorecem a formação de agregados por meio das atividades das raízes, especialmente com a presença dos capins tropicais. Esses fatores melhoram a qualidade global do solo, devido aos ciclos de rotação lavoura-pastagem, aumentando a retenção de água no solo, proporcionando aos sistemas de produção maior resiliência nos períodos de veranicos (Salton et al.,

2014; Bieluczyk et al., 2024). Além disso, quando bem manejados, com lotação animal adequada, esses sistemas mantêm a produtividade de diversas culturas e são essenciais para a manutenção da segurança alimentar em um ambiente climático cada vez mais desafiador (Nunes et al., 2021b). A diversificação de renda também contribui para reduzir riscos climáticos e flutuações do mercado (Vinholis et al., 2021).

A inclusão do componente arbóreo nos sistemas de produção (Figura 2.2), caracterizando a modali-

dade de sistemas silvipastoril ou agrossilvipastoril, representa ainda uma estratégia de adaptação à mudança do clima, em função das alterações do ambiente proporcionadas pelas árvores, que vão refletir na melhoria dos índices de conforto térmico animal (Magalhães et al., 2020). Pezzopane et al. (2019) verificaram que sistemas silvipastoris com eucalipto ou espécies nativas foram capazes de postergar o início de estresse térmico animal em até 2,2 °C na temperatura média, em comparação a sistemas sem árvores.



Fotos: José Ricardo Pezzopane

Figura 2.2. Pastagem de capim-braquiária implementado em sistema de integração lavoura-pecuária, após lavoura de soja (A) e sistema silvipastoril com pastagem de braquiária e eucalipto (B).

Uso eficiente da água e irrigação

No contexto das mudanças climáticas, o uso eficiente da água e a modernização da irrigação se apresentam como estratégias fundamentais de adaptação para garantir a resiliência e a sustentabilidade da agricultura brasileira.

Entre as soluções tecnológicas para o aumento da produção de modo sustentável usando as mesmas áreas produtivas, está a irrigação. Conforme demonstra o *Atlas Irrigação*, publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021), o Brasil irrigava em 2019 um total de 8,2 milhões de hectares. Nesse mesmo documento, estimou-se que o potencial para aumento da área irrigada no País era de 55,85 milhões de hectares, sendo que as áreas com condições mais favoráveis ao desenvolvimento da agricultura irrigada representavam 13,69 milhões de hectares, um potencial efetivo de 24,5% do total adicional irrigável. Esses dados evidenciam a pouca exploração da tecnologia da irrigação no Brasil e, sobretudo, seu potencial alcance e impacto diante da perspectiva de sua crescente adoção nos sistemas produtivos do agro brasileiro.

Contudo, o aumento da área irrigada implica, naturalmente, em aumento do uso dos recursos hídricos e, possivelmente, aumento nos conflitos pelo seu uso, sobretudo em regiões com menor disponibilidade hídrica. Nesse sentido, fazem-se necessárias as soluções para o uso eficiente da água, especialmente considerando os potenciais impactos da mudança do clima sobre a disponibilidade dos recursos hídricos.

A análise de sensibilidade da demanda hídrica para irrigação ao aumento da eficiência de aplicação, especialmente para sistemas com baixa eficiência, é superior aos incrementos de demanda projetados pelos efeitos das mudanças climáticas. Esse tipo de resposta indica que a eficiência dos sistemas é um importante fator operacional a ser considerado em estratégias de adaptação para a agricultura irrigada (Maia et al., 2016). Ganhos na eficiência de irrigação

podem ser capazes de compensar os incrementos projetados na demanda hídrica ocasionado pelas mudanças climáticas, conforme relatado por Gondim et al. (2008, 2012, 2018).

Uma melhor gestão da água, assim como o emprego de insumos e práticas agronômicas adequadas, poderia resultar em maior produção sob um mesmo nível de consumo de água. A maior produtividade da água de irrigação (kg/m^3) aumenta a “economia real de água”, possibilitando uma maior produção com a mesma quantidade de evapotranspiração (Van Opstal et al., 2021).

Existem opções de manejo que os agricultores podem adotar visando melhorar a produtividade da água e, ao mesmo tempo, proteger os seus rendimentos. Assim, pode-se elencar estratégias para otimizar o uso da água de irrigação, a serem adotadas no âmbito da unidade produtiva:

- Adoção preferencial pela irrigação localizada, ou seja, por gotejamento ou microaspersão, bem como avaliação da uniformidade de aplicação da água periodicamente, realizando a manutenção preventiva do sistema para reparos de possíveis vazamentos ou entupimentos, visando ao alcance de uma alta uniformidade de distribuição da água. A irrigação por gotejamento é uma tecnologia que pode melhorar significativamente a eficiência de uso da água. Pesquisas indicam que a aplicação controlada e oportuna de água por meio de irrigação por gotejamento aumenta a produção de forragem e especialmente a eficiência de uso da água durante as estações secas, levando à utilização mais eficaz da terra, fertilizantes e água disponíveis (Jha et al., 2016).
- Aplicação de cobertura morta ou plantio direto na palha (Figura 2.3) para reduzir perdas por evaporação, uma vez que a palhada, ao proteger o solo da radiação solar, diminui as perdas por evaporação, aumentando a retenção e disponibilização da água no solo.

- Aplicação de *mulch* plástico branco (Figura 2.4), que promove retenção hídrica na superfície do solo, reduzindo perdas por evaporação. Em estudo com várias coberturas de solo em cultivo de melancia, Saraiva et al. (2017) concluíram que *mulch* plástico branco resultou em maior retenção hídrica com maiores produtividades e frutos de melhor qualidade, quando comparado ao solo sem cobertura.
- Utilização de sensores de umidade no solo (Figura 2.4). Há vários tipos desses sensores no mercado, sendo os tensiômetros de água os de simples utilização. Os sensores do tipo reflectometria no domínio do tempo (TDR), embora mais caros, são úteis para monitorar grandes áreas e medem níveis de umidade que os tensiômetros não são capazes. Os sensores permitem avaliar o conteúdo de água no solo



Fotos: Sebastião José de Araújo

Figura 2.3. Cultivos de melão (A) e de feijão (B) em plantio direto na palha.



Fotos: Fabrícia da Silva Ramos

Figura 2.4. Aplicação de *mulch* plástico branco para redução das perdas por evaporação (A). Sensor TDR de umidade no solo (B).

que encontra-se disponível para as plantas. Dessa forma, é possível identificar o momento e a quantidade de água para aplicar.

- Irrigação com déficit controlado. Nessa estratégia, a irrigação é aplicada durante os estágios de crescimento da cultura sensíveis à seca. Fora desses períodos, a irrigação é limitada, ou mesmo desnecessária, quando a chuva fornece um suprimento mínimo de água. A restrição hídrica é limitada a espécies tolerantes à seca e em estágios fenológicos menos críticos. Embora isso resulte inevitavelmente em estresse hídrico para as plantas e, consequentemente, em perda de produção, a produtividade da água (kg/m^3) pode, de fato, aumentar. Raeisi et al. (2019) relataram aumento da produtividade física da água em trigo de $0,37 \text{ kg}/\text{m}^3$ (com irrigação total) para $0,56 \text{ kg}/\text{m}^3$ com a implementação da irrigação deficitária (50% de déficit).
- Aplicação de condicionadores de solos, como biocarvão (Figura 2.5) ou hidrogel, para aumento da retenção hídrica na zona radicular em solos

arenosos. Os hidrogéis são polímeros hidroabsorventes que ajudam a reter água no solo. Já o biocarvão é um material carbonizado de uma combustão incompleta de material orgânico que retém água na sua porosidade. Os biocarvões têm sido aplicados com o objetivo de melhorar a fertilidade do solo, mitigar os efeitos da mudança do clima, através do aumento de sequestro de carbono no solo, redução das emissões de gases de efeito estufa e aumento da capacidade de retenção de água em solo arenoso. Gondim et al. (2020) relatam uma redução do consumo hídrico em mudas de cajueiro no primeiro ano de 120 L por planta ao ano para 70 L por planta ano e 55 L por planta ao ano, utilizando biocarvão de lenha de cajueiro e hidrogel, respectivamente. Em plantas adultas de cajueiro-anão irrigado, Gondim et al. (2024) observaram redução de 14.098 L por planta ao ano para 11.962 L por planta ao ano, com máxima produtividade da água de $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ de castanhas (tratamento controle $0,93 \text{ kg}/\text{m}^3$) e $8,9 \text{ kg}/\text{m}^3$ de pedúnculos (tratamento controle $8,1 \text{ kg}/\text{m}^3$).

- Desenvolvimento, disponibilização e adoção pelos produtores, de aplicativos para dispositivos móveis visando à disseminação da informação da evapotranspiração de referência em tempo real e do tempo de irrigação capaz de suprir as necessidades hídricas dos cultivos. Pode evoluir com uso de Internet das coisas (IoT) e inteligência artificial capaz de monitorar e prever as características climáticas, físicas, químicas e hidrológicas de um campo e, por outro, detectar, localizar e prever características biológicas dos cultivos (Bounajra et al., 2024).
- O uso eficiente de fertilizantes está associado com a eficiência de uso da água quando evita perdas de nutrientes por lixiviação. Também colabora para manter a produtividade das culturas, o que reflete na produtividade da água, uma vez que, com o aumento da produtivida-

Foto: Rubens Sonsol Gondim



Figura 2.5. Aplicação do condicionador de solo tipo biocarvão na cova de plantio de cajueiro.

de física da cultura, torna-se possível produzir mais com menos água.

- O reúso de água pode funcionar como uma forma de aproveitamento de nutrientes de efluentes, evitando seu descarte em corpos hídricos ou lençol freático, o que causaria poluição. Miranda et al. (2008) demonstraram que a produção de grãos obtida com o uso do efluente da carcinicultura foi semelhante àquela obtida com o uso da água de rio, quando foi utilizada na adubação uma dose de N-P-K equivalente a 100% da dose recomendada para a cultura. Já quando foi utilizada uma dose de N-P-K equivalente a 75% daquela recomendada para a cultura do arroz, o uso do efluente na irrigação proporcionou maior produção de grãos em comparação com a irrigação utilizando a água do rio.

Diante dos desafios impostos pela mudança climática, a combinação de tecnologias, boas práticas agronômicas e ferramentas de monitoramento será decisiva para ampliar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada. Investimentos em capacitação, políticas públicas e inovação tecnológica devem caminhar juntos para garantir a segurança hídrica e alimentar no País.

