

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

ALONSO WENDEL FERREIRA DA SILVA

Pegada hídrica e eficiência no uso da água: Um estudo comparativo do cultivo da Cana-de-Açúcar em diferentes municípios no noroeste paulista.

SÃO CARLOS-SP

2025

ALONSO WENDEL FERREIRA DA SILVA

Pegada hídrica e eficiência no uso da água: Um estudo comparativo do cultivo da Cana-de-Açúcar em diferentes municípios no noroeste paulista.

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

Orientador: Luiz Eduardo Moschini

São Carlos-SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Alonso Wendel Ferreira da

Pegada hídrica e eficiência no uso da água: Um estudo comparativo do cultivo da Cana-de-Açúcar em diferentes municípios no noroeste paulista. / Alonso Wendel Ferreira da Silva -- 2025.
91f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Luis Eduardo Moschini
Banca Examinadora: Luiz Eduardo Moschini, Diego Peruchi Trvisan, Dayana Almeida
Bibliografia

1. Uso da água. 2. Mudanças climáticas. 3. Sustentabilidade agrícola. I. Silva, Alonso Wendel Ferreira da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alonso Wendel Ferreira da Silva, realizada em 09/05/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Luiz Eduardo Moschini (UFSCar)

Prof. Dr. Diego Peruchi Trevisan (UFSCar)

Profa. Dra. Dayana Almeida (UNESP)

Dedico aos meus filhos que suportaram minha ausência em diversos momentos da pesquisa, estes que são o combustível para que sempre busque o melhor de mim.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), meu sincero agradecimento por ter sido o espaço que possibilitou minha formação acadêmica, oferecendo não apenas a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho, mas também um ambiente fértil para o crescimento intelectual, profissional e pessoal.

Ao Professor Doutor Luiz Eduardo Moschini, meu orientador, deixo minha mais profunda gratidão. Sua orientação atenta, comprometida e sempre generosa foi essencial em todas as etapas deste percurso. A paciência, o incentivo constante e a confiança depositada em meu trabalho foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios desta pesquisa e amadurecer como pesquisador. Sou grato pela oportunidade de aprender ao seu lado e por todo o apoio que me foi concedido ao longo dessa jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

“A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio”.

(Martin Luther King)

RESUMO

A pesquisa aqui apresentada analisa a pegada hídrica do cultivo de cana-de-açúcar, através de um estudo comparativo entre os municípios de Jales e Ituverava, ambos do noroeste paulista. O trabalho busca entender como as características edafoclimáticas e o histórico de uso da terra influenciam na demanda hídrica da cultura canavieira propondo medidas para aumento da resiliência climática da cultura. A metodologia de mensuração da pegada hídrica se deu com o auxílio do software CROPWAT 8.0, a partir de dados climáticos extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia e dados de produtividade apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Os municípios selecionados apresentam contrastes relevantes quanto ao tipo de solo (latossolo e argissolo) e ao tempo de ocupação agrícola, permitindo avaliar a influência desses fatores na pegada hídrica da cultura canavieira. Os resultados indicam que apesar do maior volume de chuvas e característica mais favorável de armazenamento de água no solo de Ituverava apresenta maior pegada hídrica que Jales, exigindo maior volume de água por tonelada de cana-de-açúcar. Além disso, o estudo demonstra que as mudanças climáticas impactam diretamente a produtividade e eficiência hídrica da cultura, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação do setor agrícola. É destacado também a importância de acrescentar critérios de sustentabilidade hídrica ao planejamento agrícola e ao zoneamento agroambiental, especialmente em regiões vulneráveis aos efeitos do clima.

Palavras-chave: pegada hídrica, uso da água, cana-de-açúcar, mudanças climáticas, sustentabilidade agrícola.

Abstract

This study analyzes the water footprint of sugarcane cultivation through a comparative assessment between the municipalities of Jales and Ituverava, both located in the northwest region of São Paulo, Brazil. The research aims to understand how edaphoclimatic characteristics and land use history influence the water demand of sugarcane crops, proposing measures to increase the crop's climate resilience. The methodology for measuring the water footprint was based on the CROPWAT 8.0 software, using climate data from the National Institute of Meteorology (INMET) and productivity data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). The selected municipalities present relevant contrasts in terms of soil type (Latosol and Argisol) and agricultural land use history, enabling the evaluation of these factors' influence on the water footprint of sugarcane cultivation. The results indicate that despite higher rainfall and better water storage capacity in Ituverava's soil, the municipality exhibits a higher water footprint than Jales, requiring more water per ton of sugarcane produced. Additionally, the study demonstrates that climate change directly impacts crop productivity and water use efficiency, reinforcing the need for adaptation strategies in the agricultural sector. It also highlights the importance of incorporating water sustainability criteria into agricultural planning and agro-environmental zoning, especially in regions vulnerable to climate change effects.

Keywords: water footprint, water use, sugarcane, climate change, agricultural sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar	22
Figura 2 – Evolução do déficit hídrico da cana-de-açúcar no território nacional (média de 1997-2012).....	26
Figura 3 – Plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo em 2000	28
Figura 4 – Plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo em 2021	28
Figura 5 – Plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo em 2000 e 2021 ..	289
Figura 6 – Capacidade de água disponível no solo no estado de São Paulo	30
Figura 7 – Pedologia do estado de São Paulo	46
Figura 8 – Perfil de um solo argissolo	41
Figura 9 – Perfil de um solo latossolo	47
Figura 10 – Localização da área de estudo no noroeste do estado de São Paulo....	47
Figura 11 – Pedologia do município de Ituverava, SP.....	46
Figura 12 – Pedologia do município de Jales, SP	50
Figura 13 – Distribuição da cana-de-açúcar nos anos de 2000 e 2021 em Ituverava, SP	51
Figura 14 – Distribuição da cana-de-açúcar nos anos de 2000 e 2021 em Jales, SP	52
Gráfico 1 – Produção de cana-de-açúcar em relação à área de canaviais do estado de São Paulo, SP	34
Gráfico 2 – Produção nacional de cana-de-açúcar em relação à área plantada no Brasil	35
Gráfico 3 – Produção de cana-de-açúcar nacional com a produção do estado de São Paulo, SP	35
Gráfico 4 – Relação entre a área plantada e a produtividade de cana-de-açúcar no estado de São Paulo	36
Gráfico 5 – Relação entre a área plantada e a produtividade de cana-de-açúcar no Brasil	37
Gráfico 6 – Pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar em Ituverava/SP (mm/m ³)	64
Gráfico 7 – Pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar em Jales/SP (mm/m ³).65	

Gráfico 8 – Comparação entre a pegada hídrica total (mm/m ³) a esquerda e produtividade (ton/ha) por safra, do município de Ituverava	67
Gráfico 9 – Mudanças climáticas em São Paulo (1980-2020).....	71
Gráfico 10 – Alterações de temperatura e precipitação em São Paulo (1979-2024).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados utilizados pelo software CROPWAT 8.0.....	433
Tabela 2 – Distribuição das Classes de Solos por Área e Porcentagem no município de Ituverava, SP.....	588
Tabela 3 – Distribuição das Classes de Solos por Área e Porcentagem no município de Jales, SP	599
Tabela 4 – Evolução da Produção, Área Plantada e Produtividade da Cana-de-Açúcar no Noroeste Paulista (Safras 2016/17 a 2021/22) no município de Ituverava	62
Tabela 5 – Evolução da Produção, Área Plantada e Produtividade da Cana-de-Açúcar no Noroeste Paulista (Safras 2016/17 a 2021/22) no município de Jales, SP	63
Tabela 6 – Volume de chuvas por município.....	63
Tabela 7 – Síntese das ações e das estratégias para a expansão sustentável da área de cultivo da cana-de-açúcar, preservando os recursos hídricos nos municípios de Jales e Ituverava	80

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CC	Capacidade de Campo
CBH	Comitês de Bacias Hidrográficas
CIAGRO	Portal Agrometeorológico e Hidrológico do estado de São Paulo
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DHC	Demanda Hídrica da Cultura
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Instituto de Economia Agrícola
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ONU	Organização das Nações Unidas
PAM	Pesquisa Agrícola Municipal
PH	Pegada Hídrica
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PIB	Produto Interno Bruto
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SINGREH	Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR	17
1.2 O CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 A GESTÃO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS.....	23
2.1.1 Crise hídrica e cana-de-açúcar	25
2.2 IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE SÃO PAULO ..	26
2.2.1 Fertirrigação com vinhaça	32
2.2.2 Irrigação de salvamento	32
2.2.3 Sistema irrigado de produção	33
2.3 A PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO	33
2.4 RELAÇÃO ENTRE CRISE HÍDRICA E SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO CANAVIEIRA	37
2.5 LIMITAÇÕES E DESAFIOS DA CANA-DE-AÇUCAR DE SEQUEIRO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	38
2.6 PEGADA HÍDRICA.....	40
2.6.1 Software CROPWAT 8.0	43
2.6.2 Dados utilizados	45
2.7 PEDOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	45
2.8 CONSEQUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DE CULTIVO DA CANAVIEIRA.....	48
2.9 PROJEÇÕES FUTURAS PARA O CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	51
3.2 METODOLOGIA	54
3.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA PRODUTIVIDADE E PRECIPITAÇÃO	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 MUDANÇA CLIMÁTICA E AGRICULTURA	69
4.1.1 Cana-de-açúcar e mudanças climáticas.....	72
4.1.2 Estratégias para adaptação da cultura canvieira às mudanças climáticas....	74
4.1.2.1 Melhoramento genético e uso de variedades resilientes	75

4.1.2.2 Redução da Pegada Hídrica	75
4.1.2.3 Planejamento Territorial e Zoneamento Agroambiental adequado.	77
4.1.2.4. Monitoramento climático inteligente	78
4.1.2.5. Conservação do solo e recursos naturais.	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial tem causado, inevitavelmente, o aumento da demanda por recursos para manter a sadia qualidade de vida da população. Esse aumento passa por diversos setores, mas, principalmente, pelo abastecimento dessa população, iniciando-se pela agricultura, atividade que fornece os insumos básicos para alimentação e produção. Assim, a atividade agrícola precisa ser modernizada a fim de evitar grandes latifúndios e conflitos ambientais, pois sua expansão demanda a substituição de áreas anteriormente cobertas por vegetação nativa para culturas agrícolas, onde o manejo inadequado pode causar catástrofes ambientais, como perda de habitat, de fauna, contaminação de água e solo, erosões, dentre outros.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), água, energia e alimentos estão diretamente correlacionados, conforme afirmou o diretor de Terra e Água da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization – FAO*), Jipe Hogeveen, durante o primeiro Simpósio Global sobre Soluções Sustentáveis em Água e Energia, em Foz do Iguaçu, no Paraná. Não obstante, conforme o Relatório da FAO, a disponibilidade de água doce diminuiu 20% durante as duas últimas décadas, reforçando a ideia de que se deve produzir mais utilizando menos água, especialmente na agricultura, que é a atividade que mais consome água no planeta devido à ampliação das lavouras para atender às necessidades humanas, pressionando os recursos hídricos regionais.

Atualmente, a agricultura é uma das principais atividades econômicas do Brasil, impulsionando o Produto Interno Bruto (PIB) nacional com safras recordes ano após ano, conforme dados do Boletim Macroeconômico organizado pela Secretaria de Política Econômica do Ministério da Fazenda de março de 2024. Com expectativa de crescimento de 11,3%, o país é um grande exportador mundial de *commodities*, como a cana-de-açúcar. Dados do Instituto de Economia Agrícola (IEA) apontam que o Brasil é o maior produtor mundial dessa lavoura, e o estado de São Paulo lidera a produção nacional, correspondendo a mais da metade da produção do país (IEA, 2024).

No entanto, a expansão agrícola possui algumas necessidades, incluindo a disposição de água em mananciais para irrigação visando alcançar uma produção adequada e eficiente. Conforme Ferrarini (2022), a água na agricultura irrigada tem

seu maior consumo na evapotranspiração das plantas, sem retornar aos corpos hídricos de onde vieram. Com isso, a fim de manter um cultivo sustentável, torna-se necessária a análise do modo de utilização dos recursos hídricos na agricultura nacional, embora o Brasil ocupe espaço de vantagem no volume de água doce disponível, sendo o detentor de 12% desse recurso em âmbito global. Contudo, a distribuição em território nacional ocorre de forma desigual, sendo que algumas regiões passam por severas estiagens, como no caso do noroeste paulista, local com maior concentração de canaviais do país.

O uso descontrolado e, por vezes, desnecessário dos recursos hídricos pode gerar catástrofes, como a seca, que pode culminar na ausência de água para atender às necessidades básicas humanas. Nesse sentido, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) defende que, em caso de escassez hídrica, o uso prioritário do recurso é o consumo humano e dessedentação de animais, mandamento este de extrema relevância para a agricultura, pois pode até mesmo impedir a irrigação e diminuir a produtividade de determinada *commodity* (Brasil, 1997). Outro ponto importante é que o desenvolvimento sustentável é princípio basilar para o direito ambiental brasileiro, e seu desrespeito gera responsabilidades ao degradador, que vão desde a restauração do bem degradado, quando possível, até à responsabilidade criminal.

Dessa maneira, é fundamental quantificar o volume de água consumido pelas culturas agrícolas, viabilizando a avaliação do uso hídrico associado às diferentes atividades produtivas. Para tanto, diversas metodologias podem ser empregadas. Neste estudo, adota-se a abordagem da pegada hídrica, conforme a metodologia desenvolvida por Hoekstra, Chapagain e Aldaya (2011), a qual permite mensurar, de forma abrangente, o volume de água doce utilizado ao longo de toda a cadeia produtiva.

Considerando-se essa abordagem metodológica, a cultura da cana-de-açúcar configura-se como objeto de análise prioritário, dada sua expressiva importância econômica para o desenvolvimento nacional e sua elevada demanda hídrica. As necessidades de água dos canaviais variam conforme diversos fatores, como tipo de solo, condições climáticas, época de plantio e disponibilidade pluviométrica. Assim, a análise dessas variáveis torna-se essencial para o planejamento agrícola e para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para decisões mais eficazes no contexto da produção agroindustrial.

O estudo analisa a pegada hídrica e a eficiência no uso da água no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes municípios do noroeste paulista, comparando os impactos do manejo agrícola, das condições climáticas e da disponibilidade hídrica na sustentabilidade da produção. Para a análise, foram selecionados dois municípios do estado de São Paulo com contrastes edafoclimáticos e históricos produtivos distintos: Ituverava possui plantio intensivo há mais de 30 anos, estabelecido sobre latossolos, e Jales iniciou a produção intensiva há aproximadamente 10 anos, sobre argissolos.

Neste contexto, o objetivo principal do presente estudo é entender como as características edafoclimáticas e o histórico de uso da terra podem influenciar na demanda hídrica da produção de cana-de-açúcar em regime de sequeiro. Para isso, optou-se por adotar a análise da pegada hídrica como principal ferramenta metodológica, permitindo avaliar o volume de água consumido ao longo do ciclo produtivo e sua relação com a sustentabilidade dos sistemas analisados.

Além da pegada hídrica total e de suas componentes (verde, azul e cinza), são considerados indicadores complementares de sustentabilidade, como a eficiência no uso da água, a produtividade agrícola (t/ha) e os possíveis impactos ambientais decorrentes do uso intensivo dos recursos hídricos. A comparação entre os dois municípios permite identificar que fatores como o tipo de solo, o tempo de exploração agrícola, o regime de chuvas e o manejo agrícola interferem na performance hídrica da cultura.

Os resultados esperados buscam informar estratégias de manejo hídrico mais eficientes e com melhor resiliência climática, subsidiando políticas públicas voltadas à gestão racional da água e à produção agroindustrial sustentável, especialmente em regiões vulneráveis às mudanças climáticas, como o noroeste paulista. A abordagem proposta pretende, assim, contribuir para o avanço das discussões científicas sobre o uso sustentável da água na agricultura e sobre a importância da adequação das práticas produtivas ao contexto edafoclimático e socioeconômico regional.

Embora existam avanços significativos na mensuração da pegada hídrica aplicada à agricultura, a literatura ainda apresenta lacunas importantes no entendimento da relação entre tipo de solo, tempo de cultivo e demanda hídrica da cana-de-açúcar, especialmente em áreas de sequeiro. Parte dos estudos privilegia aspectos isolados, como o papel do solo na retenção de umidade e na dinâmica hídrica do perfil, como evidenciado por Andrade e Stone (2011), que analisaram solos do Cerrado com diferentes teores de argila e sua capacidade de armazenar água.

Outros trabalhos concentram-se nos efeitos do déficit hídrico sobre o crescimento e a fisiologia da planta, como demonstrado por Silva et al. (2008), que identificaram alterações nas respostas biométricas e fisiológicas da cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas sob estresse hídrico. Ainda assim, são escassas as abordagens que integram variáveis edafoclimáticas e histórico de uso da terra em análises comparativas regionais.

