

JOSÉ IGNACIO MAYA GUERRA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO ECONÔMICO DE
MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA A PRODUÇÃO
DE BIOETANOL**

Estudo em empresas do setor sucroenergético do Brasil e da Colômbia

Relatório de Pós-doutorado realizado
na Universidade Estadual Paulista
(UNESP), FCAV - Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias,
Departamento de Economia,
Administração e Educação,
Jaboticabal.

Supervisor(a): Prof. Dr. Adriano Dos
Reis Lucente

Jaboticabal- SP

2026

RESUMO

O presente relatório sintetiza os resultados da estância pós-doutoral realizada na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), com foco na avaliação comparativa do desempenho econômico e sustentável de sistemas de irrigação empregados na produção de cana-de-açúcar destinada ao bioetanol. O estudo insere-se no debate contemporâneo sobre a intensificação agroenergética, caracterizado por crescentes restrições hídricas, maior variabilidade climática e pressão por eficiência econômica e ambiental nos sistemas produtivos.

A pesquisa adotou abordagem aplicada, analítico-comparativa e de natureza mista, integrando evidências empíricas globais obtidas por meio de revisão sistemática da literatura (2015–2025) com dados primários e institucionais provenientes de unidades agroindustriais representativas do Brasil e da Colômbia. No contexto brasileiro, a análise concentrou-se em áreas da Usina Brasileira, nos municípios de Jaboticabal e Pereira Barreto–SP, caracterizadas por elevada escala produtiva, mecanização plena e integração com sistemas de cogeração de energia a partir da biomassa. Para a Colômbia, utilizaram-se dados consolidados do município de Palmira, no Valle del Cauca, com base nas informações técnicas e econômicas disponibilizadas pelo Cenicaña.

Foram avaliados três modelos de irrigação — gotejamento, pivô central e irrigação por salvamento — considerando indicadores econômicos (CAPEX, OPEX, VPL, TIR e relação benefício-custo), produtivos (TCH, ATR) e ambientais (eficiência do uso da água e consumo energético). Os resultados indicam que não existe um sistema de irrigação universalmente superior, sendo o desempenho fortemente condicionado pela coerência entre tecnologia adotada, escala de produção, custos energéticos, disponibilidade hídrica e arranjos institucionais. Enquanto o pivô central mostrou competitividade econômica em grandes áreas com acesso à energia de baixo custo, o gotejamento apresentou maior eficiência hídrica e relevância estratégica em contextos de maior restrição de água.

Conclui-se que a decisão sobre investimentos em irrigação deve ser tratada como escolha estratégica de alocação de capital, integrando dimensões econômicas, gerenciais e ambientais, reforçando a relevância científica e aplicada da estância pós-doutoral desenvolvida na UNESP/FCAV.

Palavras-chave: Irrigação da cana-de-açúcar, desempenho econômico, eficiência do uso da água, bioetanol, sustentabilidade agroenergética.

1 INTRODUÇÃO

A consolidação da agroindústria sucroenergética nas últimas décadas tem ampliado de forma consistente a pressão sobre os recursos hídricos, sobretudo em sistemas produtivos altamente especializados e intensivos em capital. Nesse cenário, a irrigação da cana-de-açúcar deixou de ser compreendida como uma prática agrônoma acessória e passou a ocupar uma posição estratégica na estabilidade produtiva, na competitividade econômica e na sustentabilidade operacional do setor. Essa mudança está diretamente associada ao aumento da variabilidade climática, à maior recorrência de eventos de déficit hídrico e à necessidade crescente de uso mais eficiente e integrado de água, energia e capital.

Embora a literatura recente registre avanços relevantes em eficiência hídrica e ganhos de produtividade associados à adoção de tecnologias de irrigação mais precisas, uma parcela expressiva desses estudos permanece concentrada em análises técnicas isoladas ou em experimentos conduzidos em contextos espaciais restritos. Como consequência, ainda é limitada a compreensão dos mecanismos econômicos e gerenciais que condicionam o desempenho efetivo dos diferentes sistemas de irrigação quando implementados em ambientes agroindustriais complexos, marcados por economias de escala, estruturas de custos energéticos diferenciadas e arranjos institucionais heterogêneos.

Em particular, são raros os estudos que integram, de forma sistemática, custos de investimento e de operação (CAPEX e OPEX), indicadores produtivos e métricas de eficiência no uso da água dentro de um mesmo arcabouço analítico comparativo. Essa lacuna é especialmente relevante em contextos latino-americanos, nos quais a adoção tecnológica não responde apenas à

eficiência técnica intrínseca dos sistemas, mas a combinações específicas entre escala produtiva, disponibilidade hídrica, custos energéticos e formas de governança entre produtores e agroindústrias.

É nesse espaço analítico que se insere o presente estudo, desenvolvido no âmbito de uma estância pós-doutoral na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. A pesquisa parte da premissa de que o desempenho econômico e ambiental da irrigação não decorre exclusivamente da tecnologia empregada, mas da coerência entre o sistema de irrigação adotado, a escala de produção, os custos energéticos e o contexto institucional em que a decisão de investimento é tomada. A comparação entre unidades agroindustriais representativas do estado de São Paulo, no Brasil, e referências produtivas do Valle del Cauca, na Colômbia, oferece, nesse sentido, um marco empírico particularmente adequado para explorar essa hipótese.

Ambas as regiões compartilham a relevância estratégica da cana-de-açúcar para a produção de bioetanol e para a geração de energia a partir da biomassa, mas diferem de forma substantiva quanto às condições agroclimáticas, à estrutura fundiária, ao acesso à energia e aos modelos de governança do recurso hídrico. Essas diferenças permitem examinar como tecnologias semelhantes podem apresentar desempenhos econômicos e ambientais contrastantes quando inseridas em configurações produtivas distintas. Em outras palavras, a análise não busca estabelecer hierarquias tecnológicas universais, mas identificar mecanismos de desempenho dependentes do contexto.

A questão que orienta este estudo é, portanto, em que medida os diferentes modelos de irrigação utilizados na produção de cana-de-açúcar destinada ao bioetanol apresentam desempenhos econômicos e ambientais comparáveis quando analisados em contextos agroindustriais diferenciados. A hipótese central sustenta que não existe um sistema de irrigação universalmente superior, mas soluções cuja eficiência relativa depende da interação entre tecnologia, escala produtiva, custos energéticos e disponibilidade de recursos hídricos. Com base nessa premissa, o estudo articula evidências empíricas globais, obtidas por meio de uma revisão sistemática da literatura (2015–2025),

com dados primários e fontes institucionais do Brasil e da Colômbia, deslocando o debate de uma comparação puramente tecnológica para uma análise econômica e gerencial baseada em mecanismos.

