Paradoxo tecnológico na produtividade da cana-de-açúcar no Brasil: desafios e perspectivas

The technological paradox in sugarcane productivity in Brazil: challenges and prospects

Vinicius Palácio
UNESP. Tupã, SP, Brasil
Wagner Luiz Lourenzani
UNESP. Tupã, SP, Brasil
Eduardo Guilherme Satolo
UNESP. Tupã, SP, Brasil
Bruce Wellington Amorin da Silva
UNESP. Tupã, SP, Brasil
Gustavo Arantes Miranda
UNESP. Tupã, SP, Brasil

GT 03 - Evolução, estrutura, competitividade e dinâmica das cadeias agroindustriais

Resumo: Este estudo analisa os fatores de inovação que impactam a produtividade da atividade agrícola no setor sucroenergético brasileiro, fundamentando-se nas linhas temáticas do Plano de Apoio à Inovação do Setor Sucroenergético (PAISS). O objetivo central foi avaliar as oportunidades de inovação e os gargalos que sustentam o chamado "paradoxo tecnológico", onde a crescente incorporação de tecnologias não se traduziu em aumentos equivalentes na produtividade média do canavial. A metodologia consistiu em uma abordagem qualitativa, exploratória e interpretativa, baseada em uma revisão de literatura conduzida entre janeiro e março de 2025 nas bases Scopus® e Web of Science™. Os resultados indicam que, embora tenha ocorrido uma expansão vigorosa da área colhida entre 2003 e 2013, a produtividade média nacional entrou em uma fase de estagnação ou declínio marginal. Identificou-se uma "lacuna tecnológica estrutural", evidenciando que inovações em áreas como melhoramento genético, mecanização e agricultura de precisão ainda enfrentam barreiras de integração, conectividade e adoção homogênea. As oportunidades de inovação — novas variedades, máquinas avançadas, sistemas de gestão integrados e métodos de propagação — permanecem como os eixos estratégicos mais promissores. Conclui-se que o avanço da produtividade depende menos da criação de novas agendas e mais do aprofundamento e da integração sistêmica das tecnologias já existentes, buscando conciliar eficiência operacional com resiliência climática e sustentabilidade.
Palavras-chave: Produtividade, inovação, cana-de-açúcar.

Abstract: This study analyzes the innovation factors that impact agricultural productivity in Brazil's sugar-energy sector, based on the thematic areas of the Sugar-Energy Sector Innovation Support Plan (PAISS). The main objective was to assess the opportunities for innovation and the bottlenecks that underpin the so-called "technological paradox," where the growing incorporation of technologies has not translated into equivalent increases in average sugarcane field productivity. The methodology consisted of a qualitative, exploratory, and interpretive approach, based on a literature review conducted between January and March 2025 in the Scopus® and Web of Science™ databases. The results indicate that, although there was a vigorous expansion of the harvested area between 2003 and 2013, national average productivity entered a phase of stagnation or marginal decline. A "structural technological gap" was identified, showing that innovations in areas such as genetic improvement, mechanization, and precision agriculture still face barriers to integration, connectivity, and widespread adoption. Opportunities for innovation—new varieties, advanced machinery, integrated management systems, and propagation methods—remain the most promising strategic areas. It can be concluded that productivity gains depend less on the creation of new agendas and more on the further development and systemic integration of existing technologies, with a view to reconciling operational efficiency with climate resilience and sustainability.
Keywords: Productivity, innovation, sugarcane.

1. Introdução

O Brasil ocupa posição central no cenário mundial da cana-de-açúcar: é o maior produtor de cana (FAO, 2023), o maior produtor de açúcar (USDA, 2023) e o segundo maior produtor de etanol (RFA, 2023). Entre 2003 – ano de consolidação dos motores bicombustíveis – e 2023, tanto a área colhida quanto a produção nacional de cana mais do que duplicaram (IBGE, 2023). Desse processo de expansão, cerca de 55% concentraram-se no estado de São Paulo, principal polo sucroenergético do país, com destaque para a região centro-oeste paulista (IBGE, 2023; Kodama; Lourenzani, 2021).

Esse crescimento foi fortemente impulsionado por políticas públicas e instrumentos de fomento que incentivaram investimentos em infraestrutura, construção e ampliação de usinas, aumento da capacidade de processamento e estímulos à produção e exportação de açúcar e etanol (Castro, 2020; Ruas; Ferreira; Bray, 2014; Kohlhepp, 2010). Como resultado, observaram-se efeitos econômicos positivos expressivos, como geração de emprego e renda, dinamização regional e incremento da arrecadação pública (Bacchi; Caldarelli, 2015; Satolo; Bacchi, 2009; Moraes, 2007).

Ao mesmo tempo, a expansão acelerada do setor sucroenergético desencadeou um intenso debate sobre sustentabilidade, envolvendo impactos ambientais, sociais e sobre a produção de alimentos e segurança alimentar (Castro, 2020; Caldarelli; Gilio, 2018; Camara; Caldarelli, 2016; Gilio; Moraes, 2016; Loarie et al., 2011; Goldemberg et al., 2008; Martinelli; Filoso, 2008; Nassar et al., 2008). Fica claro, portanto, que a expansão da cana-de-açúcar é um fenômeno complexo, com desdobramentos socioeconômicos, tecnológicos e ambientais, e que demanda análise multidimensional, especialmente quando se discute produtividade agrícola e inovação.

Em qualquer negócio intensivo em terra, capital e tecnologia, o crescimento sustentável da produção e da produtividade está diretamente associado ao desenvolvimento e difusão de novas tecnologias (OECD/Eurostat, 2005). No caso da cana-de-açúcar, observou-se, nas últimas décadas, forte incorporação tecnológica: lançamento de novas variedades, evolução de máquinas de plantio e colheita, maior presença de agricultura de precisão, sensores, ferramentas digitais e, mais recentemente, aplicações de inteligência artificial ao campo.