Diante disso, o presente estudo se propõe a preencher essa lacuna ao investigar, de forma integrada, como o tipo de solo e o tempo de exploração agrícola influenciam a pegada hídrica da cana-de-açúcar, contribuindo com evidências empíricas para um debate ainda incipiente. Ao adotar uma abordagem comparativa entre os municípios de Jales e Ituverava, com distintos contextos edafoclimáticos e históricos produtivos, a pesquisa permite explorar como esses fatores interagem para moldar a sustentabilidade do cultivo em condições de sequeiro.

A escolha do noroeste paulista como área de estudo reforça a relevância da investigação, uma vez que a região enfrenta desafios específicos de gestão hídrica, como estiagens prolongadas, solos de baixa retenção de umidade e intensa expansão da monocultura canavieira. Assim, o estudo contribui não apenas para a literatura científica, mas também para o planejamento territorial e a formulação de estratégias de manejo hídrico mais eficientes e adaptadas às realidades locais, em um cenário marcado pelas incertezas trazidas pelas mudanças climáticas.

1.1 HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

A primeira destilaria de cana-de-açúcar em São Paulo se deu no município de Piracicaba, em 1933. Com o sucateamento do sistema ferroviário nordestino, o fim do Estado Novo e a tendência de deslocamento, assumiu a frente da produção nacional na safra de 1951/52, passando de 4,4 milhões de sacos para 8,1 milhões. Com isso, São Paulo superou o estado de Pernambuco e tornou-se autossuficiente na produção de açúcar, comercializando seus excedentes para os estados da região Sul e outros estados vizinhos, como Goiás e Mato Grosso, que antes eram abastecidos pela indústria nordestina. Assim, entre as décadas de 1930 e 1970, a produção canavieira migrou para o interior de São Paulo, no ambiente de Mata Atlântica (Rodrigues; Ross, 2020). Neste período, havia disponibilidade hídrica suficiente para atender às demandas de produtividade em regime de sequeiro. Ressalta-se que a tecnologia

existente à época era inferior à que encontramos atualmente (Andrade, 1958, 2005; Eisenberg, 1977; Perruci, 1978).

Nas décadas de 1960 e 1970, a irrigação da cana-de-açúcar era pouco voltada para a redução do déficit hídrico e mais interessada no descarte da água residuária e da vinhaça (Melo, 2009). Já nas décadas de 1980 e 1990, passou-se a dar utilidade a esses resíduos através da fertirrigação.

A partir das citadas décadas, o aumento da população causou a elevação do custo da terra nessa região de Mata Atlântica e sua fragmentação em terras menores (Costa; Mondardo, 2013). Além disso, a queda nos preços das commodities e a necessidade de alcançar escalas produtivas competitivas no mercado internacional pressionaram os produtores de cana-de-açúcar a buscar regiões com topografia mais favorável e custo de terras mais acessível. Como resultado, o cenário econômico e social impulsionou a expansão do cultivo para áreas do cerrado paulista caracterizadas por maior deficiência hídrica e solos menos produtivos (Pires, 2000).

O cerrado paulista caracteriza-se por apresentar precipitação média anual variando entre 750 mm e 2000 mm, distribuída de forma irregular ao longo do ano, com maior concentração no período chuvoso, que se estende, predominantemente, de novembro a março. Os solos dessa região, em sua maioria profundamente intemperizados, compreendem tanto perfis arenosos quanto argilosos, com elevados teores de argila em determinadas áreas (PRADO, 2013). Destaca-se que, durante o período seco, a disponibilidade hídrica para as plantas depende essencialmente da água armazenada no solo entre os eventos pluviométricos, o que ressalta a importância das características físico-hídricas do solo para a manutenção da vegetação e da produtividade agrícola.

Devido à baixa precipitação efetiva do cerrado, que ocorre por ter suas chuvas concentradas em poucos meses do ano, além da alta demanda hídrica do cultivo e baixa capacidade de retenção de água pelos solos, o cerrado é um ambiente limitante para a produção cana-de-açúcar (Rodrigues *et al.*, 2014).

Na década de 2000, ocorreu a expansão acelerada do setor sucroenergético, onde os canaviais se espalharam rapidamente pelo Cerrado, priorizando a velocidade de expansão ao invés da tecnologia aplicada. Assim, houve um déficit de produção, comprometendo o desempenho do setor sucroenergético nacional. A produtividade

caíra na longevidade do canavial, onde o número de cortes recuava de 6 a 8 para 2 a 4 (Gouvêa *et al.*, 2009).

Nesse período, as usinas com maior experiência de produção no Cerrado intensificaram a implantação de sistemas de fertirrigação e salvamento. No entanto, a inexperiência nacional com o regime de irrigação conduziu os canaviais para ganhos não expressivos.

Na década de 2010, o plantio de cana no Cerrado já representava mais da metade da cana plantada no estado de São Paulo. Porém, o déficit hídrico se agravava nessa região, aliado a evidências de que as mudanças climáticas poderiam agravar ainda mais a deficiência hídrica da cana-de-açúcar.

Nesse período, surgiram os primeiros canaviais irrigados, motivados por pesquisas lideradas pela Embrapa Cerrados. Por sua vez, alguns produtores se encontraram relutantes à implantação de equipamentos de irrigação, fenômeno este comum em outras produções irrigadas como café, laranja e limão, que hoje não mais existem sem essa prática.

Após 2013, com a ocorrência de crises hídricas e econômicas, diversas usinas de açúcar e álcool vieram à falência, sobrevivendo, dentre outras, aquelas que praticavam o cultivo irrigado.

É inegável, na atualidade, a importância do cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado para o desenvolvimento econômico nacional. O setor abrange, além da produção de açúcar, a responsabilidade pelo biocombustível derivado da cana-de-açúcar, protagonista na substituição dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, um dos responsáveis pela diminuição de gases de efeito estufa, cumprindo assim as metas definidas em pactos internacionais.

Essa demanda por matrizes energéticas renováveis aumentou a procura por terras para a implantação de canaviais, sendo que o Brasil é o maior exportador mundial dos produtos oriundos da cana-de-açúcar e o segundo maior exportador de biocombustível (Branco *et al.*, 2019). Dessa forma, é possível dimensionar a elevada importância do plantio desta cultura para o desenvolvimento nacional.

Atualmente, as usinas brasileiras de cana-de-açúcar operam de forma híbrida, com capacidade para produzir tanto açúcar quanto etanol, conforme a dinâmica de preços do mercado. O setor sucroenergético também desempenha papel relevante na geração de empregos e no fortalecimento das economias locais, uma vez que a instalação de usinas costuma gerar impactos socioeconômicos positivos nos

municípios onde se estabelecem. Embora em constante expansão no território nacional, observa-se uma progressiva redução da prática da queima para colheita, em função de exigências legais e ambientais.

Nesse contexto, torna-se imprescindível o investimento em tecnologias e na realização de estudos voltados à adoção de práticas sustentáveis, com vistas à consolidação de um modelo de desenvolvimento que reduza impactos negativos e evite o desperdício de capital ambiental.

1.2 O CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma espécie de gramínea forte e alta do gênero *Saccharum*, e tem como origem o sudeste da Ásia. Tem por principais características de identificação flores pequenas e de cor clara, fruto seco e tronco em formato cilíndrico, bem dividido por nós, em colmos, onde fica armazenada a sacarose. Pode ser cultivada através de sementes e pelo plantio dos colmos. Atualmente, existem variedades de cana-de-açúcar específicas para atender às demandas de produção e ambientais.

Com essa evolução tecnológica, foram desenvolvidos novos cruzamentos de espécies do gênero *Saccharum*, com destaque para *S. officinarum* e *S. spontaneum*. A primeira tem como principal característica a produção de sacarose, exigindo abundância em água. Já a espécie *S. spontaneum* é uma planta mais rústica, resistente a pragas e ao déficit hídrico. No entanto, é mais indicada para solos com textura argilosa, sendo não recomendada para solos com textura arenosa (INMET, 2009).

Quanto ao período de cultivo, existe a divisão entre “cana de ano”, cujo tempo entre o plantio e a colheita é de 12 meses, e “cana de ano e meio”, cujo tempo entre o plantio e a colheita é de 18 meses. No estado de São Paulo, é predominante o cultivo da “cana de ano”. A “cana de ano” possui dois plantios, um no início do ano e a “cana de inverno”, com plantio em agosto e colheita em 12 meses, visando aproveitar as chuvas de dezembro a março (Sabadin, 2013).

Dessa forma, quando em produção, a cana existe de duas formas: a cana-planta, que é aquela plantada por meio de colmos ou sementes, sendo comercialmente mais comum o plantio de colmos, até o seu primeiro corte; e a cana

soca, onde a partir do primeiro corte da cana-planta, aguarda-se que a soqueira que permanece brote cana-de-açúcar com potencial comercial.

É possível dividir a cana-de-açúcar em quatro estágios fenológicos, desde o plantio até a sua fase de corte. Cada estágio possui exigências de nutrientes e água de formas diferentes, sendo eles: i) o estágio de brotação, que é o período de germinação, que ocorre de 20 a 30 dias após o plantio, ocorrendo o enraizamento inicial; ii) perfilhamento, que é a formação da touceira, onde se inicia o processo de produção de colmos, que recebem o nome de perfilhos – esses colmos aparecem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário; iii) crescimento dos colmos, fase de início do acúmulo de açúcar nos colmos, aumentando de tamanho e acumulando açúcar na base – neste estágio, o canavial pode atingir mais de 3 m de altura, variando conforme a qualidade do solo e disponibilidade de nutrientes, sendo este o período mais longo do desenvolvimento da planta; iv) maturação, fase que exige um estresse hídrico na planta para favorecer o acúmulo de sacarose (Figura 1).

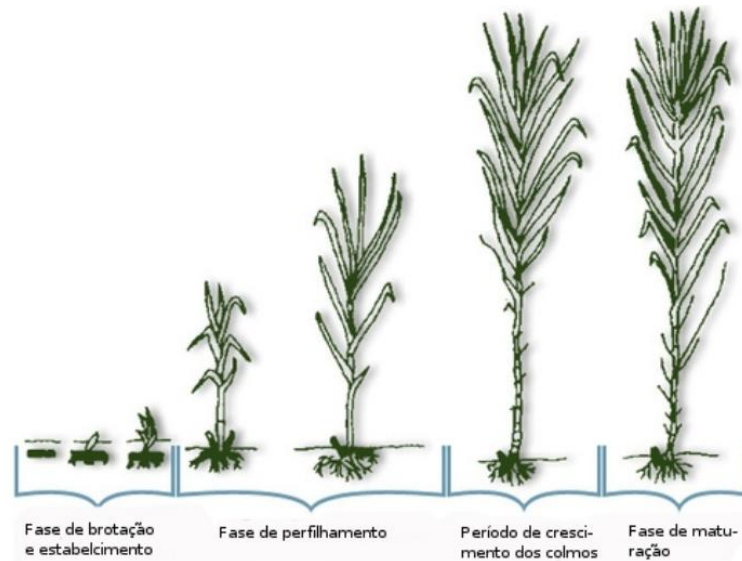


Figura 1 – Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar

Fonte: Embrapa (2022).

As necessidades do plantio devem ser analisadas em cada fase do desenvolvimento da planta, visando atingir a máxima produtividade e diminuir gastos, seja de produção, capital ambiental e recurso hídrico. Os dois principais fatores que influenciam o desenvolvimento dos canaviais são a disponibilidade hídrica e a temperatura do ambiente.

O aumento de disponibilidade de sacarose na cana-de-açúcar varia conforme a planta se desenvolve, onde o déficit hídrico e a diminuição da temperatura são necessários para o aumento desta sacarose nos colmos (Leite *et al.*, 2008), essencial para a fase de maturação e consequente corte com maior produtividade. Dessa forma, a combinação das fases climáticas regionais com a fase de cultivo é essencial para a otimização da produção, onde as maiores temperaturas e disponibilidade hídrica estejam presentes no perfilhamento e desenvolvimento dos colmos.

Em que pese a cana-de-açúcar ser muito resistente à falta de recursos hídricos, Albuquerque (2012) esclarece que é necessária uma oferta hídrica entre 1500mm e 2000mm de chuvas ao longo do processo produtivo, onde o déficit de água impacta diretamente na produção de sacarose. Quanto à temperatura, o intervalo entre 30°C e 34°C é ideal para o desenvolvimento da planta, com redução abaixo de 30°C e estresse térmico acima de 35°C e nenhum crescimento acima de 38°C. Inman-Bamber (2004) relata que condições de seca prolongada e altas temperaturas atrapalham na produção de folhas pela planta, o que impacta a fotossíntese e, por consequência, o aproveitamento da água e produção de sacarose.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A GESTÃO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS

Em que pese a legislação nacional não fazer qualquer diferença entre recurso hídrico e água, doutrinariamente, é entendido que o recurso hídrico é a maneira de valorar economicamente a água. Nesse sentido, a água é um elemento do ambiente, imprescindível à manutenção da vida e desenvolvimento econômico. O enunciado previsto no artigo 225 da Constituição Federal se aplica a este bem, citando que “*todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo [...]*” (Brasil, 1988).

Antes da promulgação do Código Civil de 1916, a água era tida como domínio público, ou seja, era um bem, disposto ao gozo e serviço comum do povo, como estradas, canais e rios navegáveis. No entanto, com a promulgação do referido código, o artigo 99 estabelece que:

Art. 99. São bens públicos:

I - os de uso comum do povo, tais como rios, mares, estradas, ruas e praças;
II - os de uso especial, tais como edifícios ou terrenos destinados a serviço ou estabelecimento da administração federal, estadual, territorial ou municipal, inclusive os de suas autarquias;

III - os dominicais, que constituem o patrimônio das pessoas jurídicas de direito público, como objeto de direito pessoal, ou real, de cada uma dessas entidades. (Brasil, 2002, p. 1).

Assim, os rios sempre foram considerados no direito brasileiro como bens de uso comum do povo.

Conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), através da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, o domínio público da água não torna o poder público federal e estadual proprietários das águas, mas gestores desse bem coletivo com a finalidade de atingir o interesse público.

Com o conceito de que a água é um “bem de uso comum do povo”, esta não pode ser apropriada por uma única pessoa física ou jurídica, e seu uso por essas pessoas não pode significar a restrição de acesso à água para que todos utilizem. Dessa forma, o usuário deste bem deve fazê-lo de forma que atenda o interesse da sociedade, não poluindo, não utilizando além da capacidade daquele manancial,

dentre outras medidas. Além disso, é necessário que qualquer autorização para a utilização da água seja justificada e motivada pelo gestor público sob a pena de ser também responsabilizado pelo mau uso do bem.

Nesse sentido, a própria PNRH aborda a responsabilidade do poder público na gestão deste recurso, conforme exposto no artigo 11: “O regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água” (Brasil, 1997).

Dessa forma, a emissão de outorgas sem controle de qualidade e quantidade fere o objetivo desta ferramenta. Assim, o poder público tem a obrigação de fiscalizar e controlar suas emissões.

Cabe também esclarecer, conforme mencionado, que a água não é propriedade do poder público, ou seja, este não pode simplesmente vender ou alienar água. Com isso, a outorga é apenas uma autorização de uso, explicando a finalidade e volume a ser utilizado.

Ainda assim, o uso da água sem valoração econômica facilita o uso irresponsável desse recurso; essa precificação é uma evolução na governança das águas. No entanto, a busca pelo desenvolvimento econômico pouco preocupado com a sustentabilidade desta economia impõe desafios às estratégias de gestão, dentre esses, medir o consumo de água para as atividades essenciais, suscitando uma gestão descentralizada e integrada entre os planejadores e tomadores de decisão.

Nesse contexto, a PNRH prevê a participação da sociedade e do poder público na fiscalização e controle do uso da água. Dentre os muitos órgãos envolvidos no Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (SINGREH), estão incluídos o Ministério do Meio Ambiente (MMA), Agência Nacional de Águas (ANA) e Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH).

Segundo Campos e Studart (2003), o equilíbrio entre oferta e demanda é a base para qualquer balança econômica, onde a preciosidade do bem varia conforme sua disponibilidade e o quanto é procurado, buscando atender às necessidades sociais e entendendo que o recurso hídrico possui limite e pode se esgotar. Quanto à oferta, a gestão se concretiza através do pedido de outorgas para barramentos, perfuração de poços, captação de água da chuva, entre outros meios, que são maneiras de combater a escassez hídrica para aquela atividade. Em relação à demanda, é preciso criar estratégias para o uso otimizado da água, evitando

desperdícios e pressões desnecessárias sobre os mananciais, normalmente efetivados pelo mau planejamento de expansão agrícola ou urbana.

Ainda conforme Campos e Studart (2003), executar gestão de demanda de recursos hídricos é analisar as necessidades individuais de cada consumidor em detrimento dos interesses da coletividade. Dessa forma, esta medida visa incentivar o uso racional, diminuindo o consumo de água, que pode ser implementado através de medidas de controle, como as citadas outorgas. Estas devem estar aliadas à pesquisa científica visando aprimorar novas técnicas e tecnologias, favorecendo o uso racional das águas.