Do ponto de vista aplicado, essa abordagem é particularmente relevante para a tomada de decisão estratégica no setor sucroenergético, no qual a irrigação representa um investimento de capital de longo prazo e um instrumento central de gestão do risco climático. Ao situar a irrigação em um marco integrado de desempenho econômico, eficiência no uso da água e sustentabilidade operacional, o estudo busca oferecer subsídios concretos tanto para gestores agroindustriais quanto para o desenho de políticas públicas em cenários de crescente restrição hídrica e energética.

2 OBJETIVOS

O presente projeto de pós-doutorado foi norteado pela necessidade de compreender a eficiência dos recursos hídricos no setor sucroenergético, sob uma perspectiva de competitividade econômica e sustentabilidade ambiental. A seguir, detalham-se as metas que estruturaram a pesquisa.

2.1 Objetivo Geral:

Realizar uma avaliação comparativa do desempenho econômico e sustentável dos modelos de irrigação utilizados na produção de cana-de-açúcar voltada à indústria de bioetanol, focando-se em unidades agroindustriais representativas de Jaboticabal (São Paulo, Brasil) e Palmira (Valle del Cauca, Colômbia).

2.2 Objetivos Específicos:

Para o cumprimento do objetivo geral, estabeleceram-se as seguintes metas específicas:

- **Caracterização dos Sistemas:** caracterizar tecnicamente os sistemas de irrigação (tais como gotejamento, pivô central e irrigação de salvamento) empregados nas regiões em estudo, identificando suas particularidades operacionais e níveis de adoção tecnológica.
- **Identificação de Parâmetros e Indicadores:** Identificar e sistematizar os indicadores e direcionadores (drivers) essenciais para a avaliação:

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento da pesquisa e abordagem metodológica

O estudo foi conduzido como uma pesquisa aplicada, de caráter analítico-comparativo, com abordagem mista (quantitativa e qualitativa), voltada à avaliação do desempenho econômico e sustentável de sistemas de irrigação utilizados na produção de cana-de-açúcar para a indústria de bioetanol. O método comparativo foi adotado como estratégia central, permitindo examinar diferenças e complementaridades entre tecnologias de irrigação implementadas em contextos agroindustriais distintos no Brasil e na Colômbia.

A estratégia metodológica foi estruturada em três etapas sequenciais e interdependentes. A primeira consistiu em uma etapa exploratória e de revisão sistemática da literatura, destinada à identificação do estado da arte e à definição dos indicadores de desempenho econômico e ambiental. A segunda etapa correspondeu ao levantamento de dados primários e secundários, envolvendo informações técnicas, operacionais e financeiras obtidas em unidades agroindustriais representativas e em bases institucionais consolidadas. A terceira etapa compreendeu a análise integrada dos dados e a modelagem econômico-financeira, com foco na avaliação comparativa da viabilidade dos diferentes sistemas de irrigação.

3.2 Áreas de estudo e contexto agroecológico

A pesquisa concentrou-se em duas regiões estratégicas da agroindústria sucroenergética latino-americana, selecionadas em função de sua relevância produtiva, contrastes agroclimáticos e disponibilidade de dados técnicos confiáveis.

No Brasil, o estudo abrangeu áreas localizadas nos municípios de Jaboticabal e Pereira Barreto, no estado de São Paulo. Essas regiões caracterizam-se por solos predominantemente do tipo Latossolo Vermelho e clima CWA, segundo a classificação de Köppen, com estação seca bem definida

no inverno. Nessa região, a análise empírica concentrou-se na Usina Brasileira¹, unidade agroindustrial com elevado grau de mecanização e integração entre produção agrícola e geração energética.

Na Colômbia, o estudo utilizou informações de referência do município de Palmira, no Valle del Cauca, região caracterizada por clima AW e solos aluviais de alta fertilidade. Os dados técnicos, produtivos e econômicos foram obtidos a partir das bases consolidadas do Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), amplamente reconhecido como fonte institucional de apoio à tomada de decisão no setor sucroenergético colombiano (Cenicaña, 2024).

3.3 Unidades de análise e sistemas de irrigação avaliados

As unidades de análise corresponderam a parcelas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes regimes hídricos, permitindo a comparação entre tecnologias com distintos níveis de intensidade de capital, eficiência hídrica e complexidade operacional. Foram considerados três sistemas de irrigação:

- Irrigação por gotejamento, incluindo configurações subsuperficiais;
- Irrigação por aspersão com pivô central;
- Irrigação de salvamento ou suplementar, aplicada em períodos críticos de déficit hídrico.

Essa tipologia possibilitou avaliar diferenças técnicas, econômicas e ambientais entre sistemas amplamente utilizados nos contextos brasileiro e colombiano.

3.4 Revisão sistemática da literatura e dados secundários (2015–2025)

A revisão da literatura foi conduzida segundo os princípios do protocolo PRISMA (Page, M.J. et al., 2021), para identificar estudos relevantes sobre desempenho produtivo, viabilidade econômica e sustentabilidade de sistemas de irrigação em cana-de-açúcar. As buscas foram realizadas nas bases Scopus,

¹ O nome da usina foi anonimizado para proteger sua identidade frente o uso de documentos técnicos e acadêmicos

Web of Science e Google Scholar, utilizando descritores relacionados à irrigação, eficiência do uso da água, custos de produção e bioetanol.

Foram incluídos artigos revisados por pares publicados entre 2015 e 2025, com foco explícito em indicadores econômicos (CAPEX, OPEX, ROI) e ambientais. Os estudos selecionados subsidiaram a definição dos indicadores-chave de desempenho consolidados em um painel comparativo de indicadores, utilizado como referência para a análise empírica.

3.5 Coleta de dados primários na Usina Brasileira.

A coleta de dados primários no contexto brasileiro foi realizada por meio de um formulário estruturado de levantamento técnico-econômico, aplicado à Usina Brasileira. O instrumento permitiu a padronização das informações coletadas nas seguintes dimensões:

- Caracterização técnica dos sistemas: idade do sistema de irrigação, tipo de equipamento, variedades de cana-de-açúcar, espaçamento de plantio e tipo de solo;
- Dados operacionais: consumo energético (kWh ha^{-1}), lâmina anual de irrigação aplicada (mm ano^{-1}) e eficiência de aplicação;
- Indicadores agrônômicos: produtividade média expressa em Toneladas de Cana por Hectare (TCH) e teor de Açúcares Totais Recuperáveis (ATR).

Esses dados permitiram a avaliação integrada entre desempenho produtivo e custos operacionais dos sistemas de irrigação analisados.

3.6 Modelagem econômica e indicadores de viabilidade

A avaliação econômica foi realizada por meio de uma modelagem de custos e benefícios, estruturada a partir da separação entre custos de investimento (CAPEX) e custos operacionais (OPEX). O CAPEX incluiu gastos com infraestrutura hidráulica e eletromecânica, instalação, projetos de engenharia e estimativa da vida útil dos equipamentos. O OPEX contemplou custos variáveis, como energia, mão de obra e insumos, bem como custos de manutenção preventiva e corretiva.