Sistema plantio direto

A agricultura enfrenta desafios crescentes impostos pela mudança do clima, exigindo soluções tecnológicas de mitigação e adaptação inovadoras que garantam a sustentabilidade da produção de alimentos. O sistema plantio direto (SPD) é uma tecnologia estratégica de adaptação climática para a agricultura sustentável. No Brasil, o SPD foi adotado pela primeira vez em 1972 visando ao controle da erosão hídrica (Telles et al., 2013). Os requisitos mínimos que caracterizam o SPD envolvem o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e a manutenção do solo coberto por plantas vivas e mortas.

Como resultado de cinco décadas de pesquisas, de observações e de experiências práticas sobre o uso e manejo sustentáveis do solo, da água e da biodiversidade, o SPD embarcou uma série de soluções tecnológicas/soluções de inovação que o viabilizam e o caracterizam como em contínuo aprimoramento. Por conseguinte, o SPD é uma tecnologia, dentre outras basilares, que torna a agricultura brasileira referência em agricultura tropical e subtropical nas três dimensões da sustentabilidade – ambiental, econômica e social.

O SPD emerge como estratégia central para mitigar impactos ambientais e aumentar a resiliência dos sistemas produtivos. No Brasil, no ano de 2023, dos 58,72 milhões de hectares cultivados com culturas temporárias (MapBiomas, 2025), aproximadamente 33,03 milhões de hectares estão sob o SPD (Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto, 2021), contribuindo significativamente para a conservação do solo e da água e incrementando o sequestro de carbono, o que contribui para a agricultura de baixa emissão de carbono. Esses benefícios são obtidos devido ao SPD, no Brasil, seguir preceitos importantes para agricultura tropical e subtropical, tais como terraceamento, diversificação de culturas, consorciação de culturas, utilização de gramíneas de verão que aportam maior quantidade de fitomassa radicular, além do processo de colher e semear para manter o solo com cobertura vegetal e plantas vivas, simultaneamente, pelo maior período de tempo (Reichert et al., 2016; Nunes et al., 2021a; Denardin, 2024).

O sistema de plantio direto também tem sido adaptado para o cultivo de hortaliças em decorrência de sua capacidade de sequestrar carbono, reduzir a temperatura do solo em superfície e subsuperfície, promover o uso eficiente da água e proteger contra processos erosivos (Marouelli et al., 2006; Lima et al., 2018).

Por fim, importante estudo realizado por Rocha e Gonçalves (2024) avaliou o papel do SPD nas decisões de uso da terra em municípios brasileiros. Os autores encontraram evidências de que o

sistema, além de uma solução que confere sustentabilidade à agricultura brasileira por recuperar áreas degradadas e aumentar a produtividade das culturas, exerce também um efeito positivo indireto na conservação ambiental por estimular a preservação de áreas naturais.

Nesse sentido, a Embrapa aborda muitos desafios de inovação relacionados ao sistema plantio direto, com o objetivo de gerar soluções inovadoras tanto de adaptação quanto de mitigação às mudanças climáticas que cheguem ao campo e sejam percebidas positivamente pelas diferentes cadeias agrícolas de valor, que abrangem a produção de grão, frutas, proteína de origem animal, energia e fibras, integrando produtores, indústria, consumidores em escala nacional e global.

Plantas de cobertura

O cultivo de plantas de cobertura está entre as soluções tecnológicas mais promissoras para sequestrar carbono no solo, ciclar nutrientes, adicionar nitrogênio por meio da fixação biológica, enriquecer a fauna edáfica e consequentemente atribuir qualidade ao sistema solo-planta por meio da diversificação de espécies, considerando também o benefício do sistema radicular e da produtividade das culturas. Também é importante destacar os benefícios da utilização de plantas de cobertura no manejo integrado de plantas invasoras, doenças e insetos que ocorrem nos cultivos. A diversificação dos sistemas de cultivos com a utilização de plantas de cobertura é estratégia essencial, por exemplo, para a supressão de plantas invasoras, reduzindo a competição geral entre as espécies e o domínio de espécies resistentes a herbicidas (Leskovšek et al., 2025). São muitos os exemplos de manejos integrados para interromper/mitigar ciclos de pragas e doenças pelo uso de plantas de cobertura, como para nematoides (Mbiri et al., 2024) e *Fusarium* (Kadziene et al., 2020), entre outros.

Sob as condições subtropicais e tropicais brasileiras, há uma grande variedade de espécies de plantas de cobertura bem adaptadas (Figura 2.6)

que podem ser cultivadas em sistemas que produzem grãos (Bayera et al., 2016; Ensinas et al., 2016; Schulman et al., 2025); algodão (Lopes et al., 2021); olerícolas e frutícolas (Giongo et al., 2020; Deus et al., 2022; Silva et al., 2024). Os estudos focam a integração de indicadores químicos, físicos e biológicos para inferir saúde ao sistema solo-planta-atmosfera e multifuncionalidade aos agroecossistemas para aumentar a produtividade e a resiliência das culturas.

Na última década, o cultivo simultâneo de diferentes famílias botânicas, denominado de mistura de plantas de cobertura, coquetéis vegetais ou mix de adubos verdes tem agregado conceitos de multifuncionalidade, serviços ambientais e agricultura regenerativa por influenciar positivamente diferentes processos natureza química, física e biológica, levando a maiores rendimentos das culturas e resiliência a condições climáticas adversas. Um exemplo é o trabalho de Silva et al. (2024), realizado no Semiárido, no qual foram cultivadas diferentes espécies de plantas de cobertura, consorciadas e precedendo o cultivo de melão irrigado, em sistema plantio direto e cultivo convencional, num experimento de longa duração. Nesse trabalho, as práticas de manejo de solo e a integração de cultivos simultâneos de oleaginosas, gramíneas e leguminosas em SPD foram capazes de igualar o estoque de carbono do solo, na camada de 0–20 cm, ao encontrado sob vegetação da Caatinga.

Ações portadoras de futuro relacionam a utilização de espécies de plantas de cobertura com serviços de provisão, serviços de suporte e serviços de regulação que podem ser fornecidos pelos agroecossistemas com caráter de multifuncionalidade. Nessa perspectiva, os resultados obtidos por Deus et al. (2022) identificaram as espécies para cultivos solteiros e consorciados que melhor se adaptam aos serviços específicos, de acordo com as necessidades de cada ambiente de cultivo agrícola. Os autores destacaram, por exemplo, que o número de espécies em consórcio está relacionado com a produção de biomassa aérea e radicular



e o acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, o que favorece a capacidade dos agroecossistemas fornecerem serviços de provisão e regulação.

Melhoramento genético e seleção de materiais tolerantes

Entre as medidas de adaptação à mudança do clima, inclui-se a seleção de genótipos tolerantes aos estresses impostos por ela. Essa é uma ação estratégica para a competitividade nacional, pois pode imprimir características aos cultivos que contribuam, não só para evitar a redução da produção, mas para até mesmo aumentar sua produtividade, integrando-se a técnicas de manejo já descritas anteriormente neste capítulo e permitindo atender à demanda crescente de alimentos em quantidade e qualidade para uma população mundial crescente. No Brasil, destaca-se a pesquisa com genótipos adaptados de soja, milho, sorgo, milheto, mandioca, feijão-caupi, arroz, alface e batata (Caranhato et al., 2022; Oliveira et al., 2022a, 2022b; Barros et al., 2023, 2024; Lima et al., 2024a; Silva et al., 2024).

No melhoramento genético clássico, a seleção de genótipos ocorre após o pré-melhoramento, como parte das etapas de avaliação e condução do programa de melhoramento. A seleção de materiais tolerantes se dá por meio da análise dos parâmetros genéticos, fisiológicos, bioquímicos e produtivos (Barros et al., 2021). A avaliação dessas respostas contribui para a caracterização e podem ser analisadas em ambientes relevantes como as câmaras de crescimento que simulam os cenários previstos de mudanças climáticas ou em condições de campo contrastantes (Barros et al., 2023, 2024). Sob estresses, as células vegetais ativam genes envolvidos na resposta ao aumento de temperatura e déficit hídrico, contribuindo para evitar danos celulares. A caracterização dos genes expressos em resposta aos estresses abióticos será de grande importância para o desenvolvimento de plantas tolerantes à mudança do clima, permitindo a identificação de alvos mole-

culares para programas de melhoramento genético e biotecnologia agrícola.

Atualmente, plataformas de alto rendimento para fenotipagem utilizando técnicas para capturar imagens de plantas em diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento contribuem para o avanço do melhoramento genético (Brito et al., 2023). Alia-se a isso, a evolução de protocolos genômicos, com sequenciamento genético de plantas, disponibilizando dezenas de genes que influenciam as características agrônômicas importantes, incluindo as relacionadas aos componentes de rendimento e tolerância a estresses bióticos e abióticos (Caranhato et al., 2022; Barros et al., 2024). Com o uso da biotecnologia, é possível inserir genes específicos com características desejáveis em novos cultivares por meio de técnicas de transgenia. Um exemplo é a introdução do gene *AtAREB1* em germoplasmas-elite de soja, visando aumentar a tolerância ao déficit hídrico (Caranhato et al., 2022).

Além disso, novas tecnologias de genômica avançada, envolvendo o sistema CRISPR/Cas9, estão sendo desenvolvidas a fim de aprimorar e acelerar o melhoramento de plantas. Por meio da edição genômica via CRISPR (Repetições Palindrômicas Curtas Agrupadas e Regularmente Interespçadas ou *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, em inglês) é feito uma quebra na fita dupla do DNA em um local pré-determinado por um sgRNA (RNA guia único), alterando uma sequência específica de um genoma. No Brasil, o melhoramento genético do milho já faz uso dessa ferramenta para aumentar a produção, a qualidade, o valor nutricional e a tolerância a estresses bióticos e abióticos (Oliveira et al., 2022b).

Uma nova abordagem que vem ganhando espaço na pesquisa científica e que complementa o melhoramento genético tradicional é o uso de microbiomas (Camargo et al., 2023). Basicamente, busca-se estudar e aproveitar as comunidades de microrganismos que vivem em plantas, animais ou no solo para ajudar a melhorar características

desejáveis, como resistência a doenças, tolerância a estresses ambientais, crescimento mais rápido ou maior produtividade. A técnica consiste em inocular plantas com microbiomas específicos para aumentar sua resistência ao calor, à seca ou a pragas, sem alterar diretamente o DNA da planta. Assim, o uso dos microbiomas aliado ao melhoramento genético representa uma fronteira inovadora para tornar a agricultura mais eficiente e sustentável.

Bioinsumos

As primeiras preocupações com os danos causados pelo uso de pesticidas químicos ou agrotóxicos na agricultura surgiram na década de 1950. No Brasil, a atenção aos impactos ambientais da agricultura aumentou a partir da década de 1980, quando as externalidades passaram a ser estudadas de forma mais sistemática. Nessa época ficou evidente que o uso intensivo de desses produtos tinha potencial de causar impacto negativo tanto dentro quanto fora dos agroecossistemas.