Atualmente, a agricultura é o maior consumidor de águas do país, sendo responsável por quase 70% do consumo deste recurso. Considerando que a população mundial tende a aumentar, elevando as necessidades agrárias para alimentar essas pessoas, torna-se necessário aprimorar as práticas de uso desses recursos. No entanto, ainda são notadas elevadas perdas de água no processo de plantio nacional (ANA, 2024).

Dessa forma, a irrigação e o cultivo devem ser analisados para que exista um uso eficiente desse recurso através da implementação de novas tecnologias. Tal medida evita a escassez hídrica, ocasionando desenvolvimento regional e nacional sem colocar em risco a segurança alimentar da população, gerando inclusive empregos e diversificando a produção, evitando grandes latifúndios.

Diversos estudos abordam a importância do uso racional da água pela produção agrícola e a utilização de ferramentas, as quais incluem a necessidade de cobrança adequada pelo uso da água. Isso se deve, pois, cada cultura tem sua peculiaridade, necessidade hídrica e valor agregado, maior incentivo às produções com menor pegada hídrica, evitando assim a venda virtual de recursos hídricos, bem como estratégias de reuso das águas dentro das bacias hidrográficas.

2.1.1 Crise hídrica e cana-de-açúcar

O noroeste paulista sofre anualmente com longos períodos de estiagem. Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), o setor mais afetado pela falta de água é o agropecuário, por ser o maior consumidor deste recurso, sendo atingido pela queda de produtividade e diminuição de volume de água, inclusive para a dessedentação de animais.

A escassez de recursos hídricos compromete o desenvolvimento econômico regional, acentua desigualdades sociais e aumenta o risco de conflitos pelo uso e pela gestão da água. Entre os impactos observados, destaca-se a construção de barragens particulares como medida emergencial para garantir o abastecimento de animais em propriedades rurais, prática que, embora compreensível em contextos de escassez, pode comprometer a disponibilidade hídrica para outros usuários da mesma bacia hidrográfica, agravando disputas e desequilíbrios no uso compartilhado dos recursos.

Estudo desenvolvido pela ANA (2017) mostra a evolução do déficit hídrico da cana-de-açúcar no território nacional, conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3.

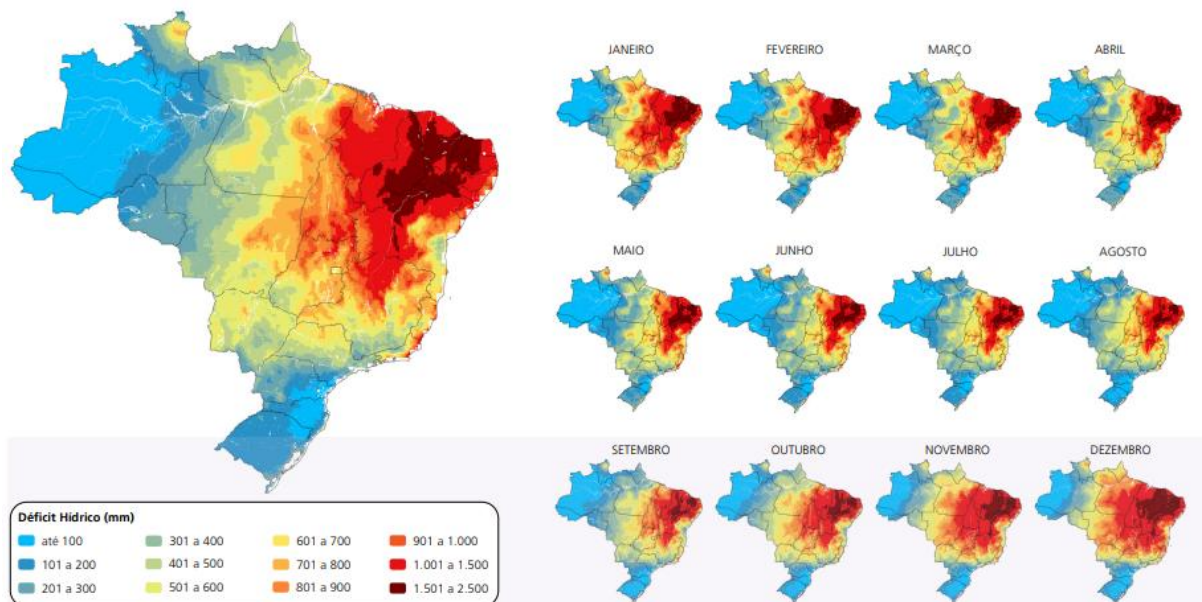


Figura 2 – Evolução do déficit hídrico da cana-de-açúcar no território nacional (média de 2016-2017)

Fonte: ANA (2017).

2.2 IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE SÃO PAULO

A cultura da cana-de-açúcar teve sua origem produtiva na Zona da Mata, localizada na região Nordeste do Brasil e inserida no bioma Mata Atlântica. Com o avanço da fronteira agrícola, a expansão canavieira passou a ocupar novas áreas, incluindo porções do interior do estado de São Paulo, onde as condições edafoclimáticas se mostraram favoráveis ao cultivo da cultura em regime de sequeiro.

A partir da década de 1970, o lançamento do Programa Nacional do Alcool (Proálcool), instituído pelo governo federal como resposta à crise do petróleo e ao crescimento da demanda interna por combustíveis, impulsionou de forma significativa a expansão da canavieira. O programa promoveu o aumento dos preços das terras e incentivou a subdivisão das propriedades, o que motivou muitos produtores a migrarem suas atividades para áreas rurais de maior extensão territorial.

Além disso, os subsídios e incentivos estatais voltados ao aumento da escala produtiva exigiram a incorporação de novas áreas, muitas delas caracterizadas por solos de menor fertilidade e regiões com maior risco de déficit hídrico (VIANNA; SENTELHAS, 2014). Nesse contexto, a década de 1990 marcou a intensificação do cultivo da cana-de-açúcar no centro-oeste paulista, com destaque para os municípios de Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, que passaram a representar polos estratégicos na produção da commodity no estado de São Paulo.

Esta região é conhecida pelos longos períodos de estiagem, com predominância de chuvas entre os meses de novembro e março, dificultando o plantio no regime de sequeiro. Nesta forma de produção, o plantio se mantém apenas com a água armazenada no solo, o que exige solos com grande capacidade de reter água (Figura 4, 5 e 6).

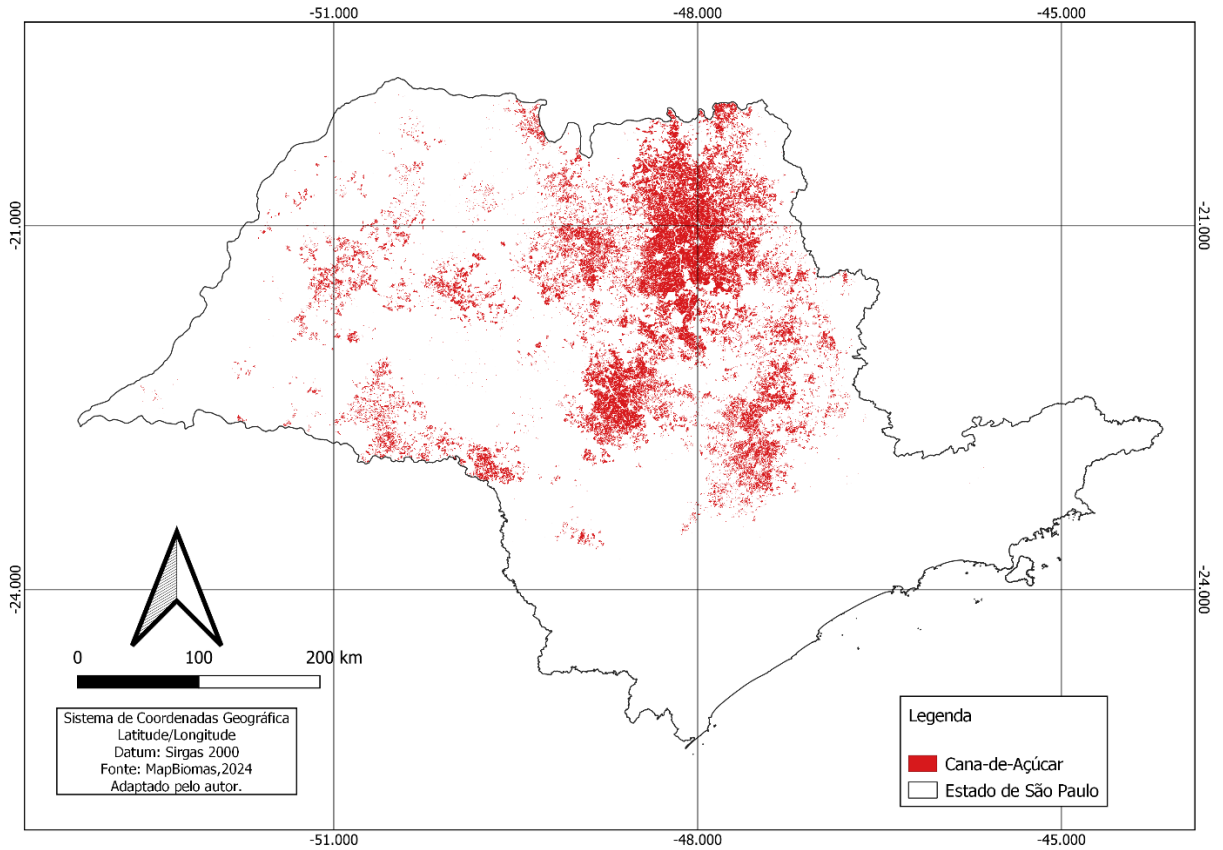


Figura 3 – Plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo em 2000
Fonte: Adaptado pelo autor do mapa de uso do solo do MapBiomias (2024).

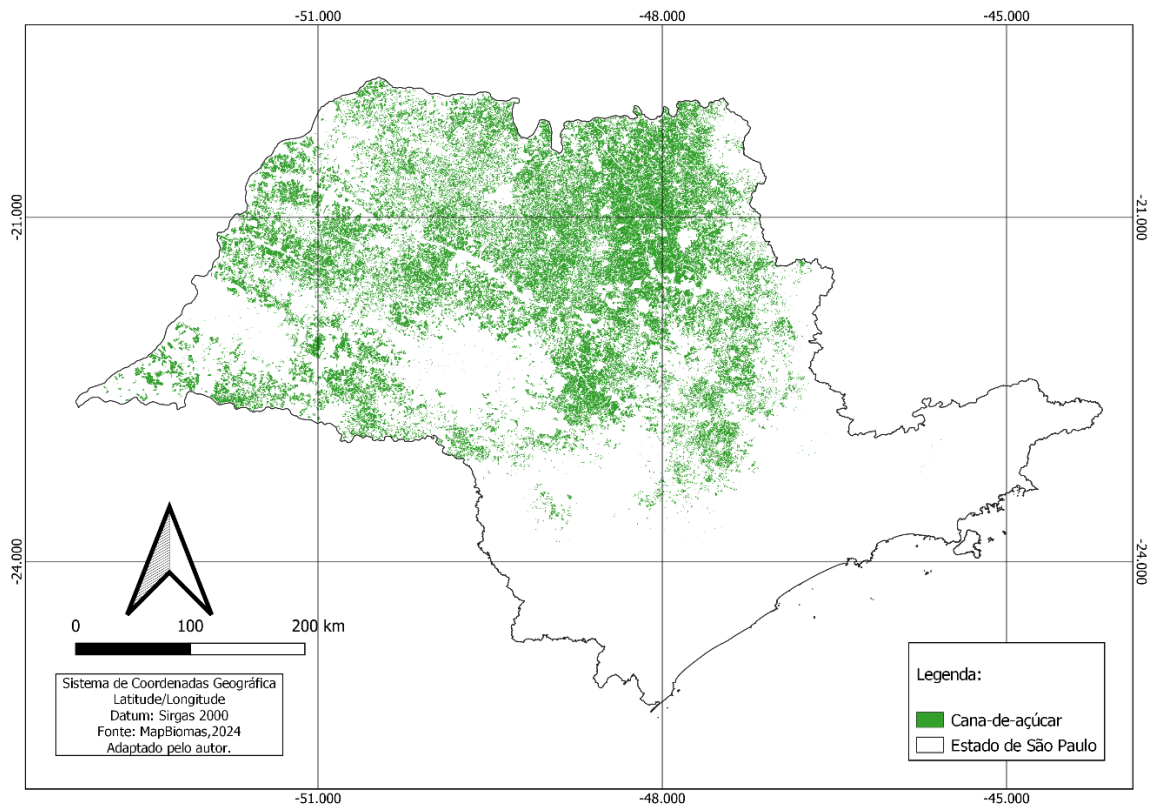


Figura 4 – Plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo em 2021
Fonte: Adaptado pelo autor do mapa de uso do solo do MapBiomias (2024).

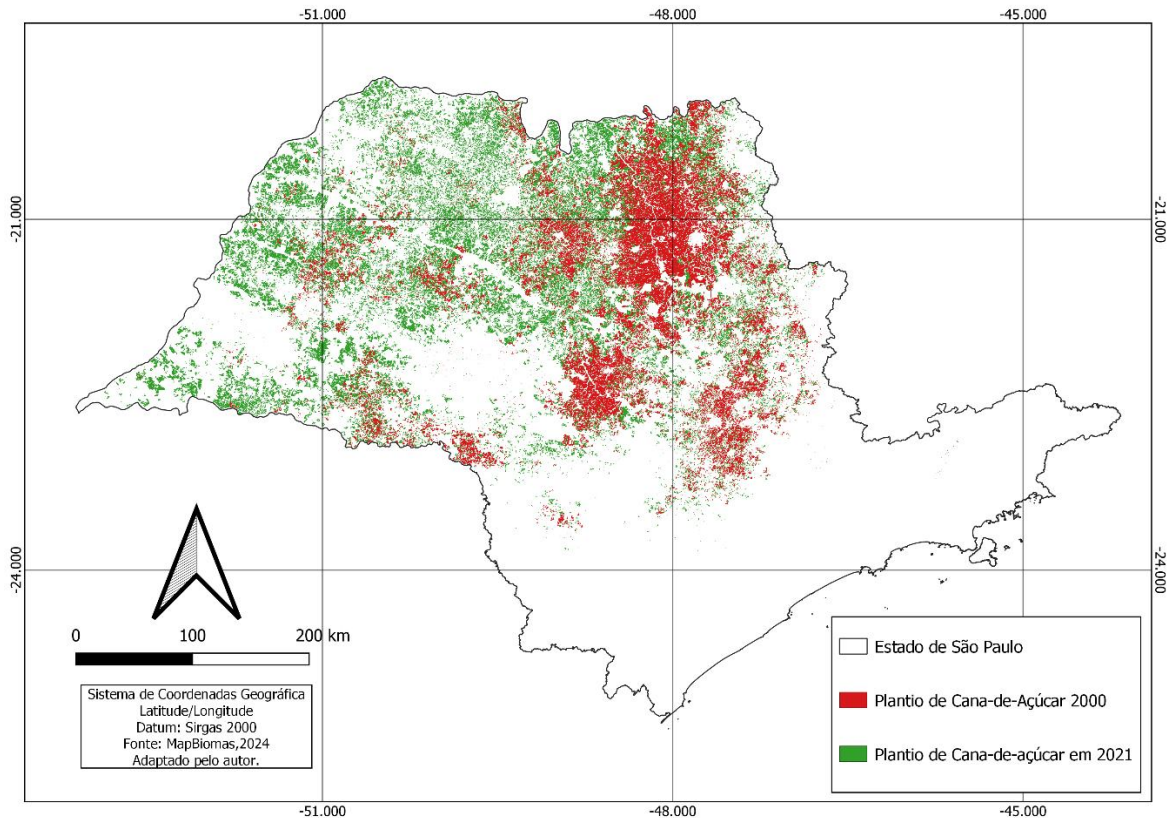


Figura 5 – Plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo em 2000 e 2021

Fonte: Adaptado pelo autor do mapa de uso do solo do MapBiomias (2024).

O interior paulista abriga os biomas Mata Atlântica e Cerrado. O solo é composto principalmente por argissolos e latossolos, os quais possuem características diferentes de retenção hídrica, sendo que o argissolo possui dificuldade de reter água. O noroeste paulista é composto, em sua maior parte, por solos com capacidade de água disponível inferior a $0,07\text{m}^3\text{m}^{-3}$ (ANA, 2020).

Para medir a capacidade de água disponível no solo, se utiliza como limite a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A partir desses limites, define-se a capacidade de água disponível como o volume máximo de água a ser utilizado pelas plantas quando a umidade se encontra em capacidade de campo, sem considerar o volume que não está disponível na condição de umidade de ponto de murcha permanente, calculada através da equação:

$$AWC = (Occ - Opmp)$$

Devido à sua baixa capacidade de retenção de água, aliada ao longo período de estiagem, a produtividade dos canaviais paulistas fica limitada em sua produção

em decorrência da escassez de água no regime de sequeiro, gerando uma grande redução de evapotranspiração.