A viabilidade econômica dos sistemas foi avaliada com base nos indicadores Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Relação Benefício-Custo (B/C) e custo unitário de produção por metro cúbico de água, amplamente utilizados em análises de investimentos agroindustriais (Posada Contreras et al., 2023).

3.7 Indicadores de sustentabilidade e análise dos dados.

A dimensão ambiental foi avaliada por meio da Eficiência do Uso da Água (EUA), calculada como a razão entre a produtividade agrícola obtida e o volume total de água consumido, considerando precipitação efetiva e irrigação. Adicionalmente, foram analisados os impactos associados ao consumo energético dos sistemas de bombeamento, com base em dados institucionais de sustentabilidade.

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos a análises estatísticas descritivas, visando caracterizar as amostras e identificar padrões de desempenho. Complementarmente, realizou-se uma análise de sensibilidade econômica, avaliando o impacto de variáveis críticas — como preço do bioetanol, custo da energia e taxa de desconto — sobre a viabilidade dos sistemas de irrigação.

4 RESULTADOS

A análise dos resultados foi estruturada com base na integração entre as evidências empíricas globais, obtidas por meio de uma revisão sistemática da literatura científica indexada, e as evidências primárias coletadas na Unidade Pereira Barreto da Usina Brasileira. Essa abordagem possibilitou contrastar tendências internacionais na irrigação da cana-de-açúcar com dados operacionais reais, fortalecendo a validade externa e interna do estudo. A revisão sistemática consolidou um conjunto de 97 estudos científicos de alto impacto publicados entre 2014 e 2025, evidenciando um crescimento sustentado do interesse em água, energia e eficiência econômica em sistemas de energia sucroenergéticos, especialmente em contextos de estresse hídrico e volatilidade climática.

A combinação de ambos os níveis de análise possibilitou superar uma das principais limitações identificadas no recente estado da arte, caracterizada por uma alta dependência de dados secundários e estudos de local único. Nesse sentido, os resultados apresentados constituem uma contribuição empírica relevante para o debate contemporâneo sobre a eficiência hídrica, energética e econômica da irrigação no setor sucroenergético.

4.1 Dinâmica Global da Pesquisa em Irrigação da Cana-de-Açúcar (2014–2025)

A revisão sistemática consolidou uma amostra de 97 registros científicos de alto impacto, publicados entre 2014 e 2025, que foram sistematizados e aos quais foi aplicada uma análise bibliométrica². A análise temporal deste banco de dados mostra uma evolução significativa no interesse científico na eficiência do uso da água e na viabilidade econômica dos sistemas de irrigação, especialmente a partir de 2018, coincidindo com o aumento dos eventos climáticos extremos e a pressão regulatória sobre o uso dos recursos hídricos. Esse crescimento não foi homogêneo, mas responde a contextos produtivos

² Isso permitirá obter uma publicação de revisão sistemática, que ainda não está disponível no momento da redação deste documento

específicos, nos quais a irrigação é configurada como um fator estratégico para segurança alimentar, estabilidade energética e sustentabilidade ambiental.

A revisão também mostra uma concentração geográfica ou polos claramente diferenciados da produção científica, tanto em volume quanto em orientação tecnológica. de conhecimento em países com alta dependência da irrigação para energia e segurança alimentar. A Índia lidera a produção científica, seguida pelo Brasil e pela Austrália, com uma transição clara dos sistemas gravitacionais para tecnologias de irrigação localizada (gotejamento superficial e subsolo). A Índia concentra o maior número de registros (19), com ênfase predominante em sistemas de irrigação por gravidade e gotejamento, voltados para aumentar a produtividade e a segurança alimentar. O Brasil, embora com menor volume absoluto de publicações (4 registros), destaca-se por seu foco em irrigação de precisão e eficiência energética, estreitamente ligadas à produção de bioetanol. A Austrália possui um perfil altamente técnico, com predominância de gotejamento subsuperficial e forte ênfase na automação e no manejo de nutrientes. O Zimbábue, por outro lado, combina sistemas de sprinklers e gravidade, com foco no manejo dos impactos do solo. Essa tendência é consistente com a literatura recente, que relata economia de água entre 25% e 40%, aumentos significativos na produtividade hídrica (WUE) e melhorias na lucratividade quando sistemas de gotejamento acoplados à fertirrigação otimizada são adotados (Singh et al., 2024; Anjaly et al., 2024; Wakchaure et al., 2025).

A análise de tendência na Tabela 1 mostra que a irrigação por gotejamento é o método mais documentado na literatura recente (19 registros), seguida pela irrigação por gravidade com 14. É notável que a irrigação convencional tem apenas um registro específico no período analisado, sugerindo uma migração para sistemas de alta eficiência ou irrigação localizada. Essa descoberta não deve ser interpretada como obsolescência técnica, mas como uma sub-representação científica em relação a sistemas de alta eficiência localizada (mais atraentes do ponto de vista acadêmico) em comparação com seu uso real em sistemas de grande escala.

Tabela 1: Análise de Tendências

País	Registros	Método Predominante	Foco Principal
Índia	19	Gravidade/Gotejamento	Produtividade e Segurança Alimentar
Brasil	4	Gotejamento / Precisão	Eficiência energética e bioetanol
Austrália	2	Gotejamento subsuperficial	Automação e Manejo de Nutrientes.
Zimbábue	2	Aspersão / Gravidade	Gestão do Impacto do Solo

Fonte: Elaboração do autor baseada em revisão sistemática.

Do ponto de vista metodológico, 24,7% dos estudos analisados utilizam modelos de simulação biofísica e bioeconomia, refletindo a crescente necessidade de avaliar cenários futuros diante das mudanças climáticas e da volatilidade dos mercados de energia. Os ensaios de campo representam 21,6% dos registros, fornecendo a base empírica necessária para a validação desses modelos.

Essa distribuição metodológica confirma uma transição de estudos descritivos para abordagens de modelagem integrada, embora persista uma lacuna significativa na validação multissítio e na incorporação de variáveis econômicas dinâmicas.

4.2 Perfil global de indicadores de desempenho

A análise cruzada dos indicadores possibilitou identificar as prioridades estratégicas do setor da cana-de-açúcar em nível global e revela que a viabilidade da irrigação da cana-de-açúcar está intrinsecamente ligada ao aumento do rendimento agrícola (TCH), presente em mais de 75% dos estudos analisados. A eficiência no uso da água surge como um indicador estratégico, que mostra que os estudos de viabilidade da irrigação estão intimamente ligados ao aumento do rendimento por unidade de área. Também foi possível estabelecer a presença de estudos recentes que integram a conexão água-energia-carbono (Wakchaure et al., 2025; Menezes et al., 2024).