No interior do agroecossistema, o uso excessivo de agrotóxicos aumenta a dependência devido aos desequilíbrios biológicos, como a eliminação de inimigos naturais e de antagonistas, a ressurgência de pragas, a resistência aos princípios ativos e o surgimento de novos problemas fitossanitários causados pela eliminação dos agentes responsáveis pelo controle biológico natural. Fora dos agroecossistemas, os pesticidas químicos têm potencial de causar danos à saúde do consumidor, além de contaminar o solo, a água e o ar.

Nesse contexto, o controle biológico contribui para a restauração da biodiversidade e para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, gerando benefícios para o meio ambiente e para a saúde das plantas. Além disso, traz vantagens significativas para a saúde dos agricultores, dos consumidores e dos animais de criação. O tripé da sustentabilidade se completa com as vantagens econômicas e sociais do controle biológico, asso-

ciadas à sua eficiência e aos benefícios ambientais e de saúde pública.

Para estimular o uso de produtos biológicos na agricultura brasileira, foi criado o Programa Bioinsumos pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), por meio do Decreto nº 10.375/2020 (Brasil, 2020, art. 1º), “[...], com a finalidade de ampliar e de fortalecer a utilização de bioinsumos no país para beneficiar o setor agropecuário”. Nesse sentido, o termo “bioinsumos” é utilizado como sendo:

[...] o produto, o processo ou a tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana, destinado ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfiram positivamente no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos e de substâncias derivadas e que interajam com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos. (Brasil, 2020, art. 2º).

Portanto, o incentivo não se limita apenas ao uso de controle biológico, mas abrange a utilização de produtos biológicos na agricultura brasileira. Esse programa vem sendo amplamente discutido pela sociedade, o que tem contribuído para ampliar o uso de produtos biológicos.

O controle biológico é utilizado de forma efetiva para controlar problemas sanitários (doenças, pragas e plantas invasoras) na agricultura, na pecuária e na saúde pública. Ele pode ser classificado em quatro tipos: natural, conservacionista, clássico e aumentativo.

No controle biológico natural de pragas e doenças agrícolas, as populações desses organismos são mantidas em equilíbrio por ação de antagonistas e inimigos naturais de ocorrência natural, sem qualquer intervenção humana.

No controle biológico conservacionista, as ações humanas visam proteger, estimular e preservar os agentes benéficos, favorecendo o aumento natural de suas populações.

O controle biológico clássico é baseado na coleta de inimigos naturais em uma área de ocorrência, geralmente na região de origem da praga, patógeno ou planta invasora, e na sua liberação em locais onde se deseja elevar o número de agentes de biocontrole, podendo resultar em população permanente.

Por fim, o controle biológico aumentativo é aquele em que os antagonistas, os entomopatógenos, os parasitoides e os predadores são aplicados de forma massal em uma cultura. Esse é o método mais conhecido entre os agricultores, pois tem como base a aplicação de um agente de biocontrole (fungos, bactérias, oomicetos, vírus, micovírus, bacteriófagos, predadores e parasitoides) disponível no mercado (Bueno et al., 2020).

Os fungos *Beauveria bassiana*, *Isaria fumosorosea*, *Metarhizium anisopliae*, *Paecilomyces* sp. e *Trichoderma* spp., assim como as bactérias *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus methylophilus* e *Bacillus thuringiensis*, são os agentes de controle biológico mais comercializados no Brasil. Contudo, quando considerada a área tratada, destacam-se os pertencentes às espécies dos gêneros *Trichoderma* e *Beauveria*. As espécies de *Bacillus*, que são utilizadas para o controle de nematoides e de doenças de plantas em diversas culturas, são as mais importantes quando consideradas todas as espécies de bioagentes disponíveis no mercado brasileiro (Medeiros; Bettiol, 2023).

Além do controle de pragas e doenças, os bioinsumos também envolvem a utilização de organismos visando à promoção de crescimento das plantas, à proteção aos estresses abióticos (como hídrico, salinização, aumento de temperatura, etc.), ao uso eficiente do nitrogênio, à solubilização e à liberação de nutrientes, à fixação de nitrogênio (sem dúvida os organismos mais largamente utilizados no país), entre outras aplicações.

Em relação à mitigação dos efeitos da seca nas culturas, diversos produtos vêm sendo lançados

no mercado brasileiro. Um exemplo é a utilização de *Bacillus aryabhattai*, cujo primeiro produto comercial (Auras) foi desenvolvido em parceria pela Embrapa Meio Ambiente e a empresa NOOA para essa finalidade, sendo atualmente distribuído por diversas empresas do setor. Esse microrganismo, isolado de solos da Caatinga, tem a capacidade de hidratar as raízes e atuar na fisiologia dos vegetais, permitindo que as plantas respondam melhor aos déficits hídricos. Além disso, *Bacillus aryabhattai* estimula o desenvolvimento do sistema radicular, proporcionando maior absorção de água (May et al., 2021; Fuga et al., 2023).

Um outro importante grupo de microrganismos, ainda pouco explorado no Brasil, são os fungos micorrízicos. Esses organismos, além de colaborarem com a absorção de fósforo, podem induzir resistência a fitopatógenos. Portanto, há necessidade de se desenvolver produtos à base desses fungos para as principais culturas agrícolas do País.

As ectomicorizas são exploradas principalmente em espécies de árvores, pois muitas delas apresentam uma dependência, especialmente plantas do gênero *Pinus*. A maioria dos fungos ectomicorrízicos são basidiomicetos, como *Pisolithus*, *Thelephora* e *Boletus*, entre outros, e podem ser produzidos in vitro, simplificando a sua produção. Além de contribuir para a nutrição das plantas, essas micorizas podem protegê-las contra pragas e doenças.

Outro grupo importante são as micorizas arbusculares, que estão presentes na maioria das espécies vegetais. Essa simbiose é de extrema importância agrícola, pois promove absorção e troca de nutrientes, além de colaborar na proteção das plantas contra doenças e nematoides. O maior problema da exploração comercial desse grupo é a sua produção em larga escala, o que limita o mercado.

Por outro lado, a cultura da soja é uma das principais responsáveis pelo crescimento do uso de bioinsumos no Brasil. Além do uso da fixação biológica de nitrogênio, também o controle biológico

gico de pragas e doenças é utilizado em grande escala na cultura. Assim, parte da história do uso de produtos biológicos na agricultura brasileira se confunde com a história da cultura da soja no Brasil. A fixação biológica de nitrogênio e o controle biológico da lagarta-da-soja, possivelmente, sejam os dois exemplos mais significativos. Logicamente, o controle biológico do mofo-branco, causado por *Sclerotinia sclerotiorum*, na cultura, por meio de produtos à base de *Trichoderma* e de *Bacillus*, não pode ser ignorado (Faria et al., 2022).

A fixação biológica de nitrogênio por meio de bactérias constitui o grupo mais importante de inoculantes. As espécies dos gêneros *Bradyrhizobium*, *Rhizobium* e *Azospirillum* são as mais utilizadas no País, sendo que, para a cultura da soja, são utilizadas a mistura de cepas de *Bradyrhizobium elkanii* e de *Bradyrhizobium japonicum* (Hungria et al., 2006, 2015, 2020). Além desses, mais recentemente, tem crescido significativamente o uso de *Azospirillum brasilense* (Hungria et al., 2015; Santos et al., 2021). Esses microrganismos, além de reduzir os custos para os agricultores pelo não uso de fertilizantes nitrogenados na soja, trazem uma considerável redução nos impactos ambientais que o uso de nitrogênio mineral causaria, principalmente quando se analisam os dados de Rockström et al. (2009). Essa informação é de extrema significância, considerando a área cultivada pela soja na safra 2023/2024 de, aproximadamente, 46 milhões de hectares (Embrapa Soja, 2025).

A adoção do uso de inoculantes na cultura da soja no Brasil na safra 2020/2021 foi de 80%, enquanto a adoção da coinoculação *Bradyrhizobium* + *Azospirillum* foi de 26% (Globalferti, 2021). Esses números representam, para a safra 2020/2021, uma área de 30,821 milhões de hectares de soja sob uso de inoculantes e de 10,017 milhões de hectares sob coinoculação, num total de 38,526 milhões de hectares, indicando o sucesso da tecnologia desenvolvida no Brasil. Considerando a área cultivada na safra 2020/2021, a economia foi superior a US\$ 17,8 bilhões (Hungria; Nogueira, 2022). Esses dados

claramente mostram não somente a importância do uso de inoculante na cultura da soja, mas também a importância da pesquisa e desenvolvimento de bioinsumos para o País.

Essas bactérias, que, para muitas plantas, substitui a utilização de fertilizantes nitrogenados, representa uma tecnologia limpa e sustentável de grande importância principalmente para a cultura da soja no Brasil, pois bactérias do gênero *Bradyrhizobium* podem fixar até 300 kg/ha (Peoples et al., 1995). Contudo, também *Azospirillum amazonense*, *Azospirillum halopraeferans*, *Azospirillum lipoferum*, *Herbaspirillum seropedicae*, *Acetobacter diazotrophicus* e outras (Döbereiner, 1990) são reconhecidamente fixadoras de nitrogênio.

Práticas para recuperação de pastagens degradadas

As medidas para adaptação à mudança do clima consistem em aumento da resiliência dos sistemas de produção, aumento da diversificação de espécies animais e vegetais, diminuição dos riscos, além dos cobenefícios advindos da mitigação dos GEE (Oliveira et al., 2023, 2024a, 2024b; Pezzopane et al., 2024). Em sistemas pastoris, as medidas de adaptação estão relacionadas ao manejo das plantas forrageiras, melhoramento genético com novas cultivares e variedades, manejo do solo, planejamento forrageiro e novos arranjos nos sistemas de produção (Thornton; Herrero, 2014; Braga; Ramos, 2017). A maior parte dessas técnicas estão inseridas no processo da recuperação de pastagens, que está embasada em três princípios básicos, que são: o manejo adequado da planta forrageira, a recomposição da fertilidade do solo e a adoção de práticas de conservação do solo (Oliveira et al., 2003, 2005, 2007a, 2007b).

Recuperar uma pastagem consiste em utilizar a população de plantas existentes e empregar técnicas que promovam a recuperação daquela pastagem degradada, e pode ser realizada de várias formas, como a recuperação direta das pastagens,

a recuperação adotando-se o consórcio com leguminosas e a recuperação usando os vários arranjos de integração lavoura-pecuária propostos na literatura (Oliveira et al., 2003, 2005, 2007a, 2007b, 2024a) (Figura 2.7).