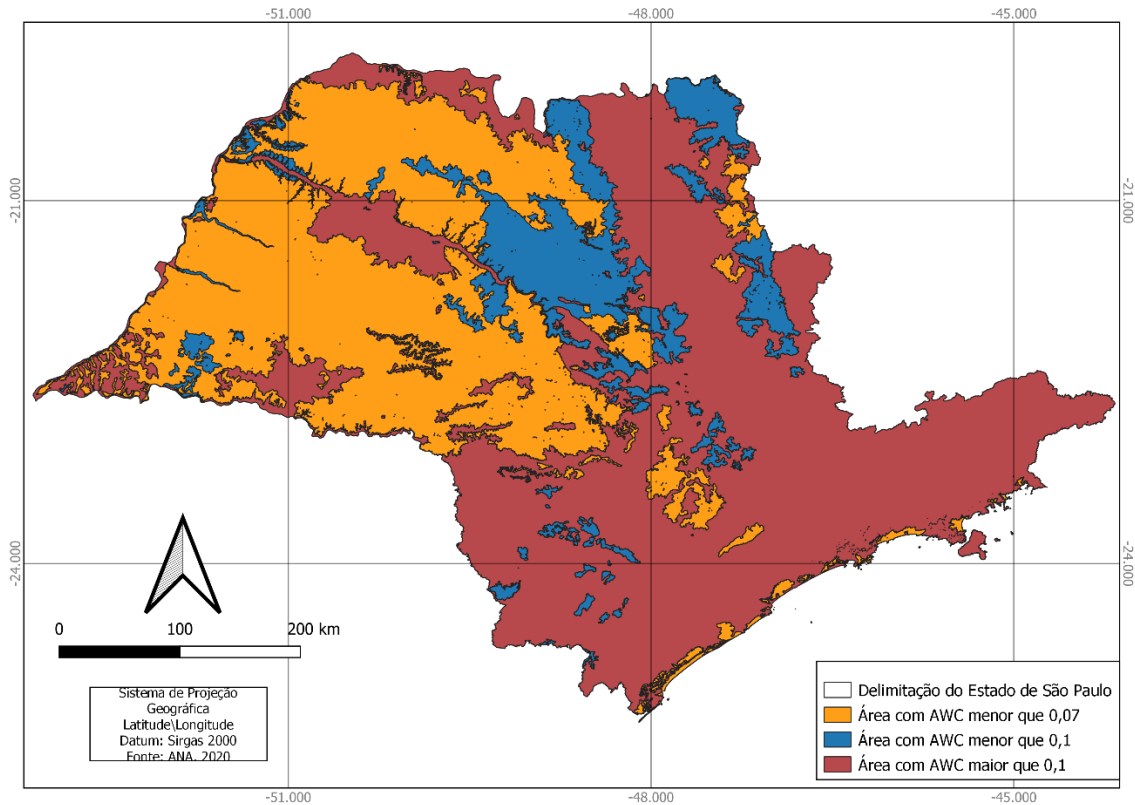


Figura 6 – Capacidade de água disponível no solo no estado de São Paulo
Fonte: Adaptado pelo autor do mapa de AWC da ANA (2024).

Ainda assim, na década de 1990, intensificou-se a expansão da cana-de-úçúcar para estes locais, sem qualquer mudança nas práticas de cultivo, acreditando-se na rusticidade desta lavoura (Cherubin *et al.*, 2016). Isso resultou na queda de produtividade e diminuição da longevidade dos canaviais, aliado à transição da colheita manual da cana acometida pelo fogo para a colheita da cana crua de forma mecanizada.

Como o estado de São Paulo era o maior produtor desta *commodity* no Brasil, esta diminuição da produtividade passou a impactar o desempenho sucroenergético brasileiro (Gouvêa *et al.*, 2009).

Portanto, as usinas exploradoras das novas áreas de cultivo passaram a procurar melhores formas de gestão para melhorar a produtividade, passando a adotar a distribuição da vinhaça com água residuária do sistema de produção canavieiro. Além disso, a prática da irrigação de salvamento passou a ser utilizada,

não sendo comum ainda a implantação de sistemas de irrigação. O custo elevado da implantação dos sistemas de irrigação e o uso de práticas arcaicas de produção, não adequadas àquela região, inviabilizavam monetariamente o plantio irrigado.

É cediço que o déficit hídrico gera reduções na produtividade dos canaviais. Contudo, as práticas sustentáveis de plantio podem favorecer o desenvolvimento da cultura canavieira. Dentre essas práticas, pode-se citar a seleção adequada de locais de volumes de recurso hídrico a ser disposto para a cultura, conforme será abordado nesta pesquisa. A irrigação é apenas um dos fatores utilizados para melhorar a produtividade e não determinante, ou seja, a equação de que a maior introdução de água no sistema produtivo aumenta sua produtividade está equivocada, além de poder causar danos ambientais por vezes irreparáveis.

Atualmente, não é comum a produção de cana-de-açúcar através de sistemas de irrigação, que difere da fertirrigação, com a distribuição de vinhaça e água residuária do sistema produtivo ou irrigação de salvamento. Esta pode ocorrer logo após a colheita com água misturada à vinhaça, visando uma melhor brotação da cana-de-açúcar nos períodos em que a estiagem se encontrar mais severa.

Os canaviais se expandiram de forma exponencial nas últimas décadas, sendo que o estado de São Paulo lidera a produção nacional, com 51% dos canaviais de todo o território nacional, localizados em grande extensão ao noroeste do estado de São Paulo (CONAB, 2024). No entanto, apesar da expansão da área agricultável na última década, a região tem enfrentado severos períodos de seca. O agravamento das crises hídricas, somado a dificuldades econômicas recentes, contribuiu para a falência de diversas usinas sucroenergéticas. Esse cenário evidencia a vulnerabilidade do setor frente às variações climáticas, ressaltando a importância de estratégias de manejo sustentável da água e de adaptação às condições climáticas, a fim de garantir a continuidade da produção sem comprometer os recursos hídricos disponíveis.

A irrigação vem demonstrando vantagens econômicas para a produção da cana-de-açúcar. Contudo, para mitigar os impactos ambientais e sociais, são necessários estudos a respeito da produção, necessidades hídricas do canavial fundamentadas em previsões a fim de minimizar a pegada hídrica da produção canavieira, aumentando a produção nacional. Até o momento, este autor não encontrou em suas pesquisas tecnologias que possam trazer a curto prazo

manutenção da produção nacional, bem como melhorar a lucratividade e competitividade da produção nacional.

Dessa forma, a produção irrigada de cana-de-açúcar pode se tornar realidade em curto período, o que exige o desenvolvimento de técnicas de controle e otimização da utilização dos recursos hídricos para permitir um cultivo sustentável dessa importante *commodity*.

2.2.1 Fertirrigação com vinhaça

O momento de aplicação da vinhaça não é calculado como forma de suprir as necessidades hídricas da cultura, reduzindo a pegada hídrica, mas sim a demanda de descarte dos resíduos oriundos da produção, por ser rica em potássio, normalmente é aplicada em abundância após o corte da planta sobre as soqueiras, numa lâmina média de 15mm ($150\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) (Embrapa, 2021).

Por vezes, falhas de gestão ou falta de infraestrutura fazem com que as usinas de cana saturem o solo com vinhaça. Essas áreas são chamadas de áreas de sacrifício, pois recebem os nutrientes da vinhaça em excesso, dificultando a produção de qualquer tipo de vegetação. Na prática, este autor já presenciou que o solo endurece e impede a percolação de água, procedimento este que já foi utilizado nas estradas rurais, principalmente de acesso a sedes de propriedades. No entanto, a legislação ambiental proibiu esta prática devido aos visíveis impactos ambientais.

A água que compõe a vinhaça é, em grande parte, oriunda da própria cana. Além disso, a indústria também utiliza recursos hídricos, normalmente captados de cursos d'água devido ao custo de captação ser inferior a outros métodos. As indústrias canavieiras costumam ter sistemas de reuso da água, procurando devolver a água captada e a da própria cana para o plantio.

2.2.2 Irrigação de salvamento

É a aplicação de água pura ou misturada com vinhaça logo após a colheita realizada em períodos secos. Não tem como principal intenção livrar a planta do déficit hídrico, mas sim permitir a brotagem, garantindo seu estabelecimento nos primeiros estágios fenológicos. Tal aplicação representa menos de 2% da demanda hídrica da cultura, não afetando diretamente a produtividade da planta (Embrapa, 2011).

2.2.3 Sistema irrigado de produção

Esse sistema promove o abastecimento da cultura naquilo que as chuvas não conseguem prover, tendo como objetivo dirimir os efeitos do déficit hídrico das plantações realizadas nos sistemas de sequeiro, ou seja, sem irrigação.

No entanto, o plantio irrigado exige acompanhamento dos períodos e volumes adequados de água a serem utilizados na cultura para evitar tanto a saturação do solo, por estar encharcado, quanto o uso inadequado da água retirada normalmente de fontes superficiais.

Para análise do volume de líquido a ser utilizado, devem ser monitorados fatores como tipo de solo, clima, previsões meteorológicas e umidade do ar devem ser analisados. Assim, entendo que este deve ser o motivo de diversos sistemas irrigados não serem sustentáveis, pois, por vezes, é feita uma análise equivocada das necessidades hídricas da planta, extrapolando o volume suportável pelo solo ou abastecendo com volumes insuficientes, o que torna a irrigação insustentável e até mesmo um desperdício de recurso hídrico.

2.3 A PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

O Brasil é o maior exportador de cana-de-açúcar do mundo, e o estado de São Paulo lidera a área plantada e o volume produzido em âmbito nacional, sendo responsável por 51% da produção brasileira (CONAB, 2024). Observa-se que a produtividade, mensurada em toneladas de cana-de-açúcar produzida por hectare (ton/ha), vem diminuindo. O Gráfico 1 apresenta, na coluna da esquerda, a produção em toneladas de cana-de-açúcar e, à direita, a área plantada, ambos multiplicados por 1.000 (mil). A produção teve sua máxima entre os anos de 2015 e 2017, demonstrando uma ligeira redução, e alcançando, em alguns momentos, valores indiretamente proporcionais ao aumento da área plantada.

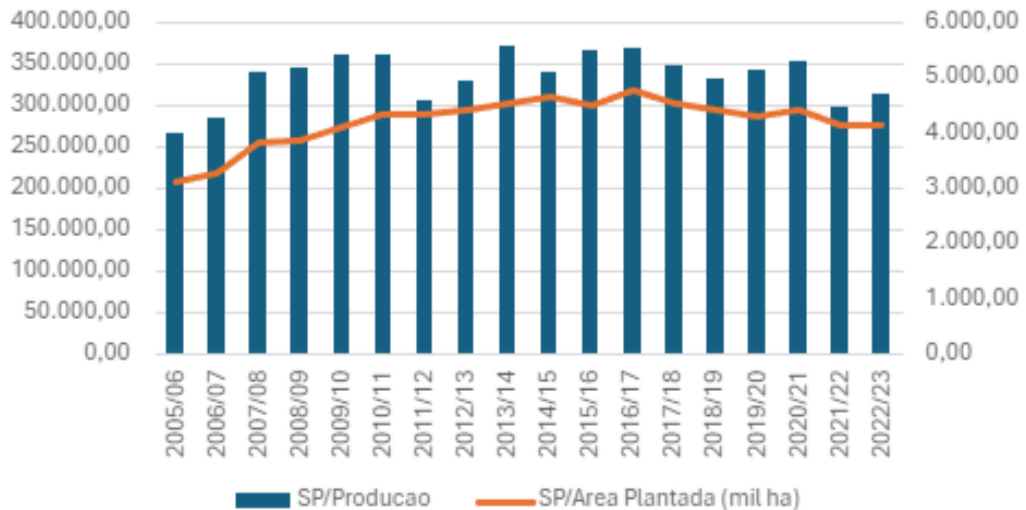


Gráfico 1 – Produção de cana-de-açúcar em relação à área de canaviais do estado de São Paulo, SP
 Fonte: Elaborado pelo autor através de dados do PAM IBGE (2024).

A produção paulista não acompanhou a área plantada em sua proporção, oscilando na quantidade de toneladas produzidas. Por vezes, a área plantada aumentou e a produção diminuiu, tendo seu pico em 2014 com uma produção superior a 350 milhões de toneladas, passando a produzir valores próximos a 300 milhões de toneladas, mesmo com um aumento da área plantada.

O Gráfico 2 apresenta a totalidade da produção nacional em detrimento da área plantada em todo o território do estado de São Paulo. É possível observar um aumento da produção de cana-de-açúcar em toneladas que, em regra, acompanha a área plantada, sem grandes diferenças, demonstrando assim uma aparente regularidade no cultivo. Além disso, a produção nacional saltou de 400 mil toneladas na safra do biênio 2005/06 para 600 mil toneladas na safra de 2022/23. Na última safra, a produtividade passou de 66ton/ha para 75ton/ha, o que indica uma melhora no sistema de produção nacional com o aumento de produção em determinada área.

A produtividade do estado de São Paulo desde a safra de 2005/2006 apresenta o valor de 84ton/ha, uma produtividade bem superior à realidade nacional da época, que era de 73ton/ha (Gráfico 3). No entanto, as últimas safras paulistas apresentaram quedas significativas, aproximando-se da produtividade nacional. A safra 2022/23 do estado de São Paulo teve uma produtividade de 75ton/ha, enquanto a produção nacional foi de 73ton/ha.

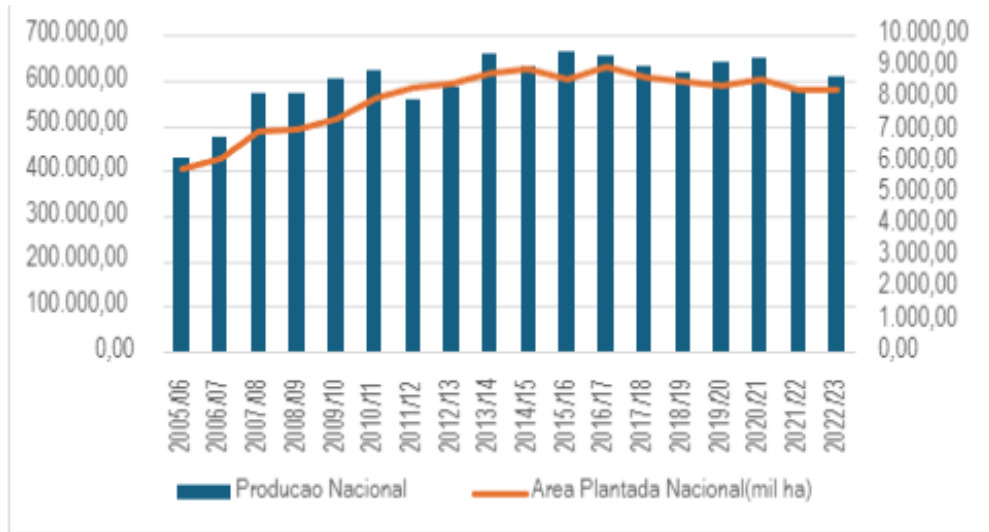


Gráfico 2 – Produção nacional de cana-de-açúcar em relação à área plantada no Brasil
 Fonte: Elaborado pelo autor através de dados do PAM IBGE(2024).

A área plantada de cana-de-açúcar aumentou em terras paulistas e nacionais. Em São Paulo, partiu de 3 milhões de hectares no ano agrícola de 2005/06 para 4,1 milhões de hectares, enquanto a área nacional, no mesmo período, passou de 5,8 milhões de hectares para 8,1 milhões de hectares.

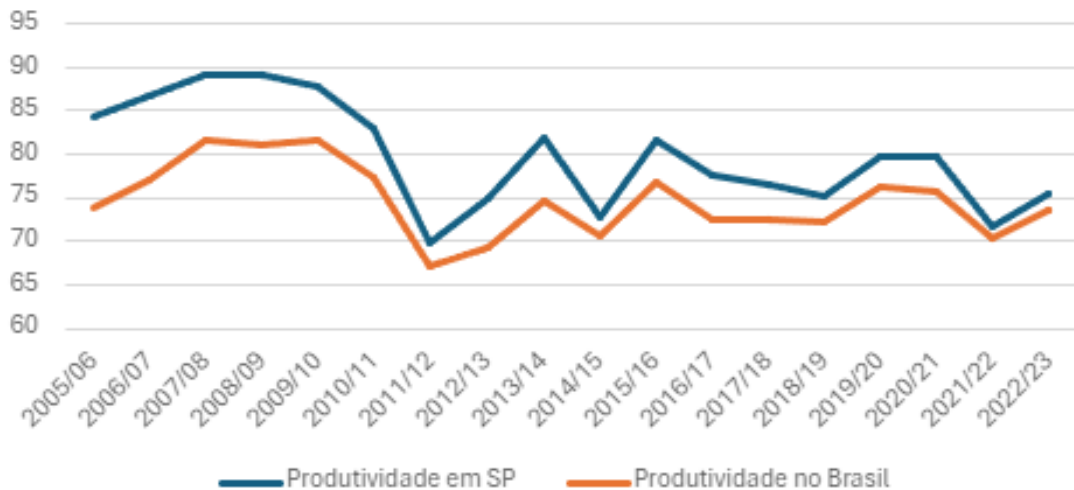


Gráfico 3 – Produção de cana-de-açúcar nacional com a produção do estado de São Paulo, SP
 Fonte: Elaborado pelo autor através de dados do PAM IBGE (2024).