Eficiência do uso da água, expressa como produtividade hídrica, aparece em 18 registros, com ênfase crescente em países como Austrália e Brasil, onde as restrições de água e regulatórias são mais severas. Indicadores de qualidade industrial (ATR e açúcar recuperável), embora menos frequentes, apresentam

uma relação positiva com sistemas de irrigação de alta precisão, especialmente gotejamento subsuperficial, que reforça o impacto da irrigação também na qualidade do produto final, além do volume de biomassa.

Tabela 2: Principais tipos de indicadores de desempenho identificados na literatura

Tipos de Indicadores	Registros
• Indicadores Econômicos e de Produtividade	75
• Eficiência Hídrica (Produtividade da Água)	18
• Qualidade Industrial (Açúcares Totais) (ATR)	9

Fonte: Elaboração do autor baseada em revisão sistemática.

4.3 Análise operacional: Unidade Pereira Barreto — Usina Brasileira

Os dados primários obtidos por meio do formulário e dos relatórios financeiros de 2025 nos permitem caracterizar a Usina Brasileira como um sistema agroindustrial altamente integrado, em que a irrigação cumpre uma função estratégica de estabilização produtiva e com uma estratégia explícita de economia circular. A operação suporta aproximadamente 3.400 empregos diretos, impactando significativamente a mesorregião de Ribeirão Preto e Pereira Barreto. A cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar possibilita alcançar altos níveis de autossuficiência energética, reduzindo estruturalmente o OPEX associado a sistemas de irrigação eletromecânicos, especialmente pivôs centrais. Do ponto de vista financeiro, a gestão robusta dos ativos biológicos, avaliados segundo critérios de mercado, facilita o acesso a créditos para investimentos em CAPEX de irrigação, mitigando uma das principais barreiras identificadas na literatura internacional.

O uso predominante do pivô central para irrigação por salvamento responde a critérios de escala e diluição dos custos fixos, em vez de buscar máxima eficiência técnica. Essa descoberta é consistente com estudos que mostram que, em grandes áreas, a aspersão pode ser economicamente competitiva quando há acesso à energia de baixo custo ou gerada em conjunto (Wonprasaid et al., 2023; Wang et al., 2024).

É importante mencionar que, nas relações produtivas dos produtores de cana-de-açúcar, tanto no Brasil quanto na Colômbia, os moinhos lidam com diferentes tipos de contratos com fornecedores, nos quais condições, valor e forma de pagamento são definidos, e que o produtor de cana-de-açúcar é quem decide a variedade de cana-de-açúcar a ser plantada e o sistema de irrigação a operar (de acordo com as condições disponíveis) (Arbeláez & Morales, 2020). Operacionalmente, isso sugere que uma avaliação economicamente sustentável da irrigação deve incorporar não apenas custos e produtividade biofísica, mas também como o arranjo de governança condiciona a adoção de práticas (por exemplo, regras de irrigação, auditorias, padrões) e, assim, o desempenho observado.

Por outro lado, no Vale do Cauca, as fábricas são o principal ator em uma cadeia regional de bioenergia em que a cana-de-açúcar não apenas alimenta a produção de açúcar/etanol, mas também o fornecimento de biomassa (bagaço) para produção de eletricidade ou papel, colocando as fábricas como principais fornecedoras dessa biomassa. O bagaço equivale a aproximadamente 30% da cana-de-açúcar moída; desse bagaço, 85% são destinados à cogeração nas fábricas e 15% à celulose e papel.

Os produtores da região (e do país) possuem um serviço fornecido pela Cenicaña (controle administrativo de irrigação [CAR]) para medir a qualidade da gestão da irrigação, o que lhes permite gerenciar e otimizar indicadores como o volume de água utilizada, eficiência da aplicação, desempenho da operação de irrigação e eficiência administrativa da mão de obra, entre outros, para o propósito de reduzir o consumo de água e diminuir os custos de mão de obra, além de telemetria para irrigação que permite monitorar a qualidade da irrigação mecanizada em tempo real.

4.4 Análise microagronômica de parcelas irrigadas.

A análise detalhada dos dados proporcionados por Usina Brasileira, com parcelas de cana (Tabela 3), permitiu examinar o comportamento de parcelas específicas sob irrigação do salvamento por sprinkler (pivô central), destacando o lote 31301. Nesta última, é evidente que variedades como CTC 9004 e CTC 4, sob irrigação do salvamento por pivô central, mantêm altas produtividades no

quarto e quinto cortes, com idade de 11 meses, evidenciando a capacidade da irrigação do salvamento de manter a longevidade do campo de cana-de-açúcar, o que contrasta com a literatura sobre sistemas de sequeiro, em que a queda na produtividade normalmente ocorre após o terceiro corte. A variedade IACSP95 5094, presente em seu quinto corte, reforça essa constatação, mostrando que a irrigação atua como um mecanismo para preservar o capital biológico, prevenindo a queda drástica na produtividade (tipicamente observada em sistemas de sequeiro após o terceiro corte), estendendo a longevidade do campo de cana-de-açúcar e reduzindo a frequência de renovação, conforme relatado por estudos de longo prazo na Ásia e Austrália (Wonprasaid et al., 2023; Anjaly et al., 2024).

Tabela 3 Caracterização de Parcelas Analisadas (Lote 31301I)

Variedade	Área (ha)	Ciclo/Corte	Idade (meses)	Temporada de Plantio
CTC 9004	106,02	4 (Soca)	11	Júlio
CTC 9001	15,94	4 (Soca)	11	Júlio
CTC 4	53,05	4 (Soca)	11	Júlio
IACSP95 5094	6,54	5 (Soca)	11	Júlio

Fonte: Usina Brasileira.

Com base nos dados obtidos em Cenicaña, na Colômbia, existem 9 camadas de produtividade baseadas na tonelagem de cana-de-açúcar por hectare (TCH) e no rendimento (RTO), nas quais as camadas alta-alta e baixa-baixa correspondem, respectivamente, a 8% e 10% da área estudada. Nos estratos de alta tonelagem, a variedade CC 01–1940 tem a maior participação na área de colheita (entre 21% e 27%). Também se observa que as maiores parcelas de épocas de colheita elevadas são encontradas nas camadas de alta tonelagem (Posada, C. et al., 2023).

Tabela. Caracterização de estratos de produtividade do Valle del Cauca

Estrato	TCH	RTO %	Estrato	TCH	RTO. %	Estrato	TCH.	RTO. %
AA	Alto 140	Alto 12,4	MA	Médio 115	Alto 12,5	BA	Baixo 87	Alto 12,6
AM	Alto 144	Médio 11,3	MM	Médio 116	Médio 11,3	BM	Baixo 88	Médio 11,4
AB	Alto 149	Baixo 10,0	MB	Médio 116	Baixo 10,1	BB	Baixo 84	Baixo 10,0

Fonte: elaboração própria baseada em dados de tranças de Cenicaña. (2023)

Entre os principais condicionantes da produtividade da cana-de-açúcar considerados nesta análise, destacam-se a variedade cultivada, a idade da cultura no momento da colheita, o número de cortes acumulados e a sazonalidade da colheita. De modo geral, a utilidade por hectare apresenta desempenho superior nos extratos caracterizados por maiores níveis de rendimento alto (AA, MA e BA).