Devido aos resultados benéficos encontrados nos sistemas de produção e aos esforços iniciados na década de 1990 pelo setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), a necessidade de recuperação de pastagens passou a ganhar visibilidade, sendo inserida no contexto do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), elaborado em 2012, revisado e renomeado em 2020 para Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020-2030) (Plano ABC+) (Brasil, 2023). Atualmente, o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (Brasil, 2024), dentre as várias técnicas recomendadas, propõe a intensificação da pecuária de corte, que engloba a recuperação de pastagens.

A intensificação do manejo das pastagens, por meio da correção com calcário e com melhoria da fertilidade do solo, aumenta a produção de forragem na época seca do ano, oferecendo maior

quantidade de alimentos nesse período de intenso déficit hídrico. Resultados obtidos por Pasquini Neto et al. (2024, 2025), em experimentos com recuperação e intensificação de pastagens na região Sudeste brasileira, mostraram aumento de produção de matéria seca durante o outono/inverno. As pastagens degradadas (DP0) produziram 3,07 t de matéria seca por hectare nessa época, enquanto as pastagens recuperadas, corrigidas e fertilizadas, apresentaram produção de 4,57 t/ha com 200 kg de nitrogênio (N) por hectare ao ano (RP200), 9,45 t/ha com 400 kg de N por hectare ao ano (RP400) e 10,44 t/ha, quando irrigadas e sobressemeadas no outono/inverno e fertilizadas com 600 kg de N por hectare ao ano (IR600).

O aumento da produção de forragem no outono/inverno refletiu no aumento do ganho de peso, sendo 0,02; 0,54; 0,42 e 0,82 kg/dia, e da lotação animal, sendo 2,15; 2,68; 3,77; 4,99 unidade animal por hectare, fato que aumentou a produtividade (kg de peso vivo por hectare) dos sistemas de produção, sendo obtido 119; 362; 444 e 700 kg/ha, respectivamente para os sistemas DP0; RP200; RP400; IR 600.

A resiliência ao déficit hídrico na intensificação do manejo das pastagens se reflete até no rendimento de carcaça, passando de 53,3% no sistema degradado para 55,8% para os tratamentos intensifi-

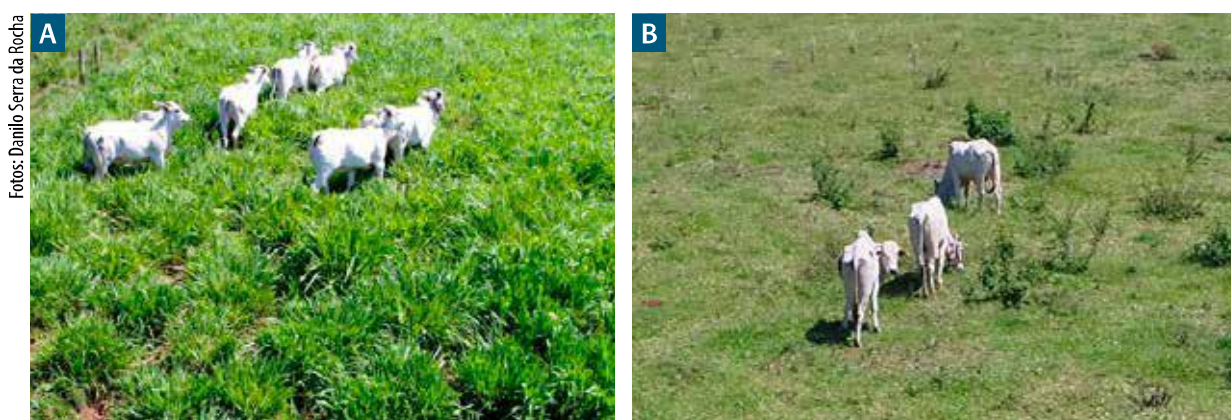


Figura 2.7. Aspecto da pastagem e dos animais em pastagens recuperadas (A) em relação às pastagens degradadas (B).

cados, aumentando a produtividade de carne por hectare (Oliveira et al., 2018).

O aumento da diversidade de espécies forrageiras é uma das alternativas para adaptação à seca (Oliveira et al., 2024b; Pezzopane et al., 2024). A consorciação de feijão-guandu com capins tropicais para a recuperação de pastagens é uma boa estratégia para a adaptação à seca, pelo fato de essa leguminosa possuir um sistema radicular pivotante e profundo e ser bastante tolerante ao déficit hídrico (Oliveira, 2022; Pezzopane et al., 2024), mantendo a produção de forragem e retenção de folhas verdes na época seca do ano, especialmente na cultivar BRS Mandarin. Esse fato proporcionou, em solos bastante arenosos com baixa retenção de água, melhor composição nutricional da dieta e ganho de peso médio diário por animal para fêmeas na época seca do ano (0,29 kg/dia), usando apenas a suplementação mineral comum, valor bastante superior ao ganho de peso (0,03 kg/dia) obtido nas pastagens fertilizadas com 200 kg de N por hectare e suplementadas com suplemento mineral proteinado. Além disso, foi observado aumento na lotação animal e no peso final das novilhas (Oliveira, 2022).

Do ponto de vista agrônomo, Pezzopane et al. (2024) também observaram benefícios significativos. A pastagem consorciada com feijão-guandu produziu 18,5 t de matéria seca por hecta-

re ao ano, sendo 7,5 t/ha de capim-braquiária e 11 t/ha de feijão-guandu. Em comparação, pastagens recuperadas e fertilizadas com 200 kg de N por hectare ao ano produziram 11,1 t/ha de capim-braquiária, enquanto as pastagens degradadas produziram apenas 5,6 t/ha de matéria seca. Como os animais consomem o feijão-guandu preferencialmente na época seca do ano, esse volume de forragem representa um importante estoque alimentar para esse período. Além disso, a presença do feijão-guandu aumentou o teor de proteína bruta do capim-braquiária de 5,8 para 7,1%, considerando a média das estações seca e chuvosa.

O consórcio com o feijão-guandu é apenas um exemplo entre as várias opções de misturas de espécies forrageiras nas pastagens com potencial de adaptação à mudança do clima (Furtado et al., 2023) (Figura 2.8). A escolha das espécies forrageiras deve considerar características complementares que aumentem a resiliência das pastagens aos estresses abióticos (Oliveira et al., 2023), como o potencial de produção e manutenção da qualidade da forragem na época seca (Valle et al., 2017). Além disso, deve contemplar o melhor aproveitamento da água por meio do levante hidráulico, habilidade de gramíneas ou leguminosas com sistemas radiculares mais profundos de reciclar a água e melhorar o ambiente hídrico no dossel forrageiro (Pezzopane et al., 2024).



Fotos: Patrícia Perondi Anhão Oliveira

Figura 2.8. Aspecto da pastagem recuperada com o consórcio com feijão-guandu (A) em relação às pastagens degradadas (B) no início da estação seca.

Os sistemas integrados de produção, como os silvipastoris, agropastoris e agrosilvipastoris, também vêm sendo adotados para a recuperação de pastagens. A integração ILP é a diversificação, rotação, consorciação ou a sucessão das atividades agrícolas ou pecuárias dentro da propriedade rural de forma harmônica, constituindo um mesmo sistema, de tal maneira que há benefícios para ambas (Alvarenga et al., 2006). Os sistemas integrados adotados como forma de recuperação de pastagens também proporcionam maior resiliência aos estresses abióticos, fornecendo, após a colheita das lavouras, forragem na época seca do ano proveniente do estande de pastagens semeadas juntamente com as culturas de grãos, como soja, milho e arroz, com qualidade superior, principalmente quanto ao teor de proteína (Brunetti et al., 2022). Os principais benefícios são aumento de produtividade, diversificação da produção, menor vulnerabilidade de efeitos climáticos, melhoria na fertilidade, na qualidade física e biológica do solo, redução de pragas e doenças e controle de erosão (Alvarenga et al., 2006), além das questões relacionadas ao melhor ambiente, com mais conforto térmico aos animais, quando a integração prevê o uso de árvores nos sistemas de produção (Pezzo-pane et al., 2019; Magalhães et al., 2020).

Reúso e reservação de água

O reúso de águas residuárias pode ser conceituado como uma prática inovadora e sustentável que envolve a utilização deliberada em processos humanos diversos como a produção agrícola (Lopes Sobrinho et al., 2024).

Embora não exista uma legislação nacional sobre reúso de águas residuárias na agricultura, algumas Unidades da Federação apresentam normativos legais para regularizar essa prática, como os estados do Rio Grande do Sul (2020) (Resolução CONSEMA nº 419/2020), Ceará (2017) (Resolução COEMA nº 02/2017), Bahia (2017) (Resolução CONERH nº 75/2010) e Minas Gerais (2020) (Deli-

beração Normativa CERH nº 65/2020). Além disso, instrumentos internacionais como o da Organização Mundial da Saúde (Organização Mundial da Saúde, 2006) e do Parlamento Europeu (2020) (Regulamento nº 741/2020) também podem auxiliar na definição de parâmetros de qualidade da água para uso agrícola. A agricultura irrigada é a maior usuária de água do Brasil, consumindo 50% de toda a água distribuída no País (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024). Nesse contexto, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Lei nº 9433/1997) Brasil (1997), estabelece como usos prioritários dos recursos hídricos o abastecimento humano e a dessedentação de animais, o que exige da agricultura a busca por alternativas para uso da água na irrigação. O reúso agrícola de águas residuárias tem-se mostrado uma alternativa viável para mitigar os impactos de eventos extremos de seca decorrentes das mudanças climáticas globais (Moura et al., 2020) e é uma prática segura, desde que respeitados os parâmetros de qualidade da água indicados, fornecendo não somente água, mas também nutrientes para os cultivos agrícolas (Lopes et al., 2024). A Embrapa tem desenvolvido alternativas para o saneamento rural e reúso de águas residuárias, como a Fossa Séptica Biodigestora (Galindo et al., 2019), o Jardim Filtrante (Leonel et al., 2013), o Bioágua Familiar (Melo et al., 2023) e o Sistema ReAqua (Lima et al., 2024a), além de produtos para melhoria da qualidade de águas residuárias pós-tratamento para irrigação (Ferreira et al., 2024).

Já a reservação de água pode ser entendida como a construção e gestão de estruturas destinadas ao armazenamento de água, como reservatórios, cisternas e barragens (Formiga-Johnsson; Britto, 2020). No Brasil, sistemas de captação e armazenamento de água para a produção de alimentos em hortas, pomares, cultivo de plantas forrageiras e dessedentação animal contribuem para a segurança hídrica de populações, como no Semiárido brasileiro (Oliveira et al., 2016; Castro et al., 2024). Entre os exemplos de tecnologias desenvolvidas

pela Embrapa, destacam-se as Barragens Subterrâneas (Melo et al., 2011), as Cisternas Domiciliares (2007) e as Barraginhas (Caranhato et al., 2022). Essas tecnologias sociais transformaram o desenvolvimento sustentável no Semiárido, uma vez que permitem o acúmulo significativo de água durante o período chuvoso para uso como reserva hídrica nos períodos de estiagens.