Observa-se que a produtividade não acompanha o aumento da área plantada, o que pode estar relacionado a diversos fatores assim, foi realizada a análise do consumo de água dessa produção com a finalidade de propor soluções para o uso eficiente do recurso hídrico.

O Gráfico 4 mostra a evolução da área plantada e da produtividade da cana-de-açúcar em São Paulo. Entre 2005/06 e 2011/12, a área cultivada cresceu significativamente, atingindo cerca de 5 milhões de hectares, mas se estabilizou nos anos seguintes. A produtividade apresentou alta até 2010/11, seguida por uma queda acentuada, por motivos a serem estudados. Após essa redução, os índices oscilaram sem recuperar os níveis anteriores. Esses dados indicam desafios para o setor, como a necessidade de otimizar o uso da terra e dos recursos hídricos. Estratégias como melhorias na irrigação e práticas agrícolas sustentáveis são fundamentais para aumentar a eficiência produtiva.

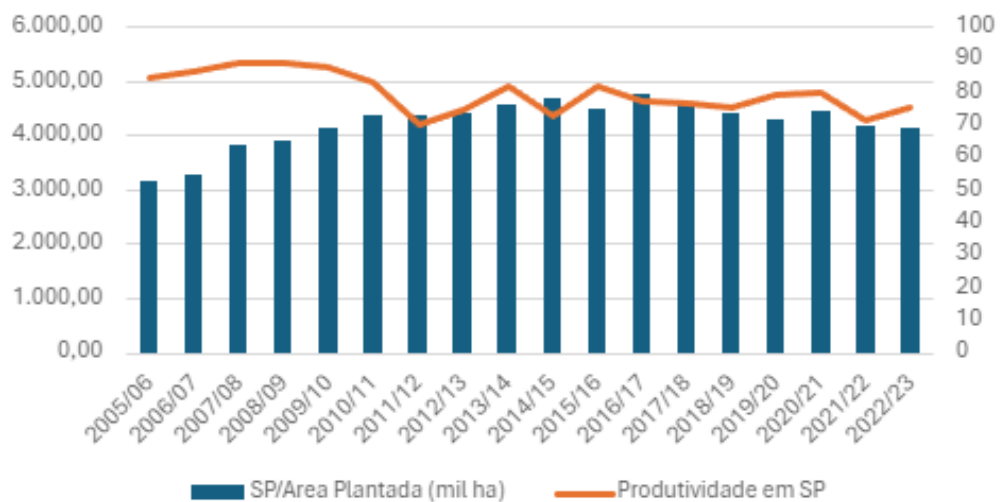


Gráfico 4 – Relação entre a área plantada e a produtividade de cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor através de dados do PAM IBGE (2024).

Da mesma forma, o Gráfico 5 mostra a evolução da área plantada e da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil. A área cultivada cresceu até 2011/12, atingindo cerca de 8,5 milhões de hectares, e depois se estabilizou em torno de 8 milhões. Esse padrão é semelhante ao de São Paulo, onde a área máxima foi de 5 milhões de hectares, representando aproximadamente 50-60% da produção nacional. A produtividade nacional seguiu tendência parecida, crescendo até 2010/11 e depois apresentando queda e estabilização entre 70 e 80 toneladas por hectare. Enquanto São Paulo teve leve redução na área plantada após 2011/12, a nacional se manteve estável, indicando que a expansão ocorreu em outras regiões. Apesar das variações, São Paulo continua sendo o principal produtor de cana no Brasil. O desafio atual é melhorar a produtividade e a eficiência no uso dos recursos naturais.



Gráfico 5 – Relação entre a área plantada e a produtividade de cana-de-açúcar no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Dessa forma, é notório que estão ocorrendo alterações na produtividade paulista e nacional, cabendo a análise sobre a sustentabilidade desta produção. Assim, a presente dissertação visa analisar a eficiência hídrica dessa produção por meio da medida da pegada hídrica de duas regiões distintas.

2.4 RELAÇÃO ENTRE CRISE HÍDRICA E SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO CANAVIEIRA

A intensificação da crise hídrica nas últimas décadas é resultado de fatores climáticos, como a variabilidade das chuvas e o aumento das temperaturas médias, mas também de práticas antrópicas inadequadas de uso e ocupação do solo, além da gestão ineficiente dos recursos hídricos. Em regiões de sequeiro, como o noroeste do estado de São Paulo, esse quadro é particularmente crítico, uma vez que a expansão agrícola, especialmente da cana-de-açúcar, tem ocorrido em áreas com baixa disponibilidade hídrica.

A sustentabilidade da produção agroindustrial depende diretamente do equilíbrio entre viabilidade econômica, conservação ambiental e equidade social. Nesse sentido, a água ocupa posição central, pois além de ser um insumo essencial para os processos fisiológicos da planta, sua disponibilidade condiciona o desempenho produtivo das lavouras. Em cenários de restrição hídrica, a compreensão

da demanda real de água pelas culturas se torna uma necessidade estratégica para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas adequadas.

Diante disso, a pegada hídrica surge como uma importante ferramenta metodológica para mensurar o volume total de água doce consumido ao longo do ciclo produtivo de uma determinada cultura. Desenvolvida por Hoekstra et al. (2011), essa métrica se divide em três componentes: água verde, correspondente à umidade natural do solo proveniente da precipitação; água azul, referente à água superficial ou subterrânea utilizada no processo produtivo; e água cinza, que representa o volume necessário para diluir os poluentes gerados até níveis aceitáveis.

No contexto da presente pesquisa, a pegada hídrica é empregada não com o intuito de avaliar a eficiência de sistemas irrigados, mas sim de quantificar o consumo hídrico real da cana-de-açúcar em condições de sequeiro, respeitando as características naturais de solo e clima de cada localidade. Essa abordagem permite compreender como fatores como o tipo de solo e o tempo de uso agrícola influenciam a demanda hídrica da cultura, oferecendo uma base empírica para análises de sustentabilidade.

A relação entre crise hídrica e produção canavieira, portanto, não deve ser abordada apenas sob a ótica da mitigação via irrigação — cuja adoção, em muitos casos, pode agravar a competição pelo uso da água. Ao contrário, é necessário identificar sistemas produtivos mais adequados às condições naturais, valorizando práticas agrícolas sustentáveis e estratégias de manejo hídrico que respeitem os limites ecológicos do território (Silva et al., 2020).

Nesse sentido, mensurar a pegada hídrica da cana-de-açúcar em diferentes contextos edafoclimáticos, como proposto neste estudo, contribui diretamente para a construção de uma agricultura mais resiliente e adaptada às mudanças climáticas, promovendo uma ocupação do solo mais racional e compatível com a sustentabilidade hídrica regional.

2.5 LIMITAÇÕES E DESAFIOS DA CANA-DE-AÇUCAR DE SEQUEIRO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O presente estudo não tem como objetivo central aprofundar-se na economia aplicada à produção agrícola, mas sim analisar as limitações e os desafios

enfrentados pela cultura da cana-de-açúcar em regime de sequeiro, especialmente diante dos cenários de mudanças climáticas. Embora a literatura aponte que a irrigação, quando bem manejada e associada a boas práticas agrícolas, possa aumentar significativamente a produtividade e a longevidade das soqueiras, o foco deste trabalho é compreender os impactos da escassez hídrica sobre os sistemas não irrigados, que ainda representam a maior parte da produção canavieira no estado de São Paulo.

A redução da produtividade em razão da limitação hídrica acarreta uma série de implicações socioeconômicas, como a necessidade de expansão territorial para compensação de perdas, o aumento da pressão sobre arrendamentos de terras e a ampliação de áreas cultivadas em regiões distantes das usinas. Essas práticas intensificam o uso da terra, aumentam os custos logísticos e reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas a um zoneamento agroambiental adequado, capaz de considerar o consumo hídrico da cultura em correlação com a aptidão edafoclimática das regiões produtoras — instrumento que ainda é inexistente no estado de São Paulo.

Monteiro (2012), em sua pesquisa, observou que, a cada 100 mm de déficit hídrico, há uma perda estimada de 11,2 toneladas de cana-de-açúcar por hectare. O autor propôs três cenários comparativos — com suplementação de 100%, 50% e 20% da demanda hídrica —, revelando o impacto direto da limitação de água sobre a produtividade. De modo semelhante, Licks (2020) realizou simulações nas regiões de Araçatuba e Piracicaba, nas quais comparou a produtividade atingível (obtida em regime de sequeiro) com a produtividade potencial (associada à irrigação plena). O estudo concluiu que apenas a irrigação com suprimento total do déficit hídrico apresentou viabilidade econômica, enquanto os cenários com irrigação parcial (50%) mostraram retornos negativos. Em alguns casos, como em duas safras de Araçatuba e uma de Piracicaba, os produtores não estariam sequer dispostos a pagar pelo uso da água, evidenciado pelos preços-sombra negativos. Tais resultados reforçam a elevada vulnerabilidade da cultura da cana-de-açúcar ao estresse hídrico, indicando que, sem planejamento territorial e estratégias adaptativas frente às mudanças climáticas, a sustentabilidade da produção em regime de sequeiro estará cada vez mais comprometida.

2.6 PEGADA HÍDRICA

A manutenção da qualidade de vida humana exige a utilização de grande quantidade de água, sendo esta empregada em maior escala na atividade agrícola para a produção de energia e alimentos, em geral. Ao se analisar o consumo de recursos hídricos, observa-se a demanda por água, bem como a poluição advinda das diversas atividades humanas, deixando-se de lado a estrutura econômica global a qual, por vezes, não dá a devida importância à economia deste recurso, com processos que ultrapassam os limites da sustentabilidade hídrica. Como exemplo, pode-se citar a não cobrança pelo uso de recursos hídricos na agricultura do estado de São Paulo (SigRH, 2023).

Assim, uma cadeia de produção inadequada compromete o volume de recurso hídrico disponível para atender às necessidades da presente e futuras gerações. Dessa forma, o estudo de seu uso pode ajudar na análise dos efeitos do consumo de água, bem como a sustentabilidade de determinado meio de produção (Pereira, 2022).

Para isso, a pegada hídrica considera não apenas a água utilizada pelo consumidor ou pelo produtor, mas sim todo o volume utilizado na produção. A produção agrícola não considera apenas a captação de água, mas sim tudo aquilo que determinada cultura exige para sua produção, podendo assim ser mensurada sua produtividade, indicando locais e condições edafoclimáticas mais adequadas para sua produção.

Segundo Hoekstra e Van Den Bergh (2002), a pegada hídrica é categorizada em três níveis – azul, verde e cinza –, sendo que:

- A pegada hídrica azul (PHa) representa o volume de água superficial (rios, lagos, lagoas, represas, etc.) e subterrânea utilizada no processo de produção, principalmente através da irrigação, calculado da seguinte forma:

$$PH_{azul} = C_{azul} / Y$$

Onde:

C_{azul} = demanda hídrica azul da cultura (m^3/ha);

Y = produtividade da cultura (t/ha).

- A pegada hídrica verde (PHv) é a água proveniente da chuva e aproveitada pela cultura;

$$PH_{verde} = C_{verde} / Y$$

Onde:

C_{verde} = demanda hídrica verde da cultura (m^3/ha);

Y = produtividade da cultura (t/ha).

- A pegada hídrica cinza (PHc) é o volume de água necessário para diluir os poluentes gerados durante o cultivo agrícola até que as concentrações atinjam níveis aceitáveis pelos padrões de qualidade da água.

$$PH_{cinza} = [L / (C_{max} - C_{nat})] / Y$$

Onde:

- L = carga do poluente (kg/ha), geralmente associada à aplicação de fertilizantes nitrogenados (ex: nitrato – NO_3^-);
- C_{max} = concentração máxima aceitável do poluente na água (mg/L), conforme legislação ambiental (ex: CONAMA n.º 357/2005);
- C_{nat} = concentração natural do poluente no corpo d'água (mg/L);
- Y = produtividade da cultura (t/ha).

A análise integrada desses três componentes permite uma avaliação mais ampla da sustentabilidade hídrica da agricultura. Enquanto a PH verde aponta para a eficiência no aproveitamento da água da chuva, a PH azul alerta sobre possíveis conflitos de uso em regiões com escassez hídrica, e a PH cinza revela os impactos ambientais

associados à poluição difusa oriunda do manejo agrícola. Considerar esses aspectos é essencial para a formulação de estratégias de manejo mais eficientes e para a promoção de políticas públicas voltadas à produção sustentável.

De acordo com Chapagain e Hoekstra (2008), a pegada hídrica é semelhante ao conteúdo de água virtual do produto. No entanto, a pegada hídrica é multidimensional, aferindo também o tipo de água utilizada (azul, verde e cinza), enquanto a água virtual ou incorporada refere-se somente ao volume total de água utilizada para a produção daquela *commodity*.

Dessa forma, ao se referir à proteção de recursos hídricos, é necessário saber o volume de água utilizado para atender determinada necessidade humana, com o intuito de analisar a sustentabilidade daquela cadeia econômica, verificando também a quantidade de água exportada. Assim, um lugar que já sofre com crise hídrica deve moderar a exportação de água virtual, dando prioridade para a sua importação, ou seja, adquirindo produtos que consomem muita água para a produção a fim de preservar seus estoques de água.

Em outras palavras, o conhecimento de dados e conceitos de pegada hídrica e água virtual permitem conhecer o balanço hídrico de determinada região. O balanço de água virtual é definido como a importação líquida de água virtual menos sua exportação (Hoekstra; Chapagain; Aladaya, 2011). Dessa forma, é possível estimar o volume de água que deixa determinada bacia hidrográfica.

Um balanço positivo de água virtual representa a importação de água que o local está economizando recurso adquirido de outros lugares, e não gastando seus próprios recursos. Por sua vez, a exportação representa que está ocorrendo um déficit hídrico daquela área, demonstrando que as pessoas vivem da produção daquela região, ou seja, consumindo ainda mais seus próprios recursos.

Conforme o exposto sobre o balanço de água virtual, quando um país comercializa *commodities* que fazem uso intensivo de água, ele comercializa também água na forma virtual. Assim, por ser uma área com escassez hídrica, pois possui menos deste “capital”, por vezes se torna vantajoso importar produtos com valores altos de pegada hídrica, enquanto uma área com abundância é capaz de vender recurso hídrico de forma virtual em suas exportações com menos impacto.

2.6.1 Software CROPWAT 8.0

Para o cálculo da pegada hídrica, foi utilizado o software CROPWAT 8.0, desenvolvido pela FAO, que calcula a evapotranspiração verde e azul no desenvolvimento de diversas culturas agrícolas. Para este cálculo, é necessária a inserção de dados relativos ao solo, ao clima e ao cultivo. Neste trabalho, o cálculo foi realizado através do “calendário de irrigação”, que estima a evapotranspiração durante todo o período de crescimento, sob condições ideais e não ideais. Outra metodologia disponível no software é a “demanda hídrica da cultura (DHC), menos precisa, que considera o plantio sob condições ideais.

O CROPWAT 8.0 é utilizado para o cálculo da evapotranspiração de referência, baseado no método Penman-Monteith, recomendado pela FAO (Allen *et al.*, 1998). O método utiliza dados mensais de temperatura, umidade, velocidade do vento e insolação, e também pode ser utilizado para o planejamento de irrigação, pois retorna a quantidade de água a ser inserida naquela cultura para as diferentes exposições climáticas.

São diversos os dados utilizados pelo software, desde aspectos climatológicos até características da cultura a ser estudada, conforme exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados utilizados pelo software CROPWAT 8.0

Dado	Variável
Clima	Temperatura máxima e mínima (°C) Umidade relativa (%) Velocidade do vento (m/s) Insolação (horas) Precipitação (mm)
Cultura	Data de plantio Coeficiente de cultura (kc) Duração dos estágios de crescimento (dias) Profundidade da raiz (m) Índice de esgotamento Fator de resposta Altura de crescimento (m)
Solo	Capacidade de água disponível (mm/m) Taxa máxima de infiltração (mm/dia) Profundidade máxima da raiz (cm)

	Depleção inicial da umidade do solo (%)
Irrigação	Início do plantio Eficiência de irrigação (%) Momento (quando atinge o índice de depleção crítico) Forma de aplicação (umedecer até a capacidade de campo)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Em que pese tratar-se de modelo robusto para aferição da Pegada Hídrica o software também possui limitações por basear-se em um modelo **simplificado de balanço hídrico**, considerando a evapotranspiração potencial e efetiva a partir de métodos empíricos, como a equação de Penman-Monteith, acima citada. Esse tipo de abordagem assume, por exemplo, que o solo possui capacidade uniforme de retenção de água e que o suprimento hídrico é distribuído de forma homogênea, o que **pode não refletir as complexidades reais dos sistemas agrícolas**, especialmente em regiões com solos heterogêneos, como os latossolos e argissolos encontrados no noroeste paulista.