Entretanto, diversos estudos indicam que esse esforço tecnológico não se refletiu, na mesma magnitude, em aumentos consistentes de produtividade agrícola (Bernardo et al., 2019; IBGE, 2023; Nyko et al., 2013). Em especial, quando se analisa a produtividade média (t ha^{-1})

no Brasil, em São Paulo e nas demais regiões entre 2003 e 2023, verifica-se uma tendência de estagnação ou relativo declínio. O resultado é um "paradoxo tecnológico": mais tecnologia incorporada, mas sem um salto equivalente na produtividade do canavial.

A cana-de-açúcar tem longa trajetória no Brasil. Introduzida aproximadamente em 1516, consolidou-se inicialmente no Nordeste, com a instalação de engenhos de açúcar impulsionados pela boa adaptação da cultura ao clima tropical (Braibante et al., 2013). Ao longo do século XX, programas como o PROÁLCOOL (criado em 1975) e, posteriormente, iniciativas como a RIDESA e diversas ações de pesquisa, consolidaram o papel da cultura na matriz energética e econômica do país (Carvalho et al., 2013; Ruiz, 2006; Pamplona, 1984).

O PROÁLCOOL, em particular, promoveu grande redução da dependência de combustíveis fósseis, gerou emprego e renda e estimulou o desenvolvimento tecnológico em toda a cadeia (Lima et al., 1995; Stolf; Oliveira, 2015). Nos anos 2000, um novo ciclo de expansão foi desencadeado pelo advento dos motores *flex fuel*, pela alta do petróleo e por políticas voltadas à produção de biocombustíveis (Goldemberg et al., 2014; Tsutiya; Zakir; Pigatto, 2008; Nass et al., 2007; Leite; Leal, 2007).

Diante do cenário descrito – alta relevância econômica e energética, expansão territorial, forte desenvolvimento tecnológico, mas estagnação de produtividade – emerge uma questão central: quais são, de fato, as oportunidades de inovação que afetam a produtividade agrícola da cana-de-açúcar e como elas se organizam à luz dos fatores estruturais e conjunturais discutidos na literatura?

A partir dessa problematização, este estudo tem como objetivo geral avaliar os fatores de inovação que afetam a produtividade da atividade agrícola do setor sucroenergético brasileiro, tomando como referência as linhas agrícolas do Plano de Apoio à Inovação do Setor Sucroenergético (PAISS) e o estado atual do conhecimento científico.

2. Metodologia

O presente estudo foi desenvolvido por meio de uma abordagem qualitativa, de caráter interpretativo e exploratório, fundamentada na revisão de literatura científica acerca da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, das limitações estruturais do setor e das oportunidades de inovação associadas ao sistema de produção.

A escolha por uma abordagem qualitativa segue a premissa de que fenômenos agronômicos e tecnológicos complexos — como estagnação produtiva, adoção tecnológica, integração de sistemas e dinâmica de inovação — exigem uma compreensão profunda e

contextualizada, conforme argumentam Creswell (2014) e Flick (2018). Assim, buscou-se interpretar tendências, comparar evidências, identificar padrões recorrentes e analisar criticamente a evolução tecnológica do setor à luz das oportunidades de inovação.

A revisão de literatura foi conduzida entre janeiro e março de 2025 nas bases de dados Scopus® e Web of Science™, reconhecidas pela abrangência, rigor metodológico e relevância internacional. Utilizaram-se combinações de palavras-chave em português e inglês relacionadas ao tema central, tais como “sugarcane productivity”, “agricultural innovation”, “varieties”, “mechanization”, “precision agriculture”, “biotechnology”, “yield stagnation”, “climate impacts”, “plant propagation systems”, entre outras. Os operadores booleanos AND, OR e NOT foram aplicados para refinar a busca e evitar redundâncias.

Os critérios de inclusão contemplaram: (i) artigos científicos revisados por pares; (ii) estudos com foco na produtividade agrícola da cana-de-açúcar ou na análise de tecnologias aplicadas ao setor sucroenergético; (iii) pesquisas relacionadas ao desenvolvimento varietal, mecanização, agricultura de precisão, integração de sistemas, biotecnologia ou métodos de propagação; e (iv) trabalhos que apresentassem dados empíricos, modelos conceituais ou discussões analíticas aplicáveis ao contexto brasileiro. Foram excluídos resumos expandidos, notas técnicas sem respaldo empírico, artigos com foco exclusivo na indústria (processo fabril) e estudos sobre culturas energéticas alternativas, por não comporem o escopo desta investigação.

Durante a revisão, foram identificados estudos centrais que embasam a discussão contemporânea sobre produtividade e inovação em cana-de-açúcar. Destacam-se; Dias et al. (2016) e Gouvêa et al. (2020) sobre impactos climáticos e estabilidade produtiva; Landell et al. (2014) e Cursi et al. (2022) sobre avanços e limitações no desenvolvimento de variedades; Santos et al. (2021) sobre integração operacional e agricultura de precisão; e Marin et al. (2020) sobre uso de dados climáticos e modelagem agrícola.