Serviço ecossistêmico de polinização

Os serviços ecossistêmicos também desempenham um papel estratégico no combate à mudança climática. Pode-se definir os serviços ecossistêmicos como os benefícios que o meio ambiente fornece aos seres humanos e que são essenciais para a manutenção da vida na Terra. Contudo, a população humana não é a única beneficiada por esses serviços, uma vez que os processos ecológicos garantem a sobrevivência das diferentes espécies, com fornecimento de alimentos, água, abrigo e outras necessidades.

A principal contribuição das abelhas é com o serviço ecossistêmico de polinização, que incrementa significativamente a reprodução de muitas plantas silvestres e cultivadas. A polinização é fundamental para garantir a variabilidade genética, a sobrevivência de espécies e o equilíbrio dos ecossistemas, o que tem implicações diretas e indiretas na capacidade de sistemas naturais e humanos se adaptarem aos efeitos das alterações climáticas.

A polinização é responsável por cerca de 75% da produção global de cultivos vegetais, com um valor econômico estimado entre 235 e 577 bilhões de dólares anuais (Potts et al., 2016). Uma análise de 141 culturas no Brasil demonstrou que a contribuição econômica dos polinizadores na produção agrícola equivale a aproximadamente US\$ 12 bilhões, metade desse valor é atribuída à soja (Giannini et al., 2015).

A soja é uma planta autógama e cleistogâmica, ou seja, a maior parte das flores se autopolinizam, frequentemente antes mesmo de se abrirem completamente. Isso implica que a produção de soja não depende da presença de polinizadores, contudo estudos comprovam que a presença de polinizadores na cultura da soja, principalmente abelhas, aumenta a produtividade em até 18,24%, dependendo da variedade usada, das condições ambientais e dos tratos culturais às quais a cultura foi exposta (Gazzoni; Barateiro, 2023). A polinização da flor da soja aumenta o número de grãos nas vagens e reduz a quantidade de vagens sem sementes ou com apenas um grão. O peso do grão também aumenta com a polinização, garantindo maior produtividade na mesma área, sem necessidade de aplicar mais insumos (Gazzoni; Barateiro, 2023).

No Brasil, as abelhas formam o maior grupo de polinizadores e representam 66,3% das espécies animais que realizam o serviço ecossistêmico de polinização (BPBES, 2019). Contudo, o aumento da provisão de polinizadores nas culturas, quer seja de abelhas manejadas, quer seja de abelhas silvestres, necessita de adoção de práticas de manejo que reduzam impactos negativos da agricultura nessas populações, de forma que o produtor possa se beneficiar do serviço ecossistêmico realizado por esses insetos.

A criação de paisagens mais heterogêneas e diversificadas, com proteção e restauração de áreas naturais próximas às culturas, é uma das práticas amigáveis mais recomendadas para atrair e conservar as abelhas nas lavouras. Recomenda-se aproveitar as bordaduras, entrelinhas, cercas e outros espaços para plantio de espécies vegetais, preferencialmente nativas, que possam fornecer uma alimentação diversificada e escalonada para as abelhas e local para nidificação. A substituição de áreas de monocultura por áreas com maior biodiversidade agrícola aumenta a resiliência do sistema e, em conjunto com o aumento da biodiversidade natural ao redor das áreas de cultura,

promovem os processos ecológicos sustentáveis, como a polinização realizada pelas abelhas.

Essas áreas também vão ser usadas como locais de nidificação e refúgio de outros insetos benéficos à agricultura, como as joaninhas e louva-a-Deus, que auxiliam no controle de pragas, e besouros coprófagos e algumas moscas, que atuam na decomposição de matéria orgânica e melhoram a saúde do solo. Melhorar a biodiversidade agrícola e natural beneficia o serviço ecossistêmico de polinização, mas também aumenta a resiliência do sistema de cultivo, com consequências no aumento da produção.

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis, incluindo a transição para a agroecologia, também ajuda na preservação das abelhas. Assim, recomenda-se usar, preferencialmente, a técnica do plantio direto e evitar o revolvimento excessivo do solo. A gradagem e a aragem, além de comprometerem a saúde do solo e os serviços ecossistêmicos relacionados, diminuem a quantidade e a variedade de fontes de alimentos e de locais de nidificação para abelhas que usam o solo para construir seus ninhos (Potts et al., 2016). O sobrepastejo excessivo e a ausência de cobertura vegetal no solo também devem ser evitados, especialmente na entressafra. Essas práticas contribuem para a degradação do solo e reduzem a disponibilidade de alimento e os locais de abrigo e nidificação essenciais para a manutenção das populações de polinizadores.

Outra prática a ser evitada é o uso do fogo no preparo do solo. Essa prática agrícola convencional é extremamente prejudicial às abelhas e demais polinizadores. O fogo destrói diretamente habitats, reduz a quantidade e a variedade de alimentos e fontes de nidificação. O manejo agrícola sem uso do fogo, por outro lado, minimiza incêndios, protege ecossistemas e contribui para a conservação dos solos e dos polinizadores (Potts et al., 2016; Coutinho et al., 2020).

O aumento do fluxo de abelhas para polinização das culturas pode ser realizado, também, com a

introdução de colmeias, ninhos e colônias, especialmente de abelhas-nativas-sem-ferrão e de *Apis mellifera*. Iniciar a criação de abelhas ou incentivar a instalação de apiários e meliponários próximas às culturas são estratégias que podem ser usadas para mitigar o déficit de polinização e aumentar o número de polinizadores efetivos nas culturas.

O aluguel de colônias é uma alternativa já usada no Brasil para aumentar o fluxo de abelhas, como nas culturas de melão, café e maçã. Até mesmo a soja pode ser beneficiada pela instalação de apiários próximos e com colmeias bem distribuídas. Pesquisas indicam que, além da produtividade, a presença de colmeias na cultura da soja beneficia a taxa de germinação nas lavouras de produção de sementes, sendo os apiários considerados um insumo interessante para maximizar a produção desta cultura (Wolditsadik et al., 2023).

Diante dos múltiplos desafios impostos pela mudança climática, torna-se essencial reconhecer o papel estratégico da biodiversidade funcional nos processos de adaptação dos sistemas produtivos. Nesse contexto, as abelhas (principais agentes polinizadores da maioria das culturas alimentares e dos ecossistemas nativos) são um elemento-chave para garantir a resiliência dos sistemas agrícolas. A polinização promovida por abelhas manejadas e silvestres não apenas contribui para o aumento da produtividade e da qualidade dos alimentos, mas também reforça a estabilidade ecológica das paisagens agrícolas frente a eventos climáticos extremos.

Preservar habitats naturais, diversificar cultivos e reduzir o uso de pesticidas são práticas fundamentais não só para proteger as abelhas, mas para construir sistemas agroecológicos mais robustos e adaptáveis. Portanto, estratégias de adaptação à mudança do clima devem integrar, de forma transversal, a conservação dos polinizadores como componente essencial de segurança alimentar, saúde dos ecossistemas e sustentabilidade no campo. Essas estratégias agem de forma sinérgica e influenciam os demais serviços

ecossistêmicos, tornando o sistema agrícola ainda mais resiliente e adaptado às emergências climáticas. Valorizar e proteger as abelhas é, assim, um investimento na construção de um futuro climático mais equilibrado e produtivo.

Perspectivas futuras

À medida que o clima global se altera, mudanças nos padrões de temperatura, precipitação e ciclos sazonais afetam diretamente a produção agrícola. A fragmentação e simplificação das paisagens agrícolas é um fator limitante e pode contribuir para a vulnerabilidade da agricultura tropical. Contudo, o futuro não é necessariamente de colapso: há cenários promissores, especialmente se forem adotadas estratégias integradas de conservação da biodiversidade e do manejo sustentável do território. A criação de corredores ecológicos, o incentivo à agroecologia, a promoção da agricultura de base diversificada e a redução do uso de pesticidas são medidas que podem fortalecer a gestão integrada da paisagem, restaurando sua capacidade de prestação de serviços. O relatório sobre Mudança do Uso da Terra do IPCC publicado em 2019² aponta que medidas de gestão da paisagem são particularmente estratégicas em regiões tropicais, onde a proteção da cobertura florestal trará um efeito positivo de aumento do resfriamento do ambiente como consequência da evapotranspiração natural. O aumento da evapotranspiração preserva a ocorrência de dias mais frios durante a estação de crescimento e tem efeito protetor, reduzindo a amplitude dos eventos climáticos extremos relacionados ao calor.

Assim, diante do clima vigente e dos possíveis cenários relacionados à mudança do clima, é imprescindível o aperfeiçoamento da governança doméstica sobre o tema de mudança do clima, particularmente do fortalecimento do diálogo e investimen-

to em educação a fim de reduzir desinformações e ampliar a compreensão dos tomadores de decisão acerca dos desafios complexos associados aos processos correntes e futuros da mudança do clima. A priorização de investimento em pesquisa estratégica com foco na redução de incertezas e geração de dados com a finalidade de reduzir vazios de informação são ferramentas críticas necessárias para um processo de tomada de decisão bem informado e assim reduzir riscos de perda de competitividade nos sistemas de produção tropical.

A segurança alimentar é um desafio primordial, e os sistemas produtivos tropicais estão hoje e estarão no futuro ainda mais expostos aos desafios impostos pela mudança do clima. Dessa forma, deve haver o aprimoramento contínuo e a integração das tecnologias, como as apresentadas neste capítulo, a fim de garantir a resiliência dos sistemas agrícolas responsáveis pela produção de alimentos, fibras e energia. A agricultura baseada em ciência é a melhor ferramenta para enfrentar os desafios impostos pelo aumento da temperatura média da atmosfera, alterações no regime de chuvas e os impactos destas sobre a soberania alimentar dos povos.

Dada a complexidade da agricultura tropical, os avanços tecnológicos, por meio da fenotipagem em grande escala, da genotipagem e edição gênica serão pontos-chave para o melhoramento de culturas. Outras ferramentas como o uso de inteligência artificial (IA) para automação da determinação e mapeamento de cenários, riscos e vulnerabilidade agrícola futuros poderão apoiar as pesquisas a fim de ampliar as capacidades de adaptação de culturas ao clima.

A adoção de medidas integradas de adaptação, buscando a manutenção e a conservação da biodiversidade, pode oferecer oportunidades econômicas, por meio de pagamentos por serviços ambientais e certificações sustentáveis. Entretanto, investimentos em pesquisa e monitoramento serão imprescindíveis, uma vez que o processo de adaptação é contínuo e as soluções propostas

² Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_SPM.pdf

precisarão ser realizadas e aprimoradas dentro do contexto local e regional, bem como em função do cultivo.