Na zona seco-semiseco, as variedades CC 01–1940, CC 01-678, CC 01-746, CC 05-430, CC 98-72 e CC 93-4418 são significativamente altas em TAH, enquanto as variedades CC 00-3771, CC 01-1940, CC 01-678, CC 01-746, CC 05-430, CC 11-600, CC 93-4418, CC 93-7711 e CC 98-72 são superiores em desempenho econômico (21% e 191%), embora esse rendimento possa variar conforme a área, dadas as diferenças varietais, climatológicas, hídricas e do solo.

4.5 Inovações tecnológicas emergentes

O estudo identificou 35 inovações tecnológicas relevantes, que podem ser agrupadas em três grandes categorias. A Tabela 4 resume a distribuição global das tecnologias emergentes de irrigação identificadas na literatura recente, organizada por país de origem e por tipo de inovação.

- **Energias renováveis:** especialmente a energia solar aplicada à bombagem em sistemas de gotejamento, com forte presença na Índia e Austrália e com impactos positivos no OPEX.
- **Sistemas inteligentes (IoT e DSS):** baseados em sensores de umidade, plataformas IoT e sistemas de suporte à decisão, liderados pelo Brasil e Austrália, que permitem a transição para a irrigação baseada na demanda real de água.
- **Tecnologias emergentes não convencionais:** uso de água magnetizada, relatado em estudos recentes em 2025, como promotor da eficiência hídrica, absorção de nutrientes e tolerância a estresse/seca, embora ainda com validação multissítio limitada (Youssef, 2025).

Tabela 4: Identificação de tecnologias emergentes por país de origem

Etiquetas de fila	Energias renováveis (solar) para bombeamento em sistemas de gotejamento	Fertigação otimizada combinada com irrigação por gotejamento	Irrigação de precisão com controle automático	Sistemas inteligentes de irrigação/IoT com sensores de umidade	Outros	Geral total
India		9	2	5	9	25
Australia	3			6	5	14
Brazil	1	1	1	1	7	11
Mexico		2			2	4
Colombia					3	3
Indonesia			1	1		2
Iran					2	2
South Africa				1	1	2
Bangladesh					1	1
China			1			1
Egypt			1			1
Nepal					1	1
Pakistan					1	1
Somalia	1					1
Sri Lanka	1					1
Tanzania					1	1
Thailand					1	1
Zimbabwe					1	1
Geral total	6	12	6	14	35	73

4.6 Análise comparativa econômica: CAPEX y OPEX.

A integração das evidências globais (evidências empíricas globais) e dos dados operacionais da Usina (evidências factuais locais) permite o estabelecimento de uma estrutura de custos comparativa. A irrigação por gotejamento subterrâneo possui a maior barreira de entrada em termos de CAPEX inicial, principalmente associada a sistemas de filtragem e tubos enterrados. No entanto, oferece o maior potencial para economia de água, energia e fertilizantes por meio da fertilização otimizada.

Em contraste, o OPEX parece ser dominado pelos custos de energia. No caso da Usina Brasileira, a cogeração a partir da biomassa reduz significativamente o peso do OPEX energético e atua como um subsídio interno

natural, melhorando o Valor Presente Líquido dos projetos de irrigação em comparação com produtores dependentes da rede elétrica convencional.

Esse resultado é consistente com a literatura que indica que a disponibilidade interna de energia pode alterar substancialmente a hierarquia econômica entre as tecnologias de irrigação (Wakchaure et al., 2025; Wang et al., 2024).

4.7 Limitações e lacunas identificadas

Apesar da robustez dos resultados, a análise de limitações revela lacunas críticas no estado do conhecimento. Um total de 61 registros é baseado exclusivamente em dados secundários, o que destaca a relevância dos dados primários fornecidos por este estudo. Da mesma forma, 33 registros correspondem a estudos em um único local, validando a relevância da abordagem comparativa transnacional Brasil-Colômbia. Por fim, foi identificada uma lacuna na validação de modelos que integram a flutuação do preço dos Certificados de Descarbonização (CBIOS) com a eficiência da irrigação.

Uma leitura histórico-ambiental geral aponta que a alta especialização espacial em monoculturas como a cana-de-açúcar, tanto no interior do estado de São Paulo quanto neste e norte do Vale do Cauca, consolida uma exploração intensiva com técnicas modernas, incluindo variedades produtivas, fertilizantes, irrigação, pesticidas e mão de obra qualificada, atribuindo impactos como a degradação do solo à monocultura, alteração do ciclo hidrológico e perda de biodiversidade, entre outros. Esse arcabouço é operacionalmente relevante porque situa a irrigação dentro de um pacote tecnológico intensivo e de uma transformação territorial que amplifica as pressões sobre a água e os ecossistemas. (Pérez-Cruz & Rappo-Miguez, 2016)

No desenvolvimento da análise comparativa, foram identificadas restrições operacionais ligadas à governança da informação e à sincronização entre os horários da estadia e os ciclos administrativos de fontes externas. Embora a Usina Brasileira estivesse institucionalmente aberta à disponibilização de dados, as informações recebidas apresentavam níveis de agregação que dificultavam a desagregação dos detalhes necessários para a parametrização exaustiva do modelo econômico e financeiro originalmente proposto.

Essa restrição na granularidade dos dados, somada ao recebimento das informações em um estágio avançado do cronograma de pesquisa, coincidiu com períodos sazonais de recesso administrativo (festividades de dezembro e períodos de Carnaval). Esses fatores externos limitaram a janela de oportunidade para realizar sessões de ajuste e validação técnica com os gerentes de área da unidade de produção, tornando impossível consolidar um conjunto completamente homólogo de dados financeiros entre as regiões estudadas.

Diante dessa assimetria na disponibilidade de dados econômicos granulares na última fase, a pesquisa optou por priorizar o uso de indicadores de produtividade agrícola baseados em economia com alto nível de certeza, como Toneladas de Cana por Hectare (TCH) e Açúcar Total Recuperável por Hectare (ATR/ha), Indicadores físicos altamente robustos como proxies de desempenho. Esses indicadores são considerados proxies robustos da eficiência operacional e da capacidade de geração de valor energético de biomassa. Portanto, embora a comparabilidade dos retornos financeiros diretos (margens líquidas ou taxas específicas de retorno) fosse limitada pelo momento da fonte, os indicadores físicos e de produtividade do açúcar permitem uma discussão técnica sólida e suficiente sobre o desempenho dos sistemas de irrigação em estudo.