Além disso, o modelo não considera com profundidade aspectos como interações planta-solo-atmosfera dinâmicas, variações na profundidade efetiva do sistema radicular, nem tampouco a recarga hídrica subterrânea, limitando sua precisão em análises mais avançadas de sustentabilidade hídrica.

Outra limitação significativa é a dependência de dados climáticos e agronômicos de alta qualidade, como temperatura, precipitação, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, além de coeficientes culturais específicos (Kc). Em muitos municípios brasileiros, os dados climáticos disponíveis são esparsos ou apresentam lacunas temporais, o que compromete a fidedignidade dos resultados e exige interpolações ou o uso de médias regionais, o que pode aumentar a margem de erro nas estimativas de consumo hídrico.

Por fim, o CROPWAT não avalia de forma direta a pegada hídrica cinza, nem considera impactos ambientais decorrentes do uso de agroquímicos ou das práticas de manejo do solo, aspectos fundamentais para uma análise mais holística da sustentabilidade da produção agrícola.

2.6.2 Dados utilizados

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados dados meteorológicos disponibilizados pelo Portal Agroambiental do Estado de São Paulo, o qual reúne séries históricas de temperatura, precipitação, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento provenientes de estações do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado. Esses dados foram empregados para estimativas de evapotranspiração e balanço hídrico no software CROPWAT 8.0.

As informações sobre produtividade agrícola foram obtidas junto à Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a qual apresenta dados anuais de produção, área plantada e rendimento médio por município. Os valores foram utilizados para o cálculo da pegada hídrica relativa (m^3/t), conforme metodologia proposta por Hoekstra et al. (2011).

O estudo considerou o cultivo da cana-de-açúcar de ciclo anual, predominante na região, com base em um período de 12 meses consecutivos de dados meteorológicos, compatíveis com a fenologia da cultura. A adoção deste ciclo permite alinhar os dados climáticos à realidade do manejo agrícola praticado nos municípios analisados, garantindo maior precisão nos resultados simulados.

2.7 PEDOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO

Dentre as diversas classes de solo existentes, o latossolo e o argissolo são predominantes no estado de São Paulo, conforme ilustra a Figura 8. Da mesma forma, é possível verificar que o plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo possui sua maior extensão sobre o latossolo.

Os argissolos (Figura 9) constituem o grupamento de solos com B textural, com argila conjugada com baixa saturação por bases ou com caráter alumínico. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, normalmente com coloração avermelhada. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B, caracterizado pelo aumento de argila do A para o B, conforme descrito no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018).

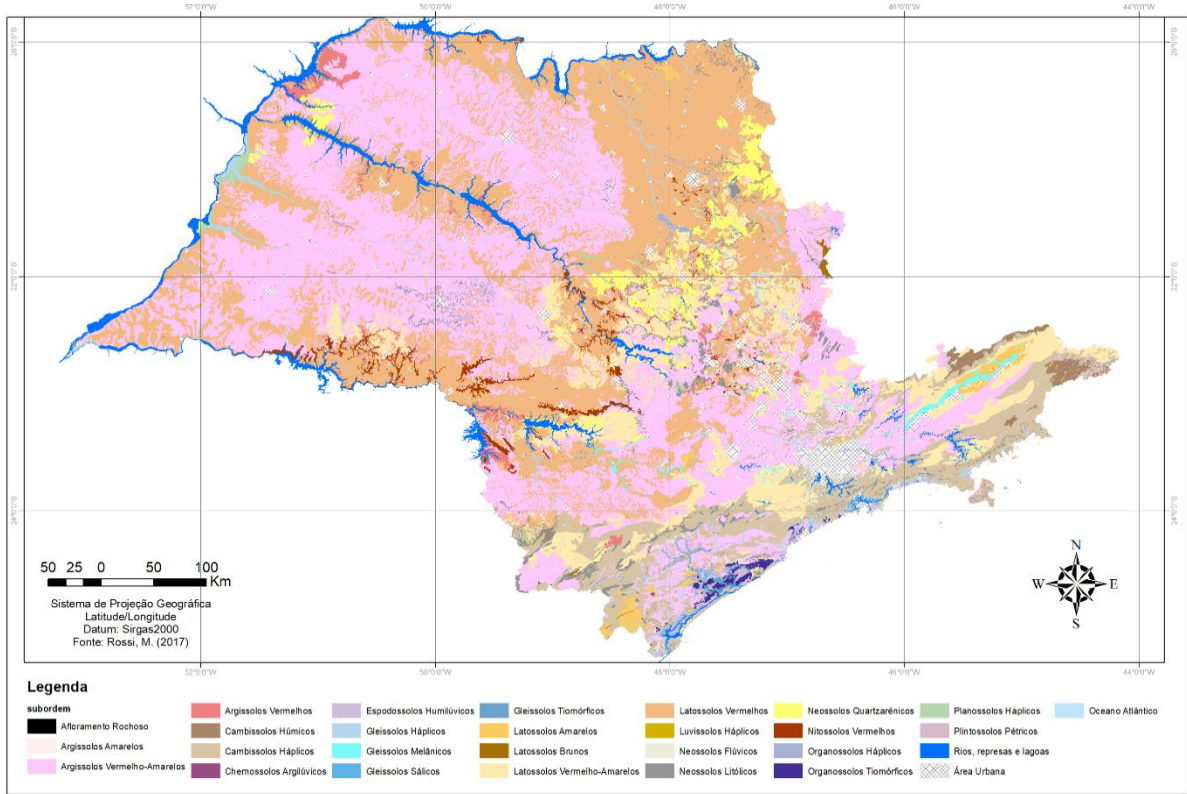


Figura 7 – Pedologia do estado de São Paulo

Fonte: adaptado pelo autor (2024).

Figura 8 – Perfil de um solo argissolo



Fonte: Embrapa (2017a).

Quanto aos latossolos (Figura 10), são solos constituídos por material mineral, com um horizonte B latossólico precedido por qualquer tipo de horizonte A. De acordo com SiBCS (2018), são solos em estágio avançado de intemperização, profundos e bem drenados, resultado de intensas transformações no material constitutivo. Podem variar em cores, podendo ser Bruno, amarelo e/ou vermelhos.

Figura 9 – Perfil de um solo latossolo



Fonte: Embrapa (2017b).

Segundo a Embrapa (2017a), os argissolos apresentam problemas de baixa fertilidade e são suscetíveis a processos erosivos, devido à sua composição textural. Existem variações de infiltração, sendo mais suaves ou mais densos, o que afeta a infiltração de água. Portanto, requerem um manejo adequado para evitar erosões, sendo desaconselhável a prática de culturas que exijam o desnudamento do solo. Em relação aos latossolos, são adequados para culturas anuais, pois são profundos e bem permeáveis, mesmo quando apresentam elevado teor de argila, proporcionando um ambiente adequado para diversas culturas agrícolas (Embrapa, 2017b).

Além disso, os diversos tipos de solos existentes no Brasil são classificados de acordo com o SiBCS (2018), com base na divisão em horizontes (camadas) que possuem diferentes atributos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos. A textura do solo tem uma influência direta na capacidade de retenção de drenagem da água, o que é fundamental para determinar a aptidão do solo para diferentes atividades agrícolas (Salazar *et al.*, 2019). Embora a textura seja uma característica importante na identificação e classificação do solo, atualmente, os sistemas de manejo do solo têm sido desenvolvidos de forma a tornar os solos produtivos independentemente da sua textura (Centeno *et al.*, 2017).

2.8 CONSEQUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Dentre as vantagens, o plantio de forma sustentável pode trazer resultados substanciais em curto e médio prazo na lucratividade e competitividade no mercado brasileiro, pois resulta no aumento da produtividade em ton ha⁻¹ e da longevidade do canavial, diminuindo o número de reformas a serem utilizadas.

O aumento da longevidade do canavial e da produtividade diminui o tamanho das áreas necessárias para atingir a capacidade máxima de moagem das usinas, impactando inclusive no preço dos arrendamentos e comércio de terras, já que, por consequência, há a redução da competitividade pelas áreas agricultáveis. Esse efeito de economia de áreas impacta também na sustentabilidade ambiental da usina, diminuindo a pressão exercida sobre a vegetação nativa, e facilita a coexistência com outras culturas agrícolas como pastagem para pecuária, grãos e outros. Além disso, pode redundar em créditos de carbono ao empreendedor.

A prática sustentável diminui também custos com transbordo, colheita e transporte, visto que não serão necessários canaviais distantes da unidade da usina para atender as metas do setor, bem como o número de incêndios a canaviais, pois será mais fácil monitorar os canaviais, inibindo as práticas incendiárias.

Outra questão que vem impactando o estado de São Paulo é que a produção está se expandindo para o Centro-Oeste do país devido ao preço das terras em São Paulo. Com isso, os canaviais estão se direcionando ao sul de Minas Gerais e Goiás.

2.9 PROJEÇÕES FUTURAS PARA O CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

As projeções sobre o futuro da produção canavieira no Brasil indicam um cenário de crescimento sustentado, impulsionado pela demanda crescente por biocombustíveis, especialmente o etanol, e pelo fortalecimento de políticas públicas como o Programa Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio. Segundo Branco et al. (2019), a estimativa é de que, até 2028, o país necessite de um acréscimo de aproximadamente 151 mil hectares de áreas cultivadas com cana-de-açúcar para suprir a demanda projetada por etanol. Isso poderá ocorrer por meio da expansão de áreas agrícolas já consolidadas e da reativação de usinas atualmente desativadas, principalmente no Centro-Sul do Brasil.

Nesse contexto, o modelo atual de expansão prevê o aumento de até 30% da área plantada, utilizando menos de 6% da área autorizada no Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (Lei nº 6.077/2009). Tal zoneamento foi criado com o objetivo de evitar o avanço do cultivo sobre áreas sensíveis do ponto de vista ambiental, como o bioma Amazônia e áreas com cobertura de vegetação nativa preservada, além de racionalizar o uso dos recursos naturais. A legislação também busca incentivar o aproveitamento de pastagens degradadas como forma de conter o desmatamento indireto.

Adicionalmente, a interiorização da produção canavieira deve se intensificar nos próximos anos, com destaque para estados como Mato Grosso, Bahia, Maranhão e Tocantins, que juntos poderão concentrar até 46% das futuras unidades de produção sucroenergética. A expansão da malha ferroviária brasileira, atualmente em desenvolvimento, também tende a reduzir os custos de transporte e permitir a viabilidade econômica de usinas em regiões anteriormente menos atrativas devido à distância dos centros consumidores e portos exportadores (Branco et al., 2019).

Contudo, apesar do cenário promissor, diversos estudos demonstram que as projeções mais otimistas desconsideram elementos cruciais, como os impactos das mudanças climáticas, a escassez hídrica regionalizada e a pressão crescente por sustentabilidade ambiental. Estudos como os de Ferreira et al. (2021) e Marin et al. (2013), que utilizam modelos agroclimáticos como o DSSAT/CANEGRO, projetam cenários futuros com significativa redução na produtividade da cana em regiões dependentes da chuva, caso medidas de adaptação não sejam adotadas. De forma semelhante, Aparecido et al. (2021) introduzem o conceito de eficiência climática para mostrar que apenas cerca de 24% do território paulista apresenta condições ideais para a cultura sem irrigação, indicando elevada vulnerabilidade de regiões como o noroeste do estado.

Além disso, revisões sistemáticas (Frontiers in Agronomy, 2024) apontam que o aumento das temperaturas médias e a maior frequência de eventos extremos deverão favorecer a proliferação de pragas e doenças que impactam diretamente a produtividade e a necessidade de insumos, o que, por consequência, aumenta a pegada hídrica cinza – aspecto ainda pouco explorado pela maioria das projeções econômicas.

A disputa pelo uso da água representa outro entrave ao crescimento sustentável da cultura. A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) prioriza, em situação de escassez, o uso para consumo humano e dessedentação de animais, o que poderá restringir a irrigação agrícola em determinados períodos. Ainda que os sistemas irrigados sejam frequentemente apontados como alternativa para mitigar perdas de produtividade, seu uso irrestrito levanta preocupações ambientais e legais, além de representar um alto custo energético e logístico, sobretudo em áreas com baixa disponibilidade hídrica (Ferrarini, 2022).

Apesar da relevância desses desafios, observa-se que grande parte da literatura técnica continua a propor soluções com base em irrigação suplementar, desconsiderando a diversidade de condições edafoclimáticas, a variabilidade dos sistemas produtivos e o histórico de uso da terra. Nesse sentido, há uma lacuna expressiva de estudos que analisem, de forma empírica e localizada, o consumo hídrico real da cana-de-açúcar em regime de sequeiro, especialmente em municípios com características edafoclimáticas distintas.

Diante desse contexto, a presente pesquisa busca preencher parte dessa lacuna ao analisar a pegada hídrica verde e azul da cana-de-açúcar em dois

municípios do noroeste paulista: Jales, com predominância de argissolos e tempo de cultivo inferior a 10 anos, e Ituverava, com latossolos e histórico de cultivo superior a 30 anos. A escolha por calcular os componentes verde e azul da pegada hídrica, conforme a metodologia de Hoekstra et al. (2011), permite mensurar o volume total de água da chuva efetivamente utilizada (verde) e a dependência de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos (azul), fornecendo um indicador robusto para avaliação da sustentabilidade hídrica.

Enquanto parte da literatura se apoia em estimativas genéricas ou simulações em escala nacional, esta pesquisa contribui com uma abordagem empírica e espacialmente refinada, subsidiando políticas públicas de zoneamento agrícola, concessão de outorgas e gestão estratégica da produção agroindustrial em um cenário de escassez hídrica crescente. A adoção de uma perspectiva que considera a sustentabilidade em termos de uso eficiente da água disponível no solo, sem incentivo à expansão da irrigação, representa uma inovação metodológica e política, em sintonia com os princípios da produção agroambiental responsável.

Assim, a originalidade deste trabalho reside na integração entre sustentabilidade hídrica, análise territorial e diferenciação edafoclimática, com base em indicadores aplicáveis a outros contextos produtivos. A identificação de disparidades entre as demandas hídricas dos dois municípios analisados possibilita a proposição de estratégias de manejo específicas e baseadas em evidências, promovendo uma transição rumo a uma produção canavieira resiliente e equilibrada com os recursos hídricos disponíveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com a classificação de Köppen, o clima do noroeste paulista é considerado mesotérmico de verão quente (Cwa), com precipitação anual variando entre 1.100 e 1.700mm, e temperaturas superiores a 22°C e mínimas inferiores a 18°C. O relevo é classificado como suavemente ondulado e ondulado (Pissarra;

Politano; Ferraudo, 2004). Os principais tipos de solo são o argissolo e o latossolo, conforme mapa pedológico do estado de São Paulo (Figura 8).

A pesquisa foi conduzida em dois municípios do estado de São Paulo (Figura 11), localizados em diferentes bacias hidrográficas: a dos Rios Turvo e Grande (UGRHI 15) e São José dos Dourados (UGRHI 18). O município selecionado na UGRHI 15 foi Ituverava, caracterizado por uma intensa produção de cana-de-açúcar, com predominância de canaviais e solo latossolo. Já o município escolhido na UGRHI 18 foi Jales, onde os canaviais estão em expansão, predominando o solo argissolo. Para o processamento dos dados, foi utilizado o software ArcGis 10.5, utilizando-se o Sistema de Projeção Geográfica (Lat/Long) e Datum SIRGAS2000. A análise do uso do solo foi obtida utilizando a base de dados elaborada pelo Projeto MapBiomass, o qual visa mapear as mudanças na cobertura e uso da terra no Brasil ao longo do tempo.

Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ituverava tem uma população de aproximadamente 37mil habitantes e uma densidade demográfica de 53hab/km². Está localizada na mesorregião de Ribeirão Preto, com a presença dos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Quanto à sua pedologia, apresenta predominância de latossolo com textura argilosa (IBGE, 2023a).

O município de Jales conta com aproximadamente 49 mil habitantes e densidade demográfica de 132hab/km². Está localizado na mesorregião de São José do Rio Preto, inserido completamente no bioma Mata Atlântica. Quanto à sua pedologia, possui grande parte de seu território com solo do tipo argissolo, com textura arenosa/média (IBGE, 2023b).