Portanto, as perspectivas futuras para o aumento da capacidade adaptativa da agricultura dependem da pesquisa científica e de ações de inovação que irão orientar e apoiar políticas públicas para uma agricultura tropical sustentável. A integração de medidas, visando à conservação do meio ambiente, não é apenas uma necessidade ecológica, mas um pilar para um futuro agrícola mais resiliente, produtivo e sustentável diante das incertezas climáticas.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO.

Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, DF, 2021. 130 p. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao>. Acesso em: 26 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO.

Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno. Brasília, DF, 2022. 132 p. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO

BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024:** informe anual. Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/106160?returnUrl=/sophia_web/Home/Index&guid=1734307203948. Acesso em: 4 maio 2025.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. Impacts of climate change on the evaporation and availability of water in small reservoirs in the Brazilian savannah.

Climatic Change, v. 159, p. 215-232, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02656-y>.

ALVARENGA, R. C.; COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; WRUCK, F. J.; CRUZ, J. C.; GONTIJO NETO, M. M. **A cultura do milho na integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 12 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 80).

ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. A Comprehensive Review of Climate Change and Plant Diseases in Brazil.

Plants, v. 13, n. 17, Sept. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13172447>.

ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; MAGALHÃES, E. E.; GHINI, R.; GARRIDO, L. R.; PEDRO JUNIOR, M. J. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 52, p. 426-434, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600006>.

ARAUJO, A. L. S.; ANGELOTTI, F.; RIBEIRO JUNIOR, P. M.

Severity of melon powdery mildew as a function of increasing temperature and carbon dioxide concentration. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, e6916, 2019.

BAHIA. Resolução CONERH nº 75 de 29 de julho de 2010.

Estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e/ou florestal. **Diário Oficial do Estado**, 1 ago. 2010. disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=121578>. Acesso em 22 jan. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Matriz de Dados do**

Proagro. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/proagro>. Acesso em 22 jan. 2025.

BARROS, J. R. A.; GUIMARÃES, M. J. M.; SILVA, R. L. de O.; SILVA, J. B. da; BARROS, A. A. G. de; ANGELOTTI, F.; MELO, N. F. de. The differential expression of the P5CR and αTPS6 genes in cowpea plants increases tolerance to water deficit and high temperatures. **Environmental and Experimental Botany**, v. 224, p. 105821, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105821>.

BARROS, J. R. A.; GUIMARÃES, M. J. M.; SILVA, R. M. E.; REGO, M. T. C.; MELO, N. F.; CHAVES, A. R. M.; ANGELOTTI, F. Selection of cowpea cultivars for high temperature tolerance: physiological, biochemical and yield aspects. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 27, n. 1, p. 29-38, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00919-7>.

BARROS, J. R.; GUIMARÃES, M. J. M.; SIMOES, W. L.; MELO, N. F.; ANGELOTTI, F. Temperature: determining element for cowpea growing season. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 45, p. e56812, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56812>.

BAYERA, C.; GOMES, J.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C.

B.; DIECKOW, J. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 86-94, Aug. 2016.

BEBBER, D. P. Climate change effects on Black Sigatoka

disease of banana. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 374, n. 1775, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0269>.

BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; GONÇALVES, J. V. M.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; CAMARGO, P. B.; TAVARES, T. R.; GERMON, A.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; CHERUBIN, M. R.; MORAES, M. T. Fine root production and decomposition of integrated plants under intensified farming systems in Brazil. **Rhizosphere**, v. 31, p. 100930, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100930>.

BISONARD, E. M.; ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; RAGO, A. M. Evolução da mancha preta do amendoim nas principais regiões produtoras da Argentina e do Brasil frente às mudanças no clima. **Revista Brasileira de**

Geografia Física, v. 13, p. 1778-1791, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgfv13.4.p1778-1791>.

BOUNAJRA, A.; EL GUEMMAT, K.; MANSOURI, K.; AKEF, F. Towards efficient irrigation management at field scale using new technologies: A systematic literature review. **Agricultural Water Management**, v. 295, p.108758, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108758>.

BPBES. **Relatório temático sobre polinização, polinizadores e produção de alimentos no Brasil**. São Paulo: Cubo. 2019, 184 p. Disponível em: https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2019/03/BPBES_CompletoPolinizacao-2.pdf. Acesso em: 4 dez. 2024.

BRAGA, G. J.; RAMOS, A. C. B. Alternativas para adaptação dos sistemas de produção animal em pastagens às mudanças climáticas: planejamento da alimentação do rebanho. In: PEDREIRA, C. G. S.; SILVA, S. C. da; SANTOS, P. M.; MOURA, J. C. de (ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 28., 2017, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba: Fealq, 2017. p. 119-162.

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. **Diário oficial da união**: seção 1, p. 105, 27 maio 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10375.htm. Acesso em 17 jan. 2025.

BRASIL. Decreto nº 11.815, de 5 de dezembro de 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis e o seu Comitê Gestor Interministerial. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 18, 6 dez. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11815.htm. Acesso em: 4 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 471, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em 17 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Atlas do seguro rural**: Programa de subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR). Brasília, DF. Disponível em: <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/SISSER/SISSER.html>. Acesso em: 4 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável**: ABC+ (2020-2030). Brasília, DF, 2023.

BRITO, G. G.; CAMPOS, A. D.; MELO, C. L. P.; BERTAGNOLI, P. F.; KLUMB, E. K.; PORTO, F. G. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M.; FAGUNDES, P. R. R.; PARFITT, J. M. B.; THEISEN, G.; NUNES, C.

D. M. Integrating Non-photochemical Quenching (NPQ) Measurements for Identifying Flood-Tolerant Soybean Genotypes in the Era of Climate Change. **Journal of Agricultural Science**, v. 15, n. 10, p. 39, 2023.

BRUNETTI, H. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; PASQUINI NETO, R.; BERNARDI, A. C. de C.; OLIVEIRA, P. P. A. de. Productive and nutritive traits of Piatã palisadegrass after thinning the forest component of a silvopastoral system in southeastern Brazil. **The Journal of Agricultural Science**, v.160, p. 338-348, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002185962200051X>.

BUENO, V. H. P.; PARRA, J. R. P.; BETTIOL, W.; LENTEREN, J. C. van. Biological control in Brazil. In: LENTEREN, J. C. van; BUENO, V. H. P.; LUNA, M.G. **Biological control in Latin America and the Caribbean**: its rich history and bright future. Boston, MA: CAB International, 2020. p. 78-107. (CABI invasive series; 12).

CAMARGO, A. P.; SOUZA, R. S. C. de; JOSE, J.; GERHARDT, I. R.; DANTE, R. A.; MUKHERJEE, S.; HUNTEMANN, M.; KYRPIDES, N. C.; CARAZZOLLE, M. F.; ARRUDA, P. Plant microbiomes harbor potential to promote nutrient turnover in impoverished substrates of a Brazilian biodiversity hotspot. **ISME Journal**, v. 17, n. 3, p. 354-370, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41396-022-01345-1>.

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da; ALTHOFF, D. Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. **Theor Appl Climatol**, v. 143, p. 1425-1436, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03477-w>.

CARANHATO, A. F. H.; ANGELOTTI-MENDONÇA, J.; MERTZ-HENNING, L. M.; MARIN, S. R. R.; MELO, C. L. P.; FOLONI, J. S. S.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Drought tolerance of elite soybean cultivars with the introgression of transgene AtAREB1. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. 1-9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02656>.

CASTRO, P. P. C.; VACHKOVA, M.; RAVENA, N.; VELOSO, N. The One Million Cisterns Program: a viability assessment of community rainwater management in Brazil. **Frontiers in Sustainability**, v. 5, Oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1401440>.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. Resolução COEMA nº 2, de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 5 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº151, de 25 de novembro de 2002. **Diário Oficial do Estado**, 21 fev. 2017. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>. Acesso em: 25 agos. 2025.

COUTINHO, P. E.; CATALDI, M. Evaluation of Extreme Hydroclimatic Trends in River Basins Located in the Northeast and South Regions of Brazil. **Atmosphere**, v. 14, n. 9, e1388, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14091388>.