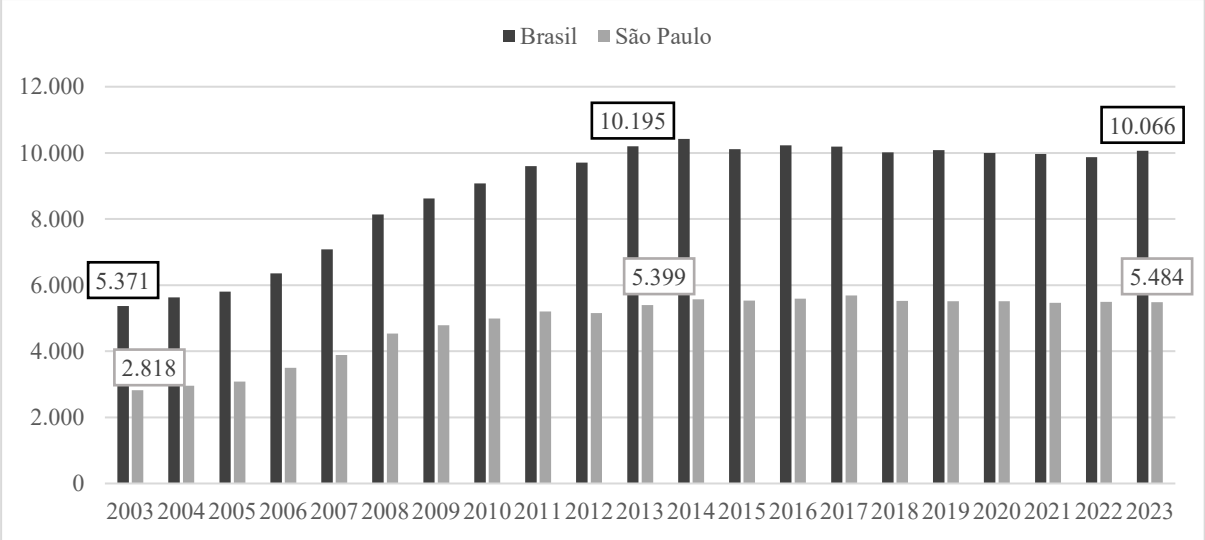
Após a seleção e leitura dos artigos, empregou-se análise temática com categorização dos conteúdos, seguindo a metodologia proposta por Braun e Clarke (2006). Essa etapa permitiu construir interpretações sólidas e identificar convergências teóricas, reforçando a análise crítica apresentada na seção de discussão.

3. Resultados e Discussão

3.1 – Produtividade agrícola da cana-de-açúcar no Brasil

A Figura 1 apresenta a trajetória da área colhida de cana-de-açúcar no Brasil e no estado de São Paulo entre os anos de 2003 e 2023, evidenciando um ciclo de expansão vigorosa seguido por um período de estabilização. Observa-se que, na primeira década analisada (2003-2013), houve um crescimento acelerado da área nacional, que saltou de aproximadamente 5,37 milhões de hectares para o pico histórico de 10,19 milhões de hectares. Esse fenômeno reflete o forte incentivo ao setor sucroenergético ocorrido no período, impulsionado pela consolidação da tecnologia *flex-fuel* na frota automobilística brasileira e pela política de expansão de novas unidades produtoras, especialmente na região Centro-Sul. A partir de 2013, o gráfico revela uma fase de maturidade e consolidação da área plantada, caracterizada por oscilações marginais e uma tendência de estabilidade em torno de 10 milhões de hectares em nível nacional. No contexto regional, o estado de São Paulo mantém-se como o principal polo produtivo, representando, historicamente, cerca de 50% da área total colhida no país.

Figura 1 – Área colhida (x 1000 ha) de cana-de-açúcar no Brasil e estado de São Paulo, entre 2003 e 2023



Fonte: a partir dos dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2023).

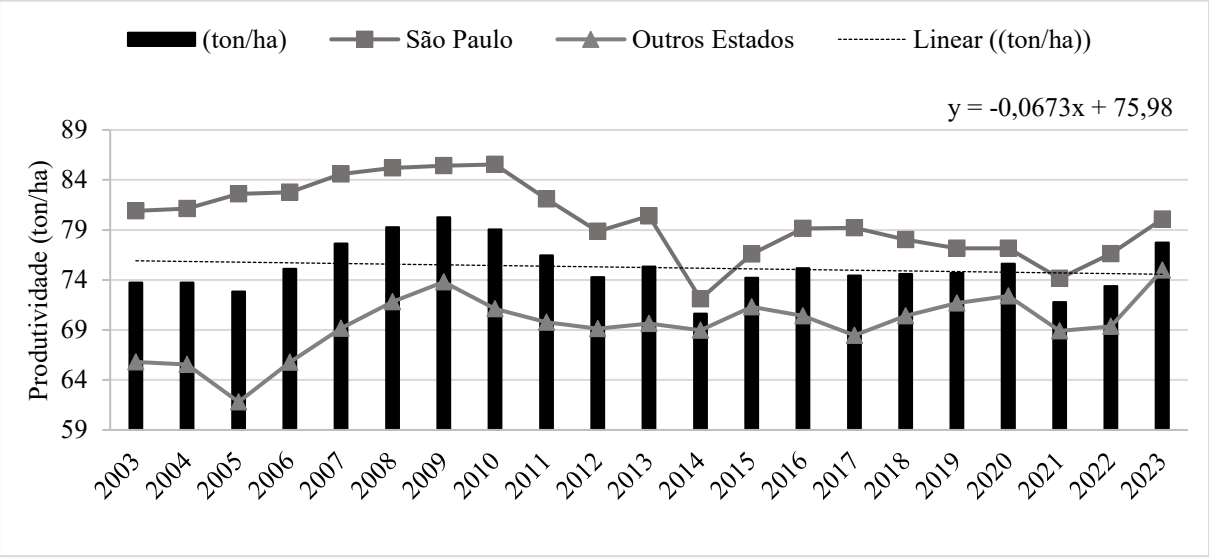
A concentração da expansão em São Paulo pode ser explicada pela existência de infraestrutura prévia, disponibilidade de terras adequadas, presença de centros de pesquisa, capital humano qualificado e trajetória histórica de investimentos industriais e logísticos

(Barros; Moraes, 2002). A difusão tecnológica tende a ocorrer com mais intensidade em regiões já estruturadas, o que reforçou o protagonismo paulista na produção de cana, açúcar e etanol.