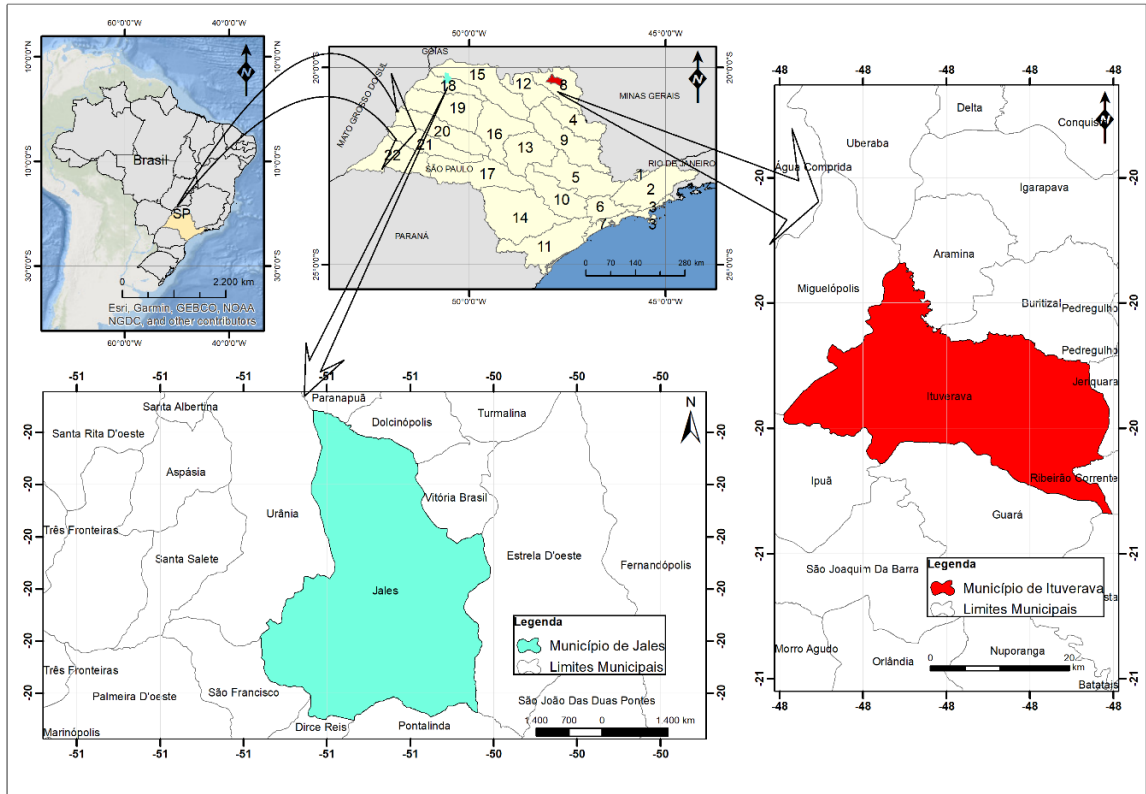


Figura 10 – Localização da área de estudo no noroeste do estado de São Paulo

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

3.2 METODOLOGIA

As bases de dados primários foram obtidas de bancos de dados do grupo de pesquisa. Essas informações incluem características do meio físico e biológico.

Os dados referentes ao uso e cobertura do solo foram elaborados a partir da coleção de mapas do MapBiomas, referentes aos anos de 2000 e 2021. Os planos de informações foram disponibilizados em formato matricial e convertidos para vetores no software ArcGIS 10.5.

Os arquivos vetoriais passaram por correções, com a alteração dos rótulos das classes de uso e cobertura do solo originais, alinhando-os com o propósito do trabalho. Assim, foram elaborados bancos de dados com a dinâmica temporal da distribuição espacial da cana-de-açúcar.

A base de dados sobre a pedologia das áreas de estudo foi obtida a partir dos estudos realizados por Rossi (2017), representados na figura 8, os quais foram reclassificados de acordo com as características dos materiais que indicam solos mais ou menos propícios ao cultivo da cana-de-açúcar na área de estudo.

O cálculo da pegada hídrica foi realizado com base na metodologia proposta por Hoekstra, Chapagain e Aladaya (2011), método adotado pela FAO da ONU. Neste método, a pegada hídrica corresponde à soma das pegadas hídricas verde, azul e cinza, buscando estimar o uso de água para o cultivo.

$$PH_{cultura} = PH_{cultura/verde} + PH_{cultura/azul} + PH_{cultura/cinza}$$

Para esta análise, foram selecionadas as últimas 5 safras com o objetivo de verificar a consistência no consumo de água nas regiões propostas para o estudo. Destaca-se que a pegada hídrica verde representa a quantidade de água proveniente de precipitações que a cultura consome. A pegada hídrica azul representa a quantidade de água superficial/subterrânea que a cultura utilizou, sendo essa a quantidade de água necessária para a irrigação a fim de atingir o máximo potencial de produção. Já a pegada hídrica cinza representa a quantidade de água necessária para assimilar os efluentes emitidos pelo cultivo (Hoekstra; Chapagain; Aladaya, 2011).

Para calcular a evapotranspiração verde e azul da cana-de-açúcar, foi utilizado o software livre CROPWAT 8.0 da FAO. Esse software utiliza uma série de parâmetros

climáticos, incluindo dados meteorológicos de precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade do ar e velocidade dos ventos. Como o trabalho envolveu o cálculo da pegada hídrica por safra, foram utilizadas as médias mensais desses atributos.

Os dados meteorológicos foram extraídos do Portal Agrometeorológico e Hidrológico do estado de São Paulo, por meio da base de dados própria. A exceção foi a velocidade do vento, obtida pelo portal do Instituto Nacional de Meteorologia (CIIAGRO, 2023).

Portanto, para calcular a pegada hídrica, foi necessário dividir a produtividade pela demanda hídrica da cultura. A produtividade é entendida como a razão entre as toneladas produzidas e a área plantada. Esses dados foram coletados pelo IBGE por meio da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), que visa fornecer informações sobre a produção agrícola nos municípios brasileiros.

Para a análise das mudanças climáticas e seus impactos na agricultura em especial na cultura da cana-de-açúcar localizadas nos municípios de Jales e Ituverava, foi adotado três etapas principais: coleta de dados climáticos e ambientais, análise de indicadores agroclimáticos e avaliação dos impactos sobre a produção agrícola.

Foram utilizados dados de fontes confiáveis e reconhecidas nacional e internacionalmente, tais como:

Os dados climáticos, foram adquiridos no portal Meteoblue, que fornece séries históricas sobre temperatura, precipitação e eventos climáticos extremos. Também foram consultados relatórios do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Para a mensuração das emissões de gases de efeito estufa (GEE), foram realizadas pesquisas e extração de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), com foco nas emissões provenientes da agropecuária.

Para a caracterização e identificação das práticas agrícolas empregadas no cultivo da cana-de-açúcar e suas demandas hídricas foram utilizadas informações da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e do Instituto de Economia Agrícola (IEA-SP).

Para a descrever os cenários de aquecimento global e suas implicações para agricultura no Brasil em especial para a área de estudos foi utilizado o estudo realizado por Marengo et al. (2020) e Nobre et al. (2004).

Para elaborar a proposta de gestão eficiente dos recursos hídricos, foram consideradas as particularidades dos solos de Jales e Ituverava, além da pegada hídrica, que é influenciada por fatores como temperatura e volume de chuvas.

3.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA PRODUTIVIDADE E PRECIPITAÇÃO

Nesta pesquisa, optou-se pela utilização da análise estatística exploratória como estratégia metodológica inicial, devido à natureza descritiva dos dados e ao objetivo de identificar padrões entre produtividade da cana-de-açúcar e volume de chuvas em dois municípios do noroeste paulista. Essa abordagem é adequada quando se busca compreender tendências e variabilidade em séries temporais curtas, como é o caso das cinco safras analisadas. A escolha por não aplicar testes paramétricos ou inferenciais nesta etapa justifica-se pela limitação do número de observações, o que comprometeria a robustez de análises baseadas em hipóteses estatísticas formais.

A Tabela 4 e o primeiro gráfico mostram que, no município de Ituverava, a produtividade apresentou uma queda acentuada nas safras de 2020/21 e 2021/22, reduzindo-se de 85 ton/ha para 60 e 58 ton/ha, respectivamente. Já em Jales, os dados da Tabela 5 indicam estabilidade da produtividade, mantendo-se em 90 ton/ha ao longo de todas as safras observadas. Quando comparadas com os dados de precipitação da Tabela 6, nota-se que Ituverava sofreu maior oscilação nos volumes de chuvas, com um mínimo de 999,3 mm em 2020/21, enquanto Jales apresentou uma estiagem mais severa nesse mesmo período, com apenas 523 mm.

Apesar disso, Jales manteve sua produtividade estável, o que pode indicar maior resiliência das lavouras locais — possivelmente devido a fatores como práticas agrícolas mais eficientes, tipo de solo (argissolos), menor tempo de cultivo, ou mesmo menores perdas por evapotranspiração. Em contraste, Ituverava, mesmo com maior volume acumulado de chuva na maioria dos anos, apresentou queda significativa de produtividade, sugerindo maior vulnerabilidade às oscilações climáticas, especialmente em contextos de escassez hídrica.

Esses resultados possuem grande relevância prática para a gestão hídrica e o planejamento agrícola. A análise indica que, além do volume absoluto de precipitação, a eficiência no uso da água, o tipo de solo e o histórico de cultivo influenciam diretamente na sustentabilidade da produção canavieira. Tais achados reforçam a importância de estratégias de zoneamento agroambiental que levem em consideração variáveis edafoclimáticas e socioeconômicas locais, bem como a necessidade de diversificar os indicadores de desempenho agrícola para além da simples produtividade ou volume de chuvas.

Assim, esta análise exploratória oferece evidências preliminares que sustentam a proposta de mensuração da pegada hídrica como ferramenta mais precisa para avaliar a demanda real de água pelas lavouras e sua sustentabilidade em longo prazo. A próxima etapa da pesquisa aprofundará a análise com base na metodologia de Hoekstra et al. (2011), incorporando os componentes verde e cinza da pegada hídrica, com vistas a consolidar um diagnóstico ambiental mais robusto da produção de cana-de-açúcar na região estudada

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as classes pedológicas, o município de Ituverava está coberto por quatro tipos de solo (Figura 12 e Tabela 2), onde mais de 85% da área do município é ocupada pelo latossolo vermelho de textura argilosa.

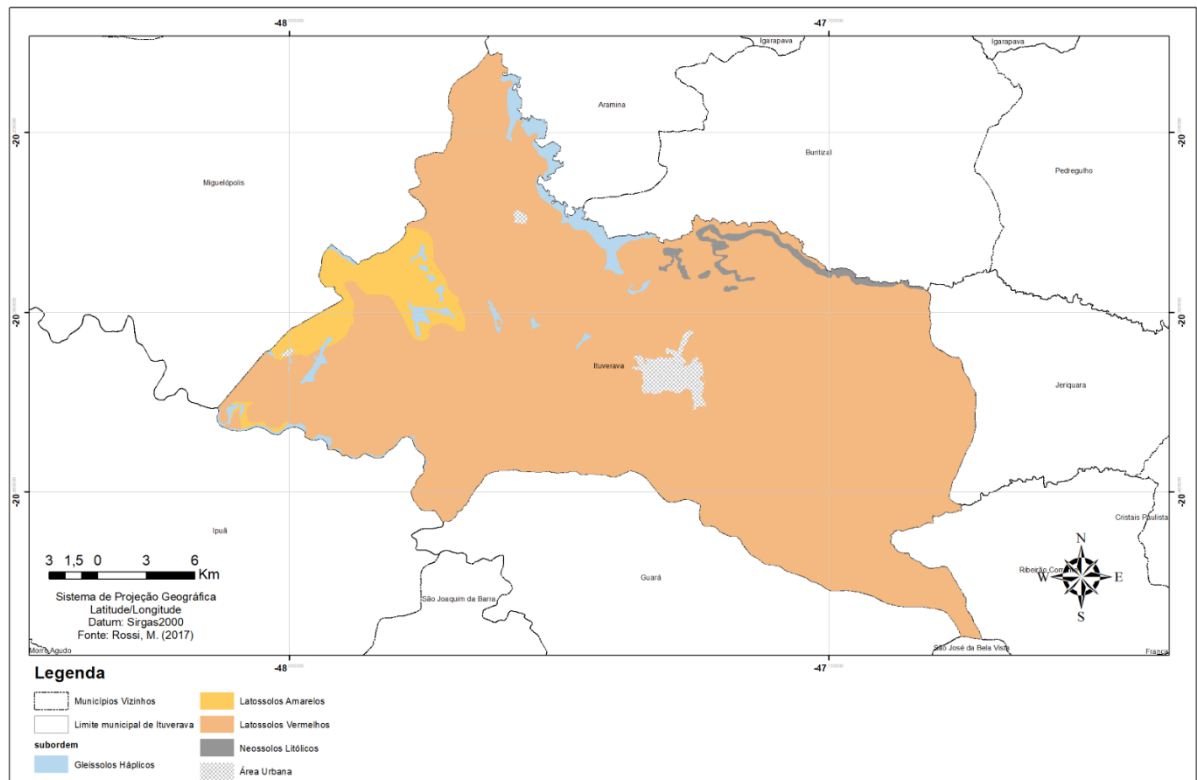


Figura 11 – Pedologia do município de Ituverava, SP

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os latossolos são solos com pouca diferenciação entre os horizontes, reconhecidos pela cor quase homogênea do solo com a profundidade (Tavares *et al.*, 2017). Normalmente, estão situados em relevo plano a suave-ondulado, com declividade que dificilmente ultrapassa 7%, sendo profundos, porosos, drenados, permeáveis e de fácil preparo (Tavares *et al.*, 2017; Teixeira; Magalhães; Braunbeck, 2000).

Tabela 2 – Distribuição das Classes de Solos por Área e Porcentagem no município de Ituverava, SP.

Pedologia	Área (km)	Porcentagem
Gleissolos hápicos	19,3	2,7
Latossolo amarelo	34,97	5,04
Latossolo vermelho	633,9	92,43
Neossolo litólico	8,2	1,17

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Quanto à pedologia do município de Jales (Figura 12 e Tabela 3), a maior parte de seu território é composta por solos da ordem argissolo, com subordem vermelho-amarelo e textura arenosa/média, conforme descrito no Atlas de Suscetibilidades dos Solos do Estado de São Paulo (Rossi *et al.*, 2022).

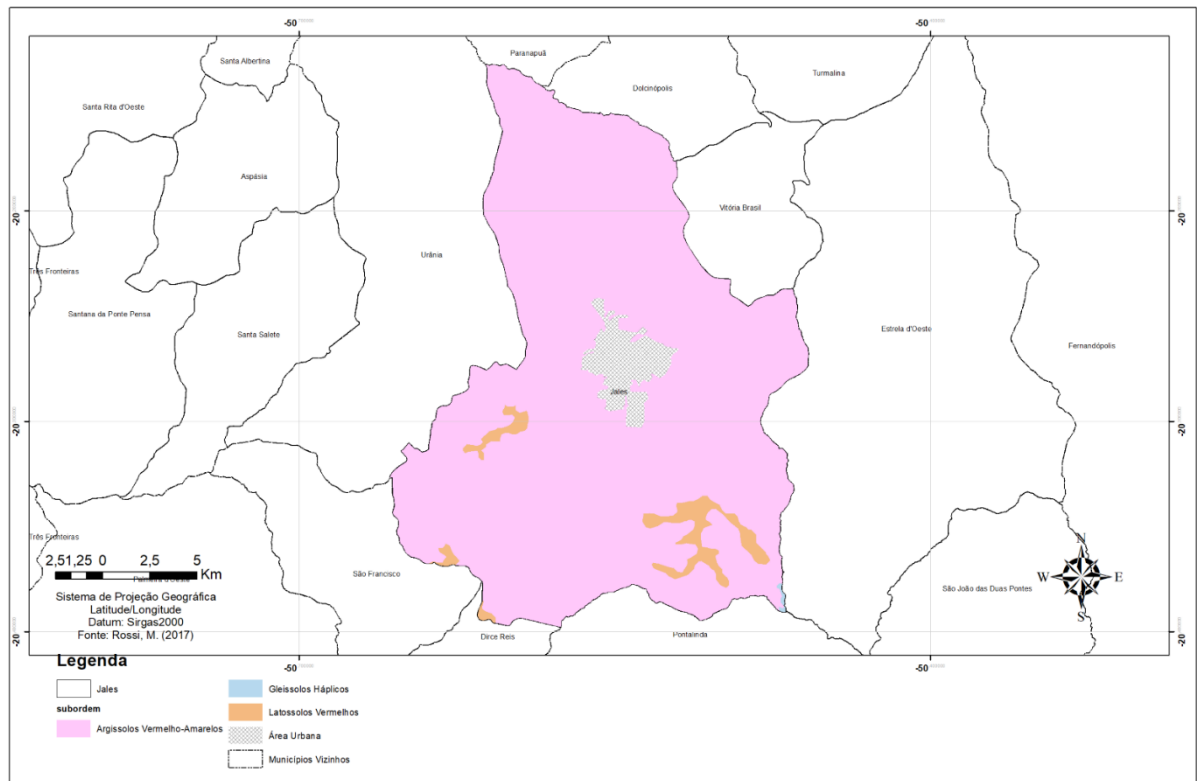


Figura 12 – Pedologia do município de Jales, SP

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Tabela 3 – Distribuição das Classes de Solos por Área e Porcentagem no município de Jales, SP.