5 DISCUSSÃO

A pergunta que orientou este estudo foi se os diferentes modelos de irrigação empregados na produção de cana-de-açúcar para bioetanol apresentam desempenhos econômicos e ambientais comparáveis quando analisados em contextos agroindustriais distintos, especificamente Jaboticabal (SP, Brasil) e Palmira (Valle del Cauca, Colômbia). Os resultados permitem sustentar que o desempenho da irrigação é fortemente dependente do contexto produtivo, e não apenas da eficiência técnica intrínseca do sistema adotado.

Dito de outro modo, a análise sugere que não existe um sistema de irrigação universalmente superior, mas sim combinações mais ou menos eficientes entre tecnologia, escala produtiva, custos energéticos e disponibilidade hídrica. Essa constatação constitui a principal contribuição do estudo, ao deslocar o debate de uma comparação puramente tecnológica (gotejamento versus pivô central) para uma avaliação econômica e gerencial baseada em mecanismos.

5.1 Eficiência hídrica, produtividade agrícola e custos: evidências convergentes e tensões

Os resultados confirmam a relação positiva entre tecnificação da irrigação e aumento da produtividade agrícola (TCH) e ATH, convergindo com estudos experimentais e observacionais conduzidos no Brasil e em outros polos produtores globais. Pesquisas recentes indicam que o gotejamento, especialmente o subsuperficial, apresenta maior eficiência no uso da água e ganhos consistentes de produtividade quando comparado a sistemas menos controlados (Costa, C. et al., 2016)

Entretanto, os dados analisados em Pereira Barreto revelam que o pivô central permanece como alternativa dominante em grandes áreas contínuas, mesmo apresentando menor eficiência hídrica teórica. A interpretação econômica desse achado aponta que, em ambientes de alta escala e mecanização plena, o CAPEX por hectare mais baixo, a robustez operacional e a diluição de custos fixos tornam o pivô central competitivo em termos de custo unitário por tonelada produzida, sobretudo quando associado à irrigação salvamento e não integral.

Essa evidência reforça a ideia de que a eficiência econômica marginal da água é, em muitos casos, mais relevante para a tomada de decisão do que a eficiência física absoluta, resultado amplamente discutido na literatura recente sobre economia da irrigação.

5.2 Contraste com o Valle del Cauca: zonas seca e semiseca.

O contraste com o Valle del Cauca, particularmente em ambientes secos e semisecos, evidencia uma lógica produtiva distinta. Nessas zonas, a irrigação desempenha papel estrutural na estabilidade produtiva, dado o regime pluviométrico irregular e a elevada variabilidade intra-anual. A adoção de sistemas de maior precisão hídrica está diretamente associada à redução de riscos produtivos e à melhoria da rentabilidade esperada (Cenicaña, 2024).

Análises econômicas e estatísticas conduzidas por Cenicaña (2024) indicam que, em ambientes seco-semisecos, ganhos de produtividade associados à irrigação tecnificada têm impacto direto na utilidade por hectare, sobretudo quando combinados com variedades adaptadas e manejo criterioso do momento de irrigação. Resultados semelhantes são reportados em avaliações ex post de sistemas de gotejamento, nas quais o incremento de TCH e a redução de custos operacionais compensam o maior investimento inicial, resultando em VPN e TIR positivos sob diferentes cenários de preço.

Diferentemente do contexto paulista, no Valle del Cauca a fragmentação fundiária e os custos energéticos reduzem a atratividade de sistemas pressurizados de grande escala, favorecendo soluções que maximizam a produtividade por unidade de água aplicada, ainda que com maior CAPEX relativo.

Do ponto de vista ambiental, a discussão sobre sustentabilidade ultrapassa o simples volume de água aplicado e deve considerar a produtividade da água e a pegada hídrica por tonelada produzida. Estudos realizados no Valle del Cauca mostram que a pegada hídrica azul da cana-de-açúcar pode ser significativamente reduzida por meio de manejo hídrico mais preciso, sem comprometer o rendimento agrícola, o que reforça a relevância de sistemas tecnificados em ambientes com maior restrição hídrica. (Costa, C. et al., 2016)

No caso brasileiro, a maior disponibilidade hídrica relativa e a integração com sistemas de cogeração energética mitigam parte dos impactos ambientais associados à irrigação, sobretudo quando esta é utilizada de forma suplementar. Assim, a sustentabilidade observada decorre menos da redução absoluta do uso de água e mais do aumento da produção por área, reduzindo a pressão por expansão agrícola.

5.3 Marcos comparativos: Brasil e Colômbia.

Esta seção estabelece um contraste analítico entre o modelo de gestão do irrigação adotado pela Usina Brasileira, no estado de São Paulo, e os arranjos produtivos documentados para a zona seca-semiseca do Valle del Cauca. A comparação evidencia que as escolhas tecnológicas e gerenciais associadas à irrigação refletem respostas racionais a condicionantes estruturais distintos, especialmente no que se refere à escala produtiva, à disponibilidade hídrica, aos custos energéticos e à estrutura de tenência da terra.

No contexto paulista, o modelo da Usina Brasileira caracteriza-se pelo predomínio da mecanização total e pelo uso de irrigação por salvamento, direcionado à mitigação de períodos de estresse hídrico e à redução da variabilidade produtiva ao longo das safras. A irrigação é concebida como instrumento de estabilização da safra e de preservação do “ativo biológico”, mais do que como insumo intensivo permanente. Essa lógica é reforçada pela integração com sistemas de cogeração de energia a partir da biomassa, que reduz a dependência de fontes externas e permite otimizar simultaneamente a produção agrícola e energética.

Em contraste, o modelo predominante no Valle del Cauca, particularmente nas zonas seca e semiseca, responde a um ambiente de maior variabilidade topográfica, fragmentação fundiária e restrições hídricas mais acentuadas, o que impulsionou a adoção de sistemas de irrigação por gravidade tecnificado e de gotejamento, inclusive subsuperficial (Cenicaña, 2024). Enquanto o Brasil busca diluir custos em grandes extensões por meio de sistemas como o pivô central, a estratégia colombiana privilegia a maximização da produtividade por unidade de água aplicada. Esse contraste revela oportunidades de aprendizado cruzado: sistemas brasileiros podem se beneficiar de abordagens mais precisas de

balanço hídrico por sítio específico, ao passo que o modelo colombiano poderia incorporar, de forma seletiva, elementos de integração energética para reduzir o custo operacional da irrigação por bombeamento.

5.4 Implicações econômicas e gerenciais

A principal implicação gerencial do estudo é que a decisão de investir em irrigação deve ser tratada como decisão estratégica de alocação de capital, e não apenas como escolha agrônômica. Em Pereira Barreto, a irrigação funciona como instrumento de estabilização produtiva e proteção do ativo biológico, prolongando a vida útil do canavial e diluindo o CAPEX de implantação ao longo de mais cortes.