- COUTINHO, S. M. V.; SANTOS, D. V.; BURSZTYN, M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES-FILHO, S.; LUCENA, A. F. P.; RODRIGUEZ, D. A.; MAIA, S. M. F. A Abordagem Nexus+ aplicada a estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação à mudança do Clima no Brasil. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 40-56, dez. 2020.
- DEBIASI, H.; MONTEIRO, J. E. B. A.; FRANCHINI, J. C.; FARIAS, J. R. B.; CONTE, O.; CUNHA, G. R.; MORAES, M. T. de.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M.; EVANGELISTA, B. A.; MARAFON, A. C. **Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 137 p. (Embrapa Soja. Documentos, 447).
- DENARDIN, J. E. Ante as oscilações pluviais, o sistema plantio direto requer tecnologias de cunho hidráulico. **Revista da AEAPA**, v. 3, p. 40-45, 2024.
- DEUS, T. R. V. de; GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; SANTANA, M. da S.; SILVA, V. C. da; SANTOS, T. C. dos. Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 57, n. 3, p. 409-421, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268>.
- DEUS, T. R. V. **Seleção de adubos verdes para prestação de serviços ecossistêmicos em ambiente Semiárido**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Petrolina.
- DÖBEREINER, J. Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil. **Estudos Avançados**, v.4, n. 8, p.144-152, abr. 1990. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141990000100011>.
- EMBRAPA SOJA. **Soja em números (safra 2024/25)**. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- ENSINAS, S. C.; SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; SILVA, E. F. da; PRADO, E. A. F. do; LOURENTE, E. R. P.; ALTOMAR, P. H.; POTRICH, D. C.; MARTINEZ, M. A.; CONRAD, V. do A.; JESUS, M. V.; EL KADRI, T. C. Cover crops affect on soil organic matter fractions under no till system. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 503-512, 2016.
- FARIA, A. F.; SCHULMAN, P.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; CRUZ MAGALHÃES, V.; GODOY, C. V.; GUIMARÃES, R. A.; SILVA, L. H. C. P.; GOUSSAIN, M. M.; MARTINS, M. C.; NUNES JUNIOR, J.; VENANCIO, W. S.; FANTIN, L.; BRUSTOLIN, R.; JACCOUD FILHO, D. S.; CARNEIRO, L. C.; JULIATTI, F. C.; MEDEIROS, F. H. V. Seven years of white mold biocontrol product's performance efficacy on Sclerotinia sclerotiorum carpogenic germination in Brazil: a meta-analysis. **Biological Control**, v. 176, 105080, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105080>.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO. FEBRAPDP. **Área sob Plantio Direto**. 2021. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/area-de-pd>. Acesso em: 21 mar. 2025.
- FERREIRA, J. G.; LIMA, C. E. P.; FONTENELLE, M. R.; BRAGA, M. B.; FÁVARO, S. P.; GAMBETA, R. Potencial de uso de carvão ativado de endocarpo de macaúba como pós-tratamento de efluente em protótipo de ETE descentralizada para remoção de nutrientes. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. 251-265, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n12-251>.
- FIORINI, A. C. O.; ANGELKORTE, G.; BAKMAN, T.; CRUZ, L. B. T.; DIUANA, F. A.; MORAIS, T. N.; RATHMANN, R.; SILVA, F. T. F. da; TOGOMORI, I.; ZANON-ZOTIN, M.; LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J. How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. **Environmental Research Letters**, v. 19, n. 8, 083001, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f4>.
- FORMIGA-JOHNSON, R. M.; BRITTO, A. L. Segurança hídrica, abastecimento metropolitano e mudanças climáticas: considerações sobre o caso do Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200110vu2020L3AO>.
- FUGA, C. A. G.; CAIXETA, G. A. N.; CAIXETA, C. F.; MELO, I. S. de. Growth promotion in maize (*Zea mays* L.) by *Bacillus aryabhattai* strain CMAA 1363. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, n. 3, e3340, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i3a3340>.
- FURTADO, A. J.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNO, J. F.; PASQUINI NETO, R.; LOBO, A. A. G.; SILVA, G. V. da.; PERNA JUNIOR, F.; ALVES, T. C.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; MEDEIROS, S. R. de.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Pigeon Pea Intercropped with Tropical Pasture as a Mitigation Strategy for Enteric Methane Emissions of Nellore Steers. **Animals**, v. 13, 1323, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13081323>.
- GAZZONI, D. L.; BARATEIRO, J. V. G. R. P. Soybean yield is increased through complementary pollination by honey bees. **Journal of Apicultural Research**, v. 63, n. 4, p. 801-812, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2161219>.
- GIANNINI, T. C.; CORDEIRO, G. D.; FREITAS, B. M.; SARAIVA, A. M.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v. 108, n. 3, p. 839-848, June 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/tov093>.
- GIONGO, V.; COLEMAN, K.; SANTANA, M. da S.; SALVIANO, A. M.; OLSZVESKI, N.; SILVA, D. J.; CUNHA, T. J. F.; PARENTE, A.; WHITMORE, A. P.; RICHTER, G. M. Optimizing multifunctional agroecosystems in irrigated dryland agriculture to restore soil carbon - experiments and modelling. **Science of the Total Environment**, v. 725, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138072>.
- GLOBALFERT. **Outlook GlobalFert**. 2021. Disponível em: <https://www.globalfert.com.br/OGFposEvento/arquivo/Outlook-GlobalFert-2021.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de; EVANGELISTA, S. R. de M.; TEIXEIRA, A. S.; FUCK JÚNIOR, S. C. de F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p.1657-1664, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200003>.

- GONDIM, R. S.; CASTRO, MARCO A.H. de; MAIA, A. de H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK JUNIOR, S. C. de F. Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, p. 355-365, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00620.x>.
- GONDIM, R. S.; SERRANO, L. A. L.; MAIA, A. de H. N.; SILVA, J. P. da. Hydrophilic polymer changes the water demand in the implementation of a dwarf cashew orchard. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 344-351, 2020.
- GONDIM, R. S.; SILVEIRA, C.; SOUZA FILHO, F. de; VASCONCELOS, F.; CID, D. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, p. 550, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7723-9>.
- GONDIM, R. S.; TANIGUCHI, C. A. K.; SERRANO, L. A. L.; MOURA, C. F. H. Cashew Clones Water Productivity and Production Responses to Different Biochar Levels. **AgriEngineering**, v. 6, n. 4, p. 3768-3784, Oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040215>.
- HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLI, R. N. R.; MENDES, I. C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and of N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 4, p. 927-939, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4141/P05-098>.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean seed co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: A new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 811-817, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.66087>.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; CAMPOS, L. J. M.; MENNA, P.; BRANDI, F.; RAMOS, Y. G. Seed pre-inoculation with *Bradyrhizobium* as time-optimizing option for large-scale soybean cropping systems. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 5222-5236, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20392>.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica do nitrogênio. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 141-162.
- IPCC. **Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability**. contribution of working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press 2022. 3056 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IPCC. **Scientific review of the impact of climate change on plant pests**: a global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. Rome. FAO, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4769en>.
- JHA, A. K.; MALLA, R.; SHARMA, M.; PANTHI, J.; LAKHANKAR, T.; KRAKAUER, N. Y.; PRADHANANG, S. M.; DAHAL, P.; SHRESTHA, M. L. Impact of Irrigation Method on Water Use Efficiency and Productivity of Fodder Crops in Nepal. **Climate**, v. 4, n. 1, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli4010004>.
- KADZIENE, G.; SUPRONIENE, S.; AUSKALNIENE, O. PRANAITIENE, S. SVEGZDA, P. VERSULIENE, A. CESEVICIENE, J.; JANASKAUSKAITE, D. FEIZA, V. Tillage and cover crop influence on weed pressure and *Fusarium* infection in spring cereals. **Crop Protection**, 127, 104966, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104966>.
- LIMA, C. E. P.; CAJAMARCA, S. M. N.; TRINDADE, D. M.; FONTENELLE, M. R.; SUINAGA, F. A.; FONSECA, M. E. N.; BOITEUX, L. S.; PILON, L.; BRAGA, M. B.; GUEDES, I. M. R.; SILVA, J. Adaptation of Lettuce Cultivars to High Temperatures and Different Types of Fertilization: Anticipating Management Strategies to Mitigate the Adverse Effects of Global Climate Change. **Global Research in Environment and Sustainability**, v. 2, n. 9, p. 32-51, 2024.
- LIMA, C. E. P.; GUEDES, I. M. R.; SILVA, J.; ALCANTARA, F. A.; MADEIRA, N. R.; CARVALHO, A. D.; FONTENELLE, M. R. Effects of Five Years Adoption of No-Tillage Systems for Vegetables Crops in Soil Organic Matter Contents. **Agricultural Sciences**, v. 9, p. 117-128, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2018.91009>.
- LEONEL, L. F.; MARTELLI, L. F. A.; SILVA, W. T. L. Avaliação do efluente de fossa séptica biodigestora e jardim filtrante. In: SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT, 3., 2013, São Pedro. **Anais [...]** São Pedro, SP: Embrapa Instrumentação, 2013.
- LOPES, A. A. de C.; BOGIANI, J. C.; FIGUEIREDO, C. C. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. de C. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, p. 2193-2204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00606-z>.
- LOPES SOBRINHO, O. P.; SANTOS, J.; TEIXEIRA, R.; SOARES, C. Tendências globais de pesquisas sobre o reúso de águas residuárias na agricultura a partir da análise bibliométrica. **Revista Geo UERJ**, n. 45, 2024. DOI: 10.12957/geouerj.2024.80390.
- LESKOVŠEK, R.; ELER, K.; LESKOVŠEK, S. A. Weed suppression and maize yield 14 influenced by cover crop mixture diversity and tillage. **Agriculture, Ecosystems & 15 Environment**, v. 383, May 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109530>.
- MAGALHÃES, C. A. S.; ZOLIN, C. A.; LULU, J.; LOPES, L. B.; FURTINI, I. V.; VENDRUSCULO, L. G.; ZAIATZ, A. P. S. R.; PEDREIRA, B. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Improvement of thermal comfort indices in agroforestry systems in the southern Brazilian Amazon. **Journal of Thermal Biology**, v. 91, 102636, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102636>.
- MAIA, A. de H. N.; GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de. **Sensibilidade da demanda de água para irrigação a mudanças climáticas e fatores operacionais dos sistemas de produção**. Jaguariúna: Embrapa Meio

Ambiente, 2016. 25 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 70).

MAPBIOMAS. **Coleção 10 do Mapbiomas da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 27 mar. 2025

MARQUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; MADEIRA, N. R. Uso de água e produção de tomateiro para processamento em sistema de plantio direto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.9, p. 1399-1404, set. 2006.

MAY, A.; SANTOS, M. de S. dos; SILVA, E. H. F. M. da; VIANA, R. da S.; VIEIRA JUNIOR, N. A.; RAMOS, N. P.; MELO, I. S. de. Effect of *Bacillus aryabhattai* on the initial establishment of pre-sprouted seedlings of sugarcane varieties. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e11510212337, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12337>.

MBIRO, A.; KELBESSA, B. G.; WESEMAEL, W. W. L. Host plant status of different cover crops for *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne chitwoodi*. **Journal of Asia Pacific Entomology**, v. 27, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2024.102272>.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P. de. Assessment of dry and heavy rainfall days and their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. **International Journal of Climatology**, v. 42, p. 8665-8686, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7759>.

MEDEIROS, F. H. V.; BETTIOL, W. How has Brazil turned into the largest producer and consumer of biocontrol products? **IOBC-WPRS Bulletin**, v. 165, p. 110-114, 2023.

MELO, R. F.; ANJOS, J. B. dos; PEREIRA, L. A.; BRITO, L. T. de L.; SILVA, M. S. L. da. **Barragem subterrânea**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. 16 p.

MELO, R. F.; SILVA, P. T. S.; LIMA, J. R. F. **Bioágua familiar**: reúso de águas cinzas para produção de alimentos. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2023. 1 Folder.

MIRANDA, F. R.; SOUZA, FRANCISCO E. A.; LIMA, R. N.; SOUSA, C. C. M.; SANTANA, M. G. S.; COSTA, C. A. G. Uso de efluentes da carcinicultura de águas interiores na irrigação do arroz. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 380-386, Dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000400006>.

MONTEIRO, A. F. M.; TORRES, R. R.; MARTINS, F.B.; MARRAFON, V. H. de A. Climate change impacts on evapotranspiration in Brazil: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, 155, p. 5363-5373, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04942-6>.

MONTEIRO, J. E. B. A.; BENDER, F.; BLIKSTAD, N. M. D.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; FARIAS, J. R. B.; FRANCHINI, J. C.; SANTOS, P. M.; EVANGELISTA, B. A.; CUADRA, S. V.; ANDRADE, C. L. T.; FLUMIGNAN, D. L.; BRAGA, M.; SILVA, F. A. M.; OLIVEIRA, A. F.; MOURA, M. S. B.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G.; CUNHA, G. R. **Gestão de riscos climáticos na agricultura**. Campinas: Embrapa

Agricultura Digital, 2024b. 67 p. (Embrapa Agricultura Digital. Documentos, 192).

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa CERH-MG nº 65, de 18 de junho de 2020**. Estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas públicos e privados e dá outras providências. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=52040>. Acesso em: 25 ago. 2025.