Pedologia	Área (km)	Porcentagem
Gleissolos háplicos	0,27	0,07
Argissolo vermelho-amarelo	342,7	96,73
Latossolo vermelho	11,3	3,1

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no município de Ituverava/SP, entre os anos de 2000 e 2021, revelou um crescimento significativo de mais de 41%. Nesse período, a área dedicada ao cultivo da cana-de-açúcar passou de 13 mil hectares para 31 mil hectares de canaviais. Atualmente, essa área representa aproximadamente 44% da área total do município (Figura 13), conforme dados do mapa de uso do solo do MapBiomas. Esses números evidenciam que o território de Ituverava já possui uma área considerável destinada à atividade canavieira, refletindo sua importância e consolidação nesse setor.

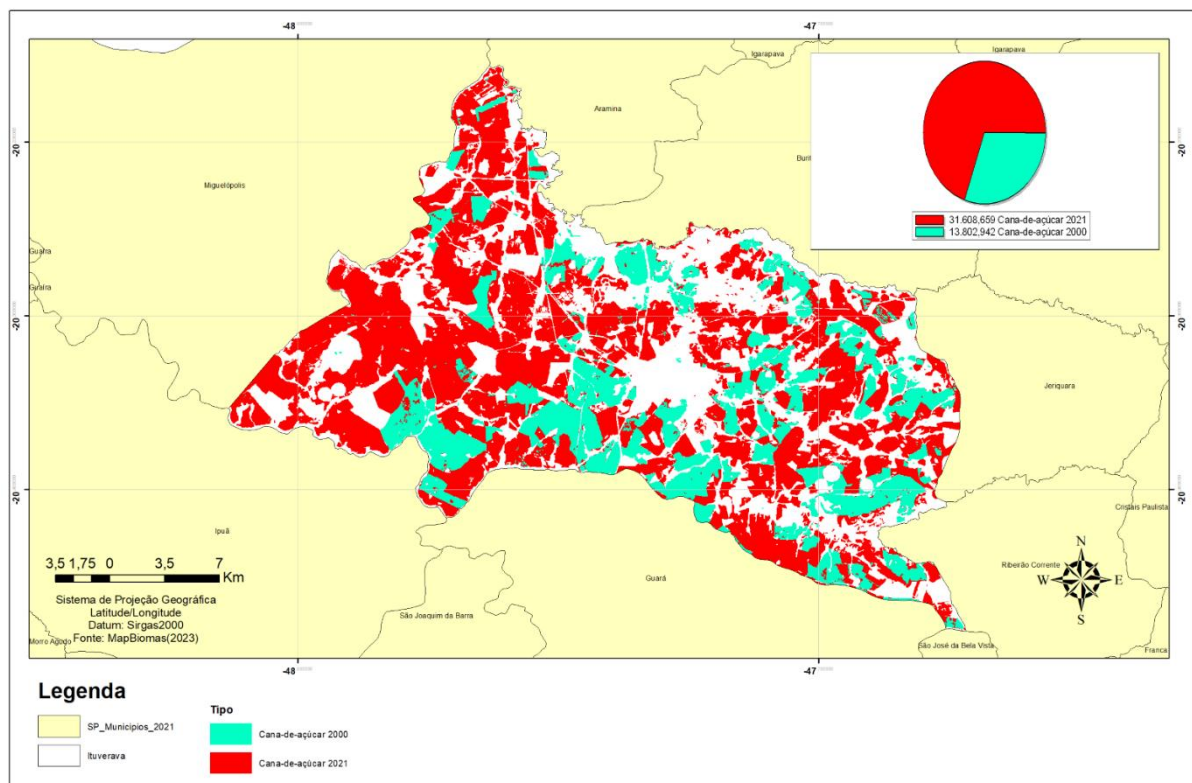


Figura 13 – Distribuição da cana-de-açúcar nos anos de 2000 e 2021 em Ituverava, SP

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A Figura 14 representa a expansão da área de cultivo de cana-de-açúcar entre os anos de 2000 e 2021 no município de Jales/SP. Comparativamente, em 2000, essa área era irrisória, cobrindo apenas 25 hectares, conforme dados fornecidos pela plataforma MapBiomas. No entanto, em 2021, houve um notável crescimento, atingindo quase 6 mil hectares de canaviais. Este aumento substancial destaca a transformação marcante no cenário agrícola do município ao longo das últimas décadas.

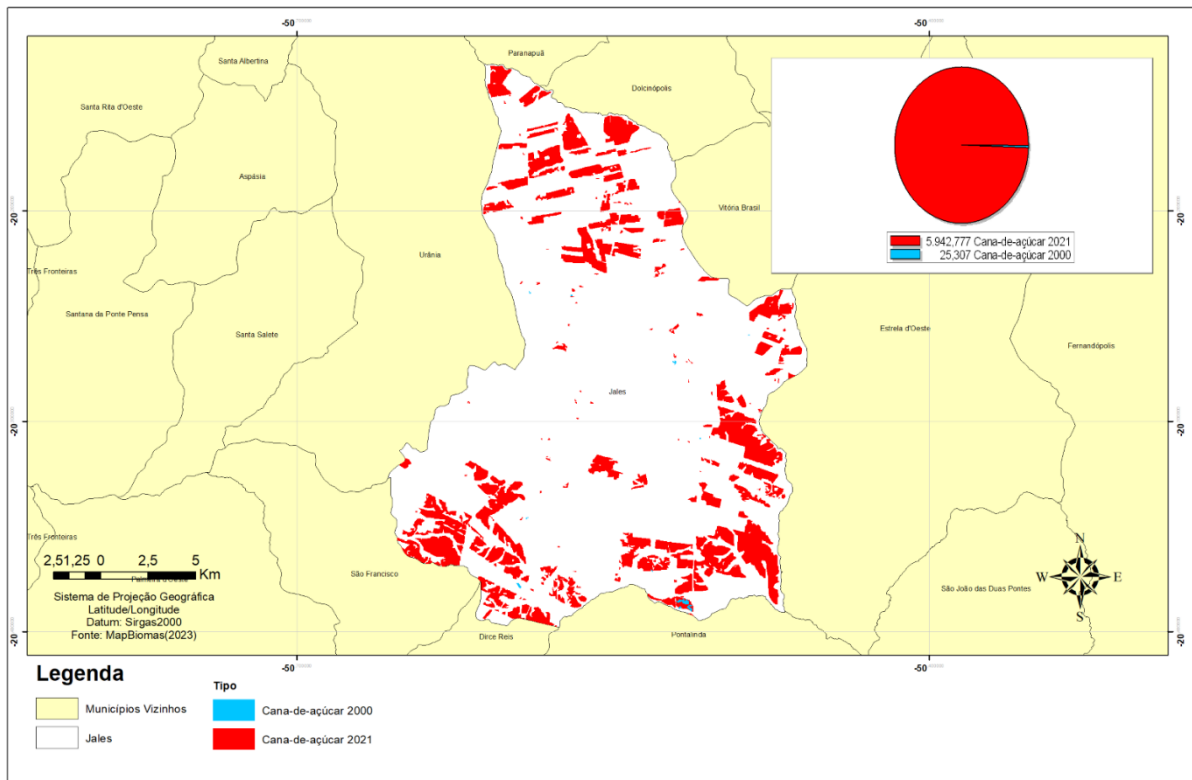


Figura 14 – Distribuição da cana-de-açúcar nos anos de 2000 e 2021 em Jales, SP

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A análise dos dados pluviométricos das regiões analisadas demonstra que o noroeste paulista passa por momentos de escassez hídrica, com baixos índices pluviométricos associados a fenômenos climáticos extremos. Assim, o uso adequado dos recursos hídricos torna-se crucial para garantir a sustentabilidade do desenvolvimento regional. Podemos destacar como um dos principais indicadores importantes acerca desses eventos climáticos as secas, conforme observado na safra de 2020-2021.

Portanto, diante da expansão das áreas urbanas e do aumento das necessidades hídricas humanas, que detêm o uso prioritário nos termos do artigo 1º, inciso III da Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida popularmente como Lei das Águas, propõe-se que todos os outros usos sejam racionados para atender a essa finalidade (Brasil, 1997).

As Tabelas 4 e 5 apresentam a produtividade por safra dos municípios de Ituverava e Jales, respectivamente. Conforme indicado pela pesquisa sobre produção agrícola municipal (PAM) do IBGE, a produtividade representa o rendimento da cultura, medido em toneladas por hectare, e serve para avaliar a eficiência de

produção de determinada cultura. Uma baixa produtividade pode indicar um mau uso dos recursos naturais advindos de um manejo inadequado da cultura.

Tabela 4 – Evolução da Produção, Área Plantada e Produtividade da Cana-de-Açúcar no Noroeste Paulista (Safras 2016/17 a 2021/22) no município de Ituverava, SP.

Safra	Quantidade produzida (ton)	Área plantada (ha)	Produtividade (ton/ha)
16/17	4.037.500	47.500	85
17/18	4.037.500	47.500	85
18/19	4.037.500	47.500	85
19/20	4.037.500	47.500	85
20/21	2.842.800	47.380	60
21/22	2.668.000	46.000	58

Fonte: IBGE – PAM (2024).

Cabe ressaltar que o presente estudo tem o intuito de investigar a pegada hídrica da cana-de-açúcar nas áreas estudadas, tanto em áreas com antigo plantio da cultura quanto nas áreas de expansão no território paulista a fim de analisar a sustentabilidade da produção.

Tabela 5 – Evolução da Produção, Área Plantada e Produtividade da Cana-de-Açúcar no Noroeste Paulista (Safras 2016/17 a 2021/22) no município de Jales, SP.

Safra	Quantidade produzida (ton)	Área plantada (ha)	Produtividade (ton/ha)
16/17	405.600	5.070	80
17/18	495.000	5.500	90
18/19	504.000	5.600	90
19/20	504.000	5.600	90
20/21	504.000	5.600	90
21/22	504.000	5.600	90

Fonte: IBGE – PAM (2024).

Tabela 6 – Volume de chuvas por município.

Safra	Ituverava (mm)	Jales (mm)
17/18	1.436,10	1.788
18/19	1.513,70	1.166,30
19/20	1.704	1.090
20/21	999,3	523
21/22	1.309,80	1.250

Fonte: INMET (2024).

A produtividade da cana-de-açúcar do município de Ituverava apresentou uma queda drástica a partir da safra de 20/21. Por sua vez, o município de Jales, considerado área de expansão da cana-de-açúcar, manteve, ao longo das safras, uma produtividade mais homogênea (Tabela 5), no entanto, conforme observado na tabela 6, o volume de chuvas no município de Ituverava foi maior do que em Jales, apresentando assim maior disponibilidade de águas das chuvas.

Em Ituverava, a produção de cana-de-açúcar diminuiu de 85 ton/ha na safra de 16/17 para 58ton/ha nas safras de 2016 e 2019, enquanto Jales apresentou um aumento de 80ton/ha para 90ton/ha no mesmo período. Quanto às necessidades hídricas, primeiramente, foi analisado o uso das águas verde e azul através do

lançamento dos dados meteorológicos no CROPWAT 8.0, o qual resultou na demanda hídrica da cultura (DHC) dos municípios estudados.

Para o cálculo da pegada hídrica, é necessária a razão entre a DHC e a produtividade da cultura. Desse modo, o município de Ituverava apresentou os maiores valores de pegada hídrica total por safra, variando entre 231,3 e 348,9 m³/ton, com uma média das últimas 5 safras de 288,4 m³/ha, demonstrando um alto custo de recurso hídrico para a produção da cana-de-açúcar (Gráfico 6).

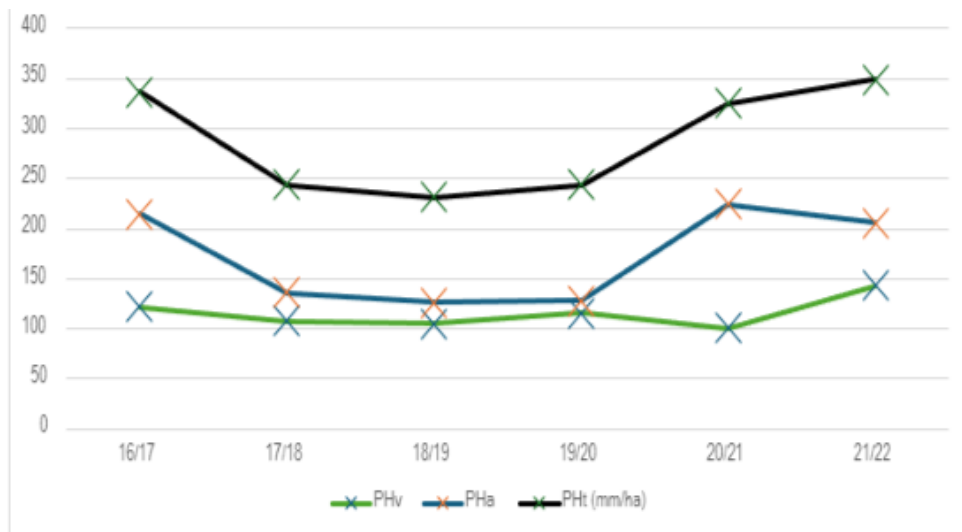


Gráfico 6 – Pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar em Ituverava/SP (mm/m³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Quanto ao município de Jales, os valores de pegada hídrica total variaram entre 211,2 e 295,1 m³/ton, com uma média de 249,6 m³/ton para as últimas 5 safras (Gráfico 7).

Os resultados se repetiram para as médias das pegadas hídricas azul e verde, onde o município de Ituverava apresentou uma média de 115,8 m³/ton para a pegada hídrica verde e 172,5 m³/ton para a pegada hídrica azul, enquanto Jales demonstrou valores médios de 89,7 m³/ton e 159,9 m³/ton, respectivamente.

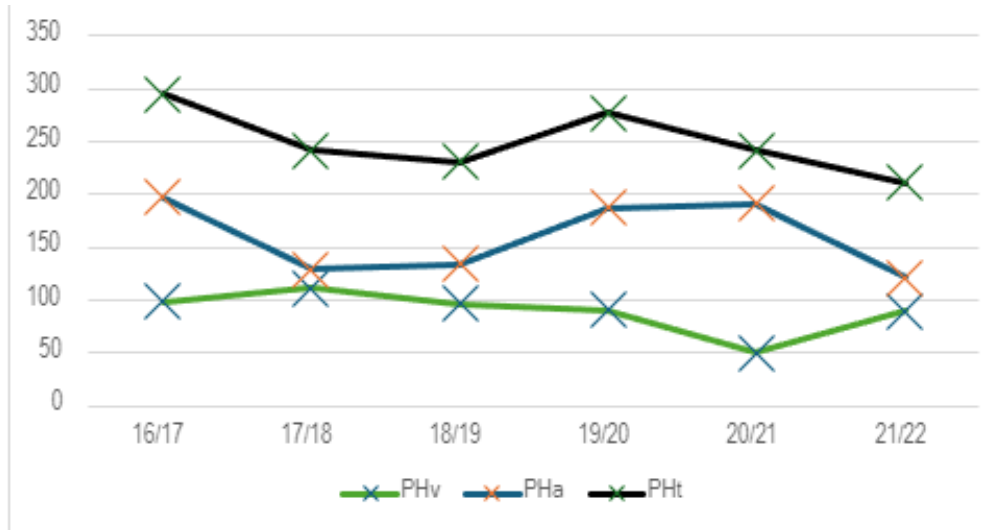


Gráfico 7 – Pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar em Jales/SP (mm/m³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se que a produção de cana-de-açúcar no município de Jales apresenta uma queda da PH total, enquanto em Ituverava, a necessidade hídrica tende a aumentar. Em ambos os cenários, a PH azul tende a se elevar, ou seja, os canaviais tendem a utilizar mais água oriunda dos cursos d'água e lençóis freáticos, recursos estes que não retornam à bacia (Hoekstra; Chapagain; Aladaya, 2011).

Ao analisar os Gráficos 8 e 9, em que a linha representa o volume de água inserido no sistema de produção da cana-de-açúcar e as barras representam a produtividade em toneladas por hectare, o aumento da irrigação ou de áreas agrícolas não configura um aumento da produtividade agrícola. Aumenta-se a área, o volume de água e, ainda assim, não se aumenta a produtividade. Dessa forma, a produtividade parece estar mais relacionada às boas práticas de cultivo e à boa conservação do solo do que ao uso excessivo de recursos hídricos.