No entanto, a expansão produtiva também foi acompanhada de mudanças importantes na regulação ambiental e no modelo de produção. A criação do protocolo agroambiental em São Paulo, em 2007, estabeleceu metas de eliminação gradual das queimadas de canaviais, impondo a transição para a colheita mecanizada em larga escala. Esse movimento trouxe ganhos ambientais relevantes, mas também desafios agronômicos: aumento de palhada em campo, necessidade de adequação do manejo de pragas e doenças, impacto do tráfego de máquinas sobre as soqueiras e maior complexidade operacional em fazendas de grande escala (Nyko et al., 2013).

A Figura 2 ilustra a evolução da produtividade média da cana-de-açúcar no Brasil entre os anos de 2003 e 2023. Observa-se que o estado de São Paulo mantém, de forma consistente, patamares superiores de rendimento (ton/ha) em comparação à média nacional e aos outros estados, embora tenha apresentado uma tendência de declínio e maior volatilidade a partir de 2010. Este comportamento sugere que, apesar do predomínio tecnológico e edafoclimático da região paulista, fatores como a expansão para áreas de fronteira agrícola com solos de menor aptidão ou a ocorrência de eventos climáticos adversos podem ter impactado a estabilidade da produção na última década.

Figura 2 – Produtividade média (toneladas colhidas/hectare) de cana-de-açúcar no Brasil, São Paulo e demais estados brasileiros, entre 2003 e 2023



Fonte: a partir dos dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2023).

A análise da linha de tendência linear para a produtividade nacional revela um coeficiente angular negativo, indicando uma trajetória de estagnação ou decréscimo marginal nos rendimentos médios ao longo do período de vinte anos.

3.2 - Fatores estruturais e conjunturais da produtividade agrícola da cana-de-açúcar

A literatura propõe a distinção entre fatores estruturais e conjunturais para entender a dinâmica da produtividade (Nyko et al., 2013; Bernardo et al., 2019). Os fatores conjunturais são aqueles que provocam oscilações de curto prazo, como variações climáticas sazonais, veranicos, excesso de chuva, falhas no planejamento de reforma de canaviais e eventos econômicos específicos. Já os fatores estruturais são de natureza mais duradoura: mecanização agrícola, mudanças na base varietal, uso anterior do solo, arranjos de propriedade, trajetória tecnológica e nível de capitalização dos produtores.

Em termos de produtividade, dados históricos mostram um avanço expressivo entre as décadas de 1970 e 2000, com a produtividade de cana passando de cerca de 49 t ha^{-1} para patamares em torno de 80 t ha^{-1} e o ART aumentando de 87 para 140 kg t^{-1} (Ivo et al., 2008; IBGE, 2023). Entretanto, nas últimas duas décadas, essa trajetória perdeu força, configurando o quadro de estagnação discutido por Nyko et al. (2013), Bernardo et al. (2019) e Gasques et al. (2016).

Além disso, aspectos macro e microeconômicos influenciam diretamente a capacidade de investimento e inovação em relação a aspectos que viabilizassem elevação das produtividades. Crises econômicas, variações cambiais, preço de insumos importados, sinalização de políticas públicas e volatilidade de preços internacionais de açúcar e etanol afetam o apetite por novas tecnologias e podem retardar a renovação de canaviais, a adoção de máquinas mais modernas ou a implementação de soluções de agricultura de precisão (Ivo et al., 2008; Tsautiya; Zakir; Pigatto, 2008; Buainain; Vieira, 2018).

Do ponto de vista tecnológico, três eixos se destacam: melhoramento genético e base varietal, sistemas de plantio e propagação e adoção de ferramentas de mecanização e agricultura de precisão. No campo varietal, o Brasil conta com importantes instituições – RIDESA, IAC, CTC, EMBRAPA e centros de P&D de usinas – que impulsionaram o lançamento de cultivares com maior potencial produtivo, melhor adaptação a ambientes específicos e maior resistência a pragas e doenças. Ainda assim, materiais antigos seguem amplamente utilizados, e a difusão de novas variedades nem sempre é rápida ou homogênea no território (Landell et al., 2012; Bernardo et al., 2019). A complexidade genética da cana, caracterizada por genoma poliploide

e aneuploide, dificulta tanto o melhoramento convencional quanto o uso mais amplo de ferramentas de biotecnologia, como apontado por Javed (2020).

No plantio, o sistema tradicional de uso de grande quantidade de colmos picados apresenta desafios operacionais, de custo e de uniformidade de estande (Coleti; Stupello, 2006; Barros; Milan, 2010; Moretto; Cavichioli, 2022). Métodos inovadores, como o plantio com mudas pré-brotadas (MPB), desenvolvidos pelo IAC, surgem como alternativas para reduzir o volume de material de plantio, melhorar a uniformidade, sanidade e aproveitamento hídrico e nutricional. Contudo, ainda enfrentam barreiras de escala, logística e adoção em nível comercial (Landell et al., 2012).

Do lado da mecanização, o avanço de colhedoras e tratores equipados com tecnologia embarcada trouxe ganhos importantes em eficiência e segurança, mas também novos gargalos: pisoteio de linhas, falhas de soqueira, compactação e necessidade de operadores qualificados. Ao mesmo tempo, soluções de agricultura de precisão, telemetria, monitoramento remoto e integração de dados ainda não são plenamente exploradas em muitas regiões, limitando sua contribuição para o aumento da produtividade (Santos et al., 2021; Marin et al., 2020).