No Valle del Cauca, especialmente nas zonas seca e semiseca, a irrigação assume caráter mais estrutural, sendo decisiva para a viabilidade econômica do sistema produtivo. Esse contexto sugere que a ausência de irrigação adequada está associada a maior volatilidade produtiva e maior risco econômico, o que reforça o papel da irrigação como mecanismo de mitigação de risco climático.

5.5 Implicações gerais e agenda futura

Em termos gerais, a resposta à pergunta de pesquisa sugere que o desempenho econômico e sustentável dos sistemas de irrigação em cana-de-açúcar depende fundamentalmente da coerência entre tecnologia, escala, custos e ambiente agroecológico. Políticas públicas e decisões empresariais que ignorem essas interações tendem a produzir resultados ineficientes.

Como agenda futura, destaca-se a necessidade de estudos multissítio comparáveis, com dados primários harmonizados entre Brasil e Colômbia, que permitam aprofundar a análise de ROI, risco e sensibilidade econômica sob diferentes cenários climáticos e energéticos.

Para mitigar os riscos operacionais associados à indisponibilidade e ao atraso no fornecimento de dados primários em estâncias de pesquisa de curta duração (até doze meses), recomenda-se a implementação rigorosa de um "Protocolo de Preparação Antecipada" (Fase Zero). Esta abordagem preventiva

deve priorizar a governança da informação mediante a assinatura prévia de Acordos de Confidencialidade (NDA) e a designação formal de um ponto focal corporativo antes do início das atividades presenciais. Adicionalmente, é indispensável o emprego de matrizes de dados simulados (mock data) para alinhar as expectativas metodológicas com a fonte provedora, bem como a sincronização do cronograma de pesquisa com os calendários administrativos locais, antecipando períodos de recesso ou fechamentos fiscais que possam interromper o fluxo de informações.

No âmbito metodológico, o alinhamento de expectativas deve ser acompanhado por um desenho de pesquisa estruturalmente resiliente. Aconselha-se estabelecer previamente indicadores proxy robustos — como métricas de produtividade física, termodinâmica ou biológica (por exemplo, TCH e ATR) — que possuam maior disponibilidade e garantam a continuidade analítica caso os dados puramente financeiros (CAPEX e OPEX) sofram restrições de granularidade. Complementarmente, a integração de modelos baseados em análises de sensibilidade permite contornar eventuais níveis elevados de agregação dos dados corporativos, assegurando que o estudo mantenha seu rigor científico, pertinência acadêmica e exequibilidade dentro do horizonte temporal restrito da estância.

6 OUTRAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE A ESTÂNCIA PÓS-DOCTORAL.

Esta seção descreve o conjunto de atividades acadêmicas, técnicas, institucionais e de extensão desenvolvidas durante a estância pós-doutoral na UNESP (2025–2026), as quais deram suporte direto e indireto ao projeto de pesquisa voltado à avaliação comparativa do desempenho econômico e sustentável de sistemas de irrigação em cana-de-açúcar para bioetanol, além de fortalecer os vínculos acadêmicos e institucionais entre Brasil e Colômbia.

6.1 Atividades acadêmicas e de divulgação científica

6.1.1 Palestras, conferências e participação em eventos científicos.

Durante a estância, os resultados parciais e os avanços metodológicos da pesquisa foram socializados em eventos acadêmicos nacionais e internacionais, contribuindo para a validação científica do estudo e para o diálogo interdisciplinar com especialistas em agronegócio, engenharia de produção e sistemas de informação.

No 8.º **CISI International Sustainability and Innovation Conference - Sustainable Transitions and Disruptive Innovation (CISI 2025)** / Scientific Conference and Technical Session. UFF, com a palestra ***“Advances in Sustainable Irrigation Methods for Sugarcane: Innovations and Opportunities in the State of São Paulo***. Niterói, RJ, Brasil: novembro 18-19, 2025.

Apresentação de palestra intitulada **“Comparación del desempeño económico de métodos de irrigação en caña de azúcar para bioetanol: revisión sistemática 2015-2025”**, no **14º Encontro Internacional de Cultura Científica, Inovação e Empreendedorismo – EICCIE– “Semeando o Futuro da Ciência e Inovação no Agronegócio” Brasil 2025**, realizado entre os dias 14 e 21 de setembro de 2025, em Jaboticabal e Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil. (14 a 21) de setembro, Jaboticabal e Ribeirão Preto, São Paulo.

No âmbito da internacionalização, destacou-se a participação como conferencista magistral no Encontro Internacional de Semilleros de Investigación

– PREXIA 2025, com a apresentação “**Avaliação Comparativa do Desempenho Econômico de Métodos de Irrigação da Cana-de-Açúcar: Estudo em Empresas do Setor Sucroenergético do Brasil e da Colômbia**”, reforçando a articulação entre pesquisa, formação de jovens pesquisadores e cooperação interinstitucional. 14 de novembro de 2025.

Socialização e discussão dos avanços e progressos do projeto antes dos diretores da **Associação Comercial, Industrial e Agronegócios de Jaboticabal/SP (2025)**.

6.1.2 Organização, coorganização e avaliação de eventos científicos.

O pesquisador atuou como membro do Comitê Científico e Organizador do V Encontro Internacional de Semilleros de Investigación – PREXIA, em coorganização com a UNESP e o INCPS, contribuindo para a avaliação científica de trabalhos e para a integração temática entre sustentabilidade, tecnologia e agronegócio (Q3 2024 – Q1 2025).

Também participou do **14º Encontro de Cultura Científica, Inovação e Empreendedorismo EICCIE – FCAV/UNESP- INCSP Brasil 2025 – “Semeando o Futuro da Ciência e Inovação no Agronegócio” (14 a 21 de setembro), em Jaboticabal e Ribeirão Preto, São Paulo**, exercendo funções de:

- membro do Comitê Científico e Organizador,
- avaliador de trabalhos acadêmicos,
- responsável pela plataforma de gestão dos Relatórios de Pesquisa do evento (recepção de trabalhos, designação de pareceristas e consolidação de pareceres).

6.2 Relacionamento institucional

O desenvolvimento do trabalho de campo exigiu interação direta com o setor produtivo, em especial com a Usina Brasileira (Unidade Pereira Barreto). Nesse contexto, foram realizadas três reuniões técnicas presenciais para coordenar a aplicação do Formulário de Coleta de Informações, essencial para o levantamento de dados operacionais, energéticos e financeiros do projeto (Q4 2024).

Adicionalmente, foram negociados e formalizados protocolos de confidencialidade, garantindo o uso ético e seguro de informações sensíveis relacionadas a custos operacionais e dados financeiros da safra 2025.

O trabalho também significava a relação com professores pesquisadores para apoiar a compreensão do contexto:

- THIAGO HENRIQUE CARASKI. Mestre, professor e supervisor de Planejamento, Custo e Orçamentos.
- ALEXANDRE BARCELLOS DALRI, professor assistente doutor do Departamento de Engenharia. UNESP/FCAV
- ALEX RENGIFO ROJAS. Professor Doutor, na Universidad de la Selva, Peru.
- TÉUCLE MANNARELLI FILHO, doutor em Ciências pela Universidade Estadual Paulista.