MONTEIRO, J. E. B. A.; VICTORIA, D. C.; FARIAS, J. R. B.; BARROS, A. H. C.; LIMA, E.P.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M.; EVANGELISTA, B. A.; TEIXEIRA, W. G. **Classes de água disponível do solo para uso no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2022. 5 p. (Embrapa Agricultura Digital. Comunicado técnico, 135).

MOURA, P. G.; ARANHA, F. N.; HANDAM, N. B.; MARTIN, L. E.; SALLES, M. J.; CARVAJAL, E.; JARDIM, R. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 791-808, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180201>.

NUNES, M. R.; VAZ, C. M. P.; PESSOA, T. N.; DENARDIN, J. E.; KARLEN, D. L.; GIAROLA, N. F. B.; LIBARDI, P. L. Inherent and dynamic effects on the structural stability of Brazilian Oxisols. **Geoderma Regional**, v. 27, e0042, p. 1-8, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00426>.

NUNES, P. A. A.; LACA, E. A.; CARVALHO, P. C. F.; LI, M.; SOUZA FILHO, W.; KUNRATH T.R.; MARTINS, A. P.; GAUDIN, A. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. **Scientific Reports**, v. 11, 16492, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81270-z>.

OLIVEIRA, A. R. de; MELO, R. F. de; SANTOS, J. M. R. dos; TARDIN, F. D. Desempenho produtivo de sorgo sacarino cultivado em barragem subterrânea. **Revista Científica Intellecto**, v. 2, n. 1, p. 103-111, 2016.

OLIVEIRA, B. A.; LÓPEZ, I. F.; CRANSTON, L. M.; KEMP, P. D.; DONAGHY, D.J.; DÖRNER, J.; LÓPEZ- VILLALOBOS, N.; GARCÍA-FAVRE, J.; ORDÓÑEZ, I. P.; VAN HALE, R. 18O isotopic labelling and soil water content fluctuations validate the hydraulic lift phenomena for C3 grass species in drought conditions. **Plant Stress**, v. 11, p.1-15. 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100414>.

OLIVEIRA, E. J. de; MORGANTE, C. V.; AIDAR, S. T.; CHAVES, A. R. M.; ANTONIO, R. P.; CRUZ, J. L.; FILHO, M. A. C. Evaluation of cassava germplasm for drought tolerance under field conditions. **Euphytica**, v. 213, article number 188, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1972-7>.

OLIVEIRA, G. M.; SANTOS, J. O.; SANTOS, C. B.; VOLTOLINI, T. V.; ANTONIO, R. P.; ANGELOTTI, F. Rise in temperature increases growth and yield of Manihot sp. plants. **Research, Society and Development**, v. 11, e15611929891, 2022a.

OLIVEIRA, K. E. S.; RIBEIRO, C.; ALMEIDA C. A.; PORTILHO, C.N. Editing genomes via CRISPR/CAS9 and applications in maize

improvement. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 21, e1284, 2022b.

OLIVEIRA, O. B.; LOPEZ, I.; CRANSTON, L.; KEMP, P.; DONAGHY, D. Using leaf regrowth stage to define defoliation interval for diverse pastures of complementary species (*Lolium perenne* L., *Bromus valdivianus* Phil., *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium repens* L.). **Journal of New Zealand Grasslands**, 85, p. 311-322, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33584/jnzg.2023.85.3642>.

OLIVEIRA, P. P. A. Uso de leguminosas forrageiras na época seca. In: SANTOS, M. E. R.; MARTUSCELLO, J. A. (org.). **Todo ano tem seca! Está preparado?: estratégias para produção e uso do pasto na época seca**. São Paulo: Reino Editorial, 2022. p. 257-289.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic forest biome, Southeastern of Brazil. **EUROPEAN Journal of Agronomy**, v. 158, 127219, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219>

OLIVEIRA, P. P. A.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S.; CORSI, M. Liming and fertilization for restoring degraded *Brachiaria decumbens* pasture on sandy soil. **Scientia agricola**, v.60, n.1, p. 125-131, 2003.

OLIVEIRA, P. P. A.; CORTE, R. R. S.; SILVA, S. L.; RODRIGUEZ, P. H. M.; SAKAMOTO, L. S.; PEDROSO, A. F.; TULLIO R. R.; BERNDT, A. The effect of grazing system intensification on the growth and meat quality of beef cattle in the Brazilian Atlantic Forest biome, **Meat Science**, v. 139, p. 157-161, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.019>.

OLIVEIRA, P. P. A.; OLIVEIRA, W. S. de; CORSI, M. Efeito residual de fertilizantes fosfatados solúveis na recuperação de pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, n. 6, p. 1715-1728, 2007a.

OLIVEIRA, P. P. A.; TREVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de; CORSI, M. Fertilização com N e S na recuperação de pastagem *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em Neossolo quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 4, p. 1121-1129, 2005.

OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de. Balanço do nitrogênio (15N) da ureia nos componentes de uma pastagem de capim-marandu sob recuperação em diferentes épocas de calagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 1982-1989, 2007b.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Relatório Mundial de Saúde 2006**. Brasília, DF, 2007. 210 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/i_inicio.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

PARLAMENTO EUROPEU. Regulamento (UE) 2020/741 do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de maio de 2020 relativo aos requisitos mínimos para a reutilização da água (Texto relevante para efeitos do EEE). **Jornal Oficial da União Europeia**, 5 jun. 2020. Disponível

em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; SILVA, G. V. da; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; PERNA JÚNIOR, F.; BERNDT, A.; MEDEIROS, S. R. de; PEDROSO, A. de F.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Performance and feed intake of Nellore steers in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Livestock Science**, v. 294, 105667, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2025.105667>.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; SILVA, G. V. da; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNETTI, H. B.; BOSI, C.; PEDROSO, A. de F.; PEZZOPANE, J. R. C.; OLIVEIRA, P. C. A.; RODRIGUES, P. H. M. Forage accumulation and nutritive value in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Crop & Pasture Science**, v. 75, n. 5, May 2024. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP24043>.

PEOPLES, M. B.; HERRIDGE, D. F.; LADHA, J. K. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. **Plant Soil**, v. 174, n. 1, p. 3-28, 1995.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p.103-111, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>.

PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. de F.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; BRUNETTI, H.; PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; RODRIGUES, P. H. M. Intercropping of tropical grassland and pigeon pea: Impact on microclimate, soil water, and forage production. **Rangelands Ecology & Management**, v. 95, p. 1-10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.04.005>.

POTTS, S. G.; IMPERATIZ-FONSECA, V.; NEGÓ, H. (ed.). **The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production**. Bonn, Germany, 2016. 55.6 p.. Disponível em: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/519227/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. de A. R.; CESARIO, F. V.; ANDRADE, A. G.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of Conservation Agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 1-6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>.

RAEISI, L. G.; MORID, S.; DELAVAR, M. Effect and side-effect assessment of different agricultural water saving measures in an integrated framework. **Agricultural Water Management**, v. 223, 105685, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105685>.

RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, 5989, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T. da; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P. da; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Resolução nº 419/2020. Estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial do Estado**, 21, jan. 2020. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202006/24135755-419-2020-estabelece-criterios-e-procedimentos-para-a-utilizacao-de-agua-de-reuso.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ROCHA, A.; GONÇALVES, E. Measuring the causal effect of no-till system adoption on Brazilian natural areas. **Soil and Tillage Research**, v. 239, 106053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106053>.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN III, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; FOLKE, C.; SHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A.; HUGHES, T.; LEEUW, S. van der; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORREL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature**, v.461, p.472-475, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/461472a>.

ROSSETTI, L. A. Seguro rural e zoneamento agrícola no Brasil: novos rumos. **Revista de Política Agrícola**, v.7, n.4, p. 33-43, 1998.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023>.

SANTOS, J. O.; ANGELOTTI, F.; COSTA-LIMA, T. C. Does elevated CO2 affect the biological aspects of *Liriomyza sativae* in melon plants? **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 2151-2162, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n4p2151>.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200128>.

SARAVA, K. R.; VIANA, T. V. A.; BEZERRA, F. M. L.; COSTA, S. C.; GONDIM, R. S. Regulated deficit irrigation and different mulch types on fruit quality and yield of watermelon. **Revista Caatinga**, v. 30, p. 437-446, 2017.

SCHULMAN, P.; LOPES FILHO, L. C.; BASÍLIO, J. P.; BARBOSA, E. T.; TORMEN, N.; NUNES, R. de S.; ALTMANN, N.; MOURA, J. B. de; LOBO JUNIOR, M. Cover crops as a strategy for root rot management in common beans: effects on crop performance and root microbial dynamics in a Cerrado soil. **Rhizosphere**, v. 33, 101015, 2025.

SILVA, V. C. da; SANTANA, M. da S.; PARENTE, A. G.; GONDIM, R. S.; SILVEIRA, C. da S.; SALVIANO, A. M.; DEUS, T. R. V. de; VALLADARES, G. S.; GIONGO, V. Modeling future carbon stock in melon cultivation agroecosystems under different climate scenarios. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 59, e1729, 2024.

SILVA, W. O.; BARROS, J. R. A.; SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; NASCIMENTO, L. A.; ANGELOTTI, F. Water availability and growing season temperature on the performance of sorghum cultivars. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 19, p. 1-8, 2024.

TELLES T. S.; DECHEN S. C. F.; GUIMARÃES, M. F. Institutional landmarks in Brazilian research on soil erosion: a historical overview. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, p.1431-1440, 2013.

THORNTON, P. K.; HERRERO, M. Climate change adaptation in mixed crop-livestock systems in developing countries. **Global Food Security**, v. 3, p. 99-107, 2014.

VALLE, C. B. DO; JANK, L.; BARRIOS, S. C. L.; SANTOS, M. F. Melhoramento genético de gramíneas forrageiras tropicais com foco nas mudanças climáticas. In: PEDREIRA, C. G. S.; SILVA, S. C. da; SANTOS, P. M.; MOURA, J. C. de (ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 28., 2017, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba: Fealq, 2017. p. 119-162.

VAN OPSTAL, J.; DROOGERS, P.; KAUNE, A.; STEDUTO, P.; PERRY, C. **Guidance on realizing real water savings with crop water productivity interventions**. Wageningen: FAO: FutureWater, 2021.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; SHIMATA, I.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Economic viability of a crop-livestock integration system. **Ciência Rural**, v. 51, 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190538>.

WOLDITSADIK, M.; BEYENE, T.; ABI, D. Investigating the Role of Honeybee (*Apis mellifera* L.) Pollination on Seed Yield of Soybean (*Glycine max* L. Merrill). **American Journal of BioScience**, v. 11, n. 4, p. 88-91, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11648/jajbio.20231104.12>.