A dimensão climática, por sua vez, segue como fator crítico. Embora o Brasil apresente condições edafoclimáticas favoráveis para a cana, a irregularidade da distribuição de chuvas, episódios de seca e eventos extremos podem comprometer significativamente a produtividade. Estudos como os de Gouvêa (2008) indicam que, em condições ideais de água e temperatura, o potencial produtivo pode atingir níveis superiores a 200 t ha^{-1}, evidenciando o grande gap entre potencial e produtividade média efetiva.

3.3 - Lacuna Tecnológica Estrutural

A partir de todo o contexto, aliados à análise histórica e tecnológica do setor sucroenergético, evidencia-se que a produtividade agrícola da cana-de-açúcar no Brasil enfrenta um paradoxo amplamente documentado na literatura: apesar do avanço significativo em práticas de manejo, mecanização e desenvolvimento tecnológico, a produtividade não acompanhou a mesma velocidade de evolução (Dias et al., 2016; Marin et al., 2020; Gouvêa et al., 2020).

A estagnação produtiva observada em diferentes regiões canavieiras confirma o que autores têm chamado de “lacuna tecnológica estrutural”, na qual o conjunto de inovações adotadas é insuficiente para transformar a base produtiva em escala sistêmica (Lndell et al., 2014; Cursi et al., 2022). Assim, embora o setor tenha evoluído, os avanços ainda não atingiram

o grau de integração e profundidade necessário para promover ganhos expressivos e sustentáveis de produtividade.

Diante desse contexto de expansão, estagnação produtiva e múltiplos desafios, o BNDES e a FINEP lançaram, em 2013, o Plano de Apoio à Inovação do Setor Sucroenergético (PAISS), com linhas específicas para o segmento agrícola. O plano identifica cinco grandes linhas temáticas (Quadro 1).

Quadro 1 – Plano de Apoio a Inovação do Setor Sucroenergético – Linha Agrícola

Identificação	Descrição da oportunidade de inovação
Linha 1	Novas variedades, sobretudo: aquelas voltadas aos ambientes de produção das regiões de fronteira; mais adequadas à mecanização agrícola; e/ou com maiores quantidades de biomassa e/ou ATR, com ênfase na utilização de melhoramento transgênico;
Linha 2	Máquinas e implementos para plantio e/ou colheita, bem como para coleta de palha e/ou resíduos, com ênfase na ampliação do uso de técnicas de agricultura de precisão;
Linha 3	Sistemas integrados de manejo, planejamento e controle da produção;
Linha 4	Técnicas mais ágeis e eficientes de propagação de mudas e dispositivos biotecnológicos inovadores para o plantio e;
Linha 5	Adaptação de sistemas industriais para culturas energéticas compatíveis, complementares e/ou consorciáveis com o sistema agroindustrial do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar.

Fonte: BNDES (2013).

Essa convergência entre o diagnóstico do PAISS e as análises recentes de produtividade sugere que o setor dispõe de um mapa claro de onde estão seus gargalos e potenciais de inovação. O desafio, portanto, não é tanto identificar "novas" agendas, mas aprofundar, integrar e acelerar a implementação das oportunidades já reconhecidas.

3.4 - Oportunidades de Inovação na produção de cana-de-açúcar

Com base na literatura recente (Nyko et al., 2013; Bernardo et al., 2019; Javed, 2020; Dias et al., 2016; Landell et al., 2014; Cursi et al., 2022; Marin et al., 2020; Santos et al., 2021), observa-se que as quatro primeiras linhas continuam sendo, até hoje, os principais eixos de oportunidade para elevar a produtividade agrícola: atualização e diversificação da base varietal, mecanização avançada integrada à agricultura de precisão, sistemas inteligentes de gestão e manejo, e inovações em propagação e biotecnologia. A quinta linha, por tratar de diversificação industrial para outras culturas energéticas, é importante em termos de bioeconomia, mas não

constitui foco central quando a questão é, especificamente, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

O primeiro eixo diz respeito ao desenvolvimento de novas variedades, especialmente materiais com maior responsividade à mecanização, adaptáveis a ambientes de expansão e capazes de expressar elevadas produtividades de biomassa e de ATR. A literatura confirma que o desafio do melhoramento varietal persiste, sobretudo pela dificuldade em conciliar produtividade, sanidade, longevidade e resiliência climática em um único material genético (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011; Cursi et al., 2022). Além disso, avanços em biotecnologia — como transgenia e edição gênica — amplamente discutidos por Cheavegatti-Gianotto et al. (2011) e Viswanathan e Thangavelu (2020), ainda não atingiram o nível de aplicação prática esperado, seja por barreiras regulatórias, seja pelo investimento ainda limitado em programas disruptivos de inovação genética.

O segundo eixo, relacionado à evolução de máquinas e implementos agrícolas integrados a sistemas de agricultura de precisão, também continua entre os principais gargalos do setor. Apesar do parque mecanizado brasileiro ter incorporado equipamentos mais modernos e sensores embarcados, a adoção real de tecnologias de precisão ainda é heterogênea e frequentemente subutilizada — problema já apontado por Santos et al. (2021). Questões como conectividade limitada no campo, baixa interoperabilidade digital, carência de capacitação técnica, custos elevados e dificuldade de integração de dados restringem o potencial produtivo que tais tecnologias poderiam proporcionar.