É importante mencionar que ambas as estadias foram, em grande parte, possíveis pela colaboração e a gestão, apoio e relacionamento oferecidos pelas seguintes pessoas e entidades e que ele se fortaleceu durante o estágio:

- Professor ADRIANO DOS REIS LUCENTE - UNESP/FCAV, – SP, Brasil.
- Professor JULIO CESAR MAYA G. – Instituto Nau Ciranda Simparedes – SP, Brasil.
- Professora KATIA ALEXANDRE M. Instituto Nau Ciranda Simparedes – SP, Brasil.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Colômbia.

6.3 Participação em reuniões acadêmicas e comitês institucionais

Durante a estância, ocorreram reuniões de supervisão quinzenais e mensais com o Prof. Dr. Adriano dos Reis Lucente, voltadas ao ajuste do modelo, à validação dos indicadores econômicos e à discussão associadas à irrigação (por exemplo, A relevância do uso da água na pressão social e rivalidade pelo uso da água, a importância dos recursos energéticos em sistemas de irrigação).

O pesquisador também atuou como avaliador externo em trabalhos de conclusão de curso de estudantes de graduação da FCAV-UNESP, contribuindo com uma perspectiva internacional em engenharia de produção e gestão econômica.

No campo da internacionalização, participou de mesas de trabalho com os professores Adriano dos Reis Lucente e Sergio Fernandez Figueira, do Departamento de Economia, Administração e Educação da UNESP/FCAV, explorando a viabilidade de convênios de dupla titulação e programas regulares de mobilidade estudantil entre o campus de Jaboticabal e a Facultad de Ciencias Agropecuarias da UNAL, campus de Medellín (presencial em Medellín), Bogotá (presencial em Jaboticabal) e Palmira (em linha).

6.4 Visitas técnicas e atividades de campo

As atividades de campo incluíram visitas técnicas a Usina Brasileira em Jaboticabal, onde foi possível observar in loco o funcionamento da usina para a produção de açúcar e etanol, sistema de pivô central e a resposta fenológica das variedades (16/09/2025)

Também foi realizada uma visita técnica às instalações de cogeração por biomassa da Usina Brasileira, com o objetivo de compreender o fluxo energético que abastece os sistemas de irrigação, aspecto central para a análise econômica, energética e para a discussão dos CBIOs no âmbito do programa Renovabio. (16/09/2025)

- Visita técnica COPLANA - Unidade de Grãos, Jaboticabal (16/09/2025)
- Visita técnica DABI Business Park, Ribeirão Preto (17/09/2025),
- Visita técnica ao Parque SUPERA (17/09/2025),

Cerre

O conjunto dessas atividades evidencia que a estância pós-doutoral excedeu a execução estrita da pesquisa, consolidando-se como um processo integrado de produção científica, formação acadêmica, relacionamento institucional e extensão, diretamente alinhado ao objetivo de avaliar, sob uma perspectiva econômica e sustentável, os sistemas de irrigação na agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e na Colômbia.

Para mitigar o atraso no fornecimento de dados em estâncias de pesquisa de curta duração, é fundamental implementar um "Protocolo de Preparação Antecipada". Esse procedimento deve assegurar a designação de um ponto focal corporativo direto, alinhar as expectativas metodológicas por meio do uso de planilhas de dados simulados (mock data) e sincronizar o cronograma com os calendários administrativos locais para antecipar eventuais recessos institucionais. De forma concomitante, faz-se necessário um desenho de pesquisa estruturalmente resiliente, que empregue indicadores proxy robustos de produtividade (como TCH e ATR) e análises de sensibilidade; tal conduta assegura a exequibilidade e o rigor analítico do estudo diante de possíveis limitações na desagregação das informações puramente financeiras.

REFERÊNCIAS

- ANJALY, V.; SINGH, K.; GOYAL, P. Comparative analysis of irrigation techniques on the productivity of spring sugarcane-based intercropping systems in Indo-Gangetic Plains of India. *Sugar Tech*, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-025-01619-w>.
- ARBELÁEZ, M.; MORALES, J. Relación entre gobernanza y políticas de sostenibilidad en el sector bioenergético del Valle del Cauca. *Semestre Económico*, Medellín, v. 23, n. 55, p. 67–86, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.22395/seec.v23n55a3>.
- CENICAÑA. Agroindustria de la caña de azúcar en Colombia: criterios técnicos, económicos y estadísticos para la toma de decisiones. Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2024.
- COSTA, C. T. S.; SAAD, J. C. C.; SILVA, H. M. Growth and productivity of sugarcane varieties under different irrigation levels. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 834–846, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n409rc>.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, London, v. 372, n. 71, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 19 abr. 2026. PÉREZ-CRUZ, J.; RAPPO-MIGUEZ, S. Opciones de política ambiental para garantizar la sustentabilidad de la agroindustria azucarera en Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, Texcoco, v. 13, n. 2, p. 193–215, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.22231/asyd.v13i2.326>.
- POSADA CONTRERAS, C.; MORENO GIL, C. A.; CHICA RAMÍREZ, H. A. Criterios de análisis económico y estadístico para la toma de decisiones administrativas en la producción de caña de azúcar y sus derivados. In: CENICAÑA (org.). *Agroindustria de la caña de azúcar en Colombia*. Cali: Cenicaña, 2023. cap. X.
- SINGH, K.; SINGH, K.; BRAR, A. S.; SAHOO, P.; GUPTA, N.; MISHRA, S. K. Water productivity of sugarcane + summer moong intercropping system under subsurface drip irrigation and straw mulching. *Sugar Tech*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01401-4>.
- WAKCHAURE, G. C.; MINHAS, P. S.; BISWAS, A. K. et al. Assessment of gains in productivity and water-energy-carbon nexus with tillage, trash retention and fertigation practices in drip irrigated sugarcane. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115294>.

WANG, E.; COLLINS, B.; ATTARD, S. J.; EVERINGHAM, Y. L. Enhancing efficiency and profitability: the impact of smart irrigation scheduling in sugarcane production systems. In: PROC. CONFERENCE ON SMART IRRIGATION SYSTEMS, 2024. Anais [...]. Disponível em: <https://sugarresearch.com.au/wp-content/uploads/2024/12/Wang-Collins-Attard-Everingham.pdf>.

WONPRASAI, S.; XIE, X.; MACHIKOWA, T. Long-term effects of drip irrigation on water use efficiency, yield, and net profit of sugarcane production. Sugar Tech, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01266-z>.

YOUSSEF, E. A. E. M. Advancements in magnetized water technology. Egyptian Journal of Agronomy, Cairo, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.21608/agro.2025.383788.1691>.