O terceiro eixo refere-se aos sistemas integrados de manejo, planejamento e controle da produção. Embora a literatura aponte avanços importantes no uso de telemetria, softwares de gestão agrícola e sensores agroambientais, diversos autores destacam que a mera disponibilidade de ferramentas não garante aumento de produtividade (Flick, 2018; Creswell, 2014). Em grande parte das unidades produtoras, a tomada de decisão ainda ocorre de maneira fragmentada e com base em dados incompletos, sem utilização plena de análises preditivas, modelos de otimização ou integração entre informações climáticas, operacionais e agronômicas. Como defendem Marin et al. (2020) e Gouvêa et al. (2020), a ausência de modelos robustos de integração clima-produção limita a capacidade de respostas rápidas e adaptativas, contribuindo para perdas operacionais e redução da eficiência agrícola.

O quarto eixo, que aborda métodos ágeis de propagação e soluções biotecnológicas inovadoras para o plantio, permanece igualmente relevante. Embora sistemas como MPB, viveiros tecnificados e bioestimulantes tenham avançado, ainda há limitações relacionadas a

custo, escala, logística e padronização, conforme discutem Cheavegatti-Gianotto et al. (2011) e Viswanathan e Thangavelu (2020). A necessidade de maior eficiência no estabelecimento de novos canaviais, com reduzidas perdas iniciais e maior sanidade, segue como um dos pontos mais críticos para elevar a produtividade média do setor.

Por outro lado, a quinta linha do PAISS — voltada à adaptação industrial para culturas energéticas complementares ou consorciadas — não foi considerada central neste trabalho. Embora possua relevância estratégica para a diversificação industrial e bioenergética, ela não se relaciona diretamente com o objetivo deste estudo, que é identificar oportunidades para o aumento da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Ademais, práticas de rotação com culturas como soja e amendoim já são amplamente adotadas, constituindo manejos consolidados e não caracterizando inovação no contexto atual.

A permanência dos quatro primeiros eixos como oportunidades estratégicas após doze anos reforça um ponto crucial: a evolução tecnológica isolada não basta para promover aumentos expressivos e sustentáveis de produtividade. A literatura corrobora que ganhos estruturais só emergem quando tecnologias são adotadas de forma integrada, complementar e coerente dentro de sistemas produtivos complexos (Landell et al., 2014; Cursi et al., 2022; Santos et al., 2021). Ou seja, mecanismos de inovação incremental precisam ser acompanhados de transformações mais profundas, capazes de alterar o desenho atual da produção agrícola e torná-lo mais resiliente, adaptativo e orientado por dados.

Além disso, a intensificação da variabilidade climática — amplamente documentada por Marin et al. (2020) e Dias et al. (2016) — torna evidente que o futuro da produtividade dependerá cada vez mais da integração inteligente entre genética, manejo, mecanização e modelos de previsão. Estratégias como sistemas de alerta precoce, previsões aplicadas, análises preditivas e manejo adaptativo emergem como pilares fundamentais para reduzir riscos e ampliar a eficiência agrícola.

4. Considerações Finais

O presente estudo atingiu seu objetivo ao analisar, de forma crítica e fundamentada, as principais oportunidades de inovação para o avanço da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, demonstrando que os desafios identificados há mais de uma década permanecem atuais. A revisão de literatura e a discussão dos eixos tecnológicos evidenciaram que, embora o setor tenha incorporado melhorias relevantes em mecanização, manejo, biotecnologia e uso de dados, tais avanços ainda não se traduziram em ganhos consistentes de produtividade em larga escala.

A estagnação produtiva observada em diferentes regiões reforça que o sistema agrícola ainda carece de maior integração tecnológica, resiliência climática e eficiência operacional.

A literatura aponta que esse cenário é resultado de uma combinação de múltiplos fatores de natureza política, institucional, científica e tecnológica (Ivo et al., 2008; BERNARDO et al., 2019). Inovações públicas e privadas – desde programas de melhoramento genético até soluções de manejo e mecanização – foram importantes para o avanço do setor, mas parecem ter encontrado limites, tanto estruturais (de longo prazo) quanto conjunturais (de curto prazo), que restringem o ganho adicional de produtividade.

Ao mesmo tempo, a própria noção de "oportunidade de inovação" é complexa no contexto agrícola. Como argumenta Javed (2020), o setor sucroenergético é dinâmico, com múltiplos atores, tecnologias e ambientes produtivos, o que torna difícil classificar e priorizar oportunidades de inovação. Em termos conceituais, oportunidades de inovação podem ser entendidas como conjuntos de circunstâncias que permitem criar soluções capazes de gerar valor econômico, social ou ambiental – geralmente associadas a lacunas, gargalos ou problemas ainda não resolvidos de forma eficiente. No caso da cana-de-açúcar, essas oportunidades se relacionam diretamente aos fatores que condicionam a produtividade agrícola.

A não elevação da produtividade, respeitando os limites sociais e ambientais, implica perda relativa de competitividade. Por outro lado, aumentar a produção às custas de impactos socioambientais inaceitáveis tampouco é viável. Diante disso, produzir soluções inovadoras passa a ser o caminho necessário: a base técnica e regulatória já existe, e o desafio recai em conceber e implementar inovações que conciliem produtividade, sustentabilidade e competitividade.

Ainda assim, os quatro primeiros eixos do Plano PAISS continuam representando as áreas mais promissoras para aceleração da produtividade no futuro: melhoramento genético mais adaptado às demandas contemporâneas, mecanização avançada integrada à agricultura de precisão, sistemas inteligentes de manejo e gestão, e métodos modernos de propagação e biotecnologia. Como evidenciado ao longo do trabalho, essas oportunidades permanecem abertas para soluções mais disruptivas, capazes de transformar estruturalmente o sistema de produção. Portanto, conclui-se que o caminho para ganhos expressivos e sustentáveis depende menos da criação de novas agendas e mais do aprofundamento, integração e ampliação das inovações já propostas — consolidando um setor mais competitivo, eficiente e preparado para os desafios dos próximos anos.

Referências

BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Impactos socioeconômicos da expansão do setor sucroenergético no Estado de São Paulo, entre 2005 e 2009. **Nova economia**, v. 25, p. 209-224, 2015.

BARROS, F. F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, p. 221-229, 2010.

BARROS, G. S. C.; MORAES, M. A. F. D. A desregulamentação do setor sucroalcooleiro. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 156-173, 2002.

BERNARDO, R., LOURENZANI, W., SATOLO, E., & CALDAS, M. Analysis of the agricultural productivity of the sugarcane crop in regions of new agricultural expansions of sugarcane. **Gestão & Produção**, 2019. https://doi.org/10.1590/0104-530X3554-19.

BNDES PAISS. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Plano de Apoio a Inovação do Setor Sucroenergético – Agrícola. 2013. Disponivel em http://www.bndes.gov.br/paissagricola. Acesso em 03 março de 2023.

BRAIBANTE, M. E. F. *et al*. A cana-de-açúcar no Brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. **Química nova na escola**, v. 35, n. 1, p. 3-10, 2013.

BRAUN, V.; CLARKE, V. Using thematic analysis in psychology. **Qualitative Research in Psychology**, v. 3, n. 2, p. 77-101, 2006.

BUAINAIN, A. M.; VIEIRA, P. A. **Produtividade na agricultura:** o fator esquecido. 2018. Disponível em: https://www.grupocultivar.com.br/artigos/produtividade-na-agricultura-o-fatoresquecido. Acesso em: 10 jun. 2023.

CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, v. 76, p. 264-274, 2018.

CASTRO, N. R. et al. The Brazilian agribusiness labor market: measurement, characterization and analysis of income differentials. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 58, 2020.

CARVALHO, L. *et al*. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2015 . Disponível em: < https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231_Vinhaca_-Criterios-e-procedimentos-para-aplicacao-no-solo-agricola-3a-Ed-2a-VERSAO.pdf>. Acesso em: 04 de ago. 2023.

COLETI, J.T.; STUPIELLO, J.J.; Plantio da cana-de-açúcar. In. SEGATO, S.V; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M.. **Atualizações em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006.

CRESWELL, J. W. Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 4. ed. Thousand Oaks: **Sage Publications**, 2014.

CURSI, R. B. et al. Advances and challenges in sugarcane breeding in Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 22, e392222212, 2022.

DANTAS, G. A.; LEGEY, L. F.L.; MAZZONE, A. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 356-364, 2013.

DE MORAIS, J. E. F. *et al*. Sugarcane (Saccharum officinarum L.) under saline stress: Growth, productivity, technological quality, and industrial yield. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115642, 2022.

DIAS, H. B. et al. Sugarcane yield gap analysis in Brazil under climate change scenarios. **Field Crops Research**, v. 191, p. 28-39, 2016.

FAO. United Nations Food and Agriculture Organization**. Faostat**. 2023. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC. Acesso em: 10 jun. 2023.

FLICK, U. An introduction to qualitative research. 6. ed. London: **SAGE** Publications, 2018.

GASQUES, J. G.; BACCHI, M. R. P.; RODRIGUES, L.; BASTOS, E. T.; CONSTANZA, V. Produtividade da agricultura brasileira: a hipótese da desaceleração. In: **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, 391 p., 2016. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9241. Acesso em: 05 jul. 2023.

GIGLIO, L.; DE MORAES, M. A. F. D. Sugarcane industry's socioeconomic impact in São Paulo, Brazil: A spatial dynamic panel approach. **Energy Economics**, v. 58, p. 27-37, 2016.

GOES, T.; MARRA, R. **A expansão da cana-de-açúcar e sua sustentabilidade**, 2008. Disponível em: https://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2008/A. Acesso em: 11 jun. 2023.

GOLDEMBERG, J. *et al*. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14-18, 2014.

GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., & GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, p. 2086– 2097, 2008.

GOUVEIA, J. R. F. **Mudanças climáticas e a expectativas de seus impactos na cultura de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**, SP. Orientador: Paulo Cesar Sentelhas. 2008. 100 f. Dissertação (mestrado). Curso de física do meio ambiente, Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2008.

GOUVÊA, L. R. L. et al. Climate variability and sugarcane yield: risks and adaptation strategies in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 178, p. 102-738, 2020.

GUERZONI, J.T.S., BELINTANI, N.G., MOREIRA, R.M.P., HOSHINO, A.A., DOMINGUES, D.S., FILHO, J.C.B., VIEIRA, L.G.E., 2014. Stress-induced-pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS) gene confers tolerance to salt stress in transgenic sugarcane. **Acta Physiol. Plant**. 36, 2309–2319. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1579-8.

GUPTA, M., BANGOTRA, R., SHARMA, S., VAID, S., KAPOOR, N., DUTT, H.C., BAJAJ, B.K., 2022. Bioprocess development for production of xylooligosaccharides prebiotics from sugarcane bagasse with high bioactivity potential. **Ind. Crops Prod**. 178, 114591 https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114591.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabela 1612:** Área plantada/colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. 2023. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612. Acesso em: 10 jul. 2024.

IVO, W. M. P. M.; ROSSETO, R.; SANTIAGO, A. D.; BARBOSA, G. V. S.; VASCONCELOS, J. N. **Impulsionando a produção e a produtividade da cana-de-açúcar**. *In:* Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e Políticas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

JADOSKI, C.J.; TOPPA, B.E.V.; JULIANETTI, A.; HULSBOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Pesquisa aplicada e agrotecnologia**, [S.l.], v. 3, n. 2, maio/ago. 2010.

JAVED, T. *et al*. Transcription factors in plant stress responses: Challenges and potential for sugarcane improvement. **Plants**, v. 9, n. 4, p. 491, 2020.

KODAMA, I. S.; LOURENZANI, W. L. Mudanças no uso da terra a partir da expansão do cultivo da cana-de-açúcar na região oeste do estado de São Paulo. **Desenvolvimento em Questão**, v. 19, n. 55, p. 132-153, 2021.

LANDELL, M.G *et al*. Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. Ribeirão Preto: Instituto Agronômico de Campinas. 17 p, 2012. (**Documentos IAC, 109**).

LANDELL, M. G. A. et al. Sugarcane genetic improvement: strategies and perspectives. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 5, p. 405-419, 2014.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos estudos**. CEBRAP, São Paulo, n. 78, p. 15-21, 2007.

LIMA, J. L.; SIQUEIRA, S. H.; ARAÚJO, D. V. Setor Sucroalcooleiro: Álcool. **Informe Setorial**, n. 5. BNDES, 1995.

LOARIE, S. R. *et al*. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011.

LOURENZANI, W. L.; CALDAS, M. M. Land use change from the sugar cane expansion in the western region of São Paulo state, Brazil. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 11, nov. 2014.

MALERBA, F. Sectoral Systems: How and Why Innovation Differs across Sectors. T**he Oxford Handbook of Innovation,** pg. 380-401, 2006.

MANHÃES, C. M. C. *et al*. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Revista Vértices**, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015.

MARIN, F. R. et al. Modelling sugarcane growth as a function of climate variability in Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 64, p. 159-170, 2020.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in brazil: environmental and social challenges. ***Ecological Applications*****,** v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.

MELLO, R. da C. Plantio mecanizado de cana. 2020. **Revista Cultivar**. Disponível em: https://revistacultivar.com.br/artigos/plantio-mecanizado-de-cana. Acesso em 03 de agosto de 2023.

MORAES, M.A.F.D. Indicadores do mercado de trabalho do sistema agroindustrial dacana-de-açúcar do Brasil no período 1992-2005. **Estudos Econômicos**, v. 37, n. 4, p. 875-902, 2007.

MORETTO, G. A.; CAVICHIOLI, F. A. O plantio mecanizado da cana-de-açúcar: aspectos desse processo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19, n. 2, p. 572-583, 2022.

NASS, L.L.; PEREIRA, P.A.A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop science**.v.47, n.6, p. 2228-2237, 2007.

NASSAR, A. M.; RUDORFF, B. F.; ANTONIAZZI, L. B.; AGUIAR, D. A. D.; BACCHI, M. R. P. & ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**, 63-93. – B, 2008.

NYKO, D.; VALENTE, M.; MILANEZ, A.; TANAKA, A.; RODRIGUES, A. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **Bionergia**. BNDES Setorial 37, p. 399-442, 2013.

OECD/Eurostat. **Oslo Manual**, Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. OECD Publishing, Paris. 2005.

OLIVEIRA, M. D. Cana-de-açúcar: da agricultura de subsistência à agroindústria moderna. **História Econômica & História de Empresas**, v. 18, n. 2, 2015.

PAMPLONA, C. **Proálcool: Impacto em termos tecnico-econômicos e sociais do programa no Brasil** . Piracicaba: setor de comunicação Planalsucar, 93 p. 1984.

PROENCA, E. R. **Caracterização da produção de cana-de-açúcar e de inovações tecnológicas adotadas por Usinas da Regional de Andradina (SP)**. 2008, 69p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2008.

RFA. Renewable Fuels Association. **World Fuel Ethanol Production**. Disponível em: https://ethanolrfa.org/ resources/industry/statistics/#1537559649968-e206480c-7160. Acesso em: 12 ago. 2023.

RUAS, D. G. G.; FERREIRA, E. R.; BRAY, S. C**. A agroindústria sucroalcooleira nas áreas canavieiras de São Paulo e Paraná no Brasil**. Rio Claro: UNESP/IGCE. Pós-Graduação em Geografia, 203 p., 2014.

SANTOS, L. G. et al. Precision agriculture technologies applied to sugarcane production systems: opportunities and limitations. **Biosystems Engineering**, v. 204, p. 281-297, 2021.

SATOLO, L. F.; BACCHI, M. R. P. Dinâmica econômica das flutuações na produção de cana-de-açúcar. **Economia Aplicada**, v. 13, n. 3, 2009, pp. 377-397, 2009.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A.P. R. de. The success of the Brazilian alcohol program (PROÁLCOOL)-a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 243-248, 2020.

TSUTIYA, E. K.; ZAKIR, J. A.; PIGATTO, G. **Substituição da pecuária de corte e expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo:** o impacto nas regiões oeste e noroeste do estado. *In:* Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER) - 46th Congress, July 20-23, 2008, Rio Branco, Acre, Brazil.

USDA. United States Department of Agriculture. Sugar: **World Markets and Trade**. Disponível em: https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/z029p472x?locale=en. Acesso em: 18 abr. 2023.

VISWANATHAN, R.; THANGAVELU, R. Sugarcane diseases and diagnostic advances: an overview. **Current Microbiology**, v. 77, p. 361-371, 2020.

YASAR, A., SHABBIR, S.A., TABINDA, A.B., NAZAR, M., RASHEED, R., MALIK, A., MUKHTAR, S.,. Refuse-derived fuels as a renewable energy source in comparison to coal, rice husk, and sugarcane bagasse. Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff. 41, 564–572, 2019. https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1520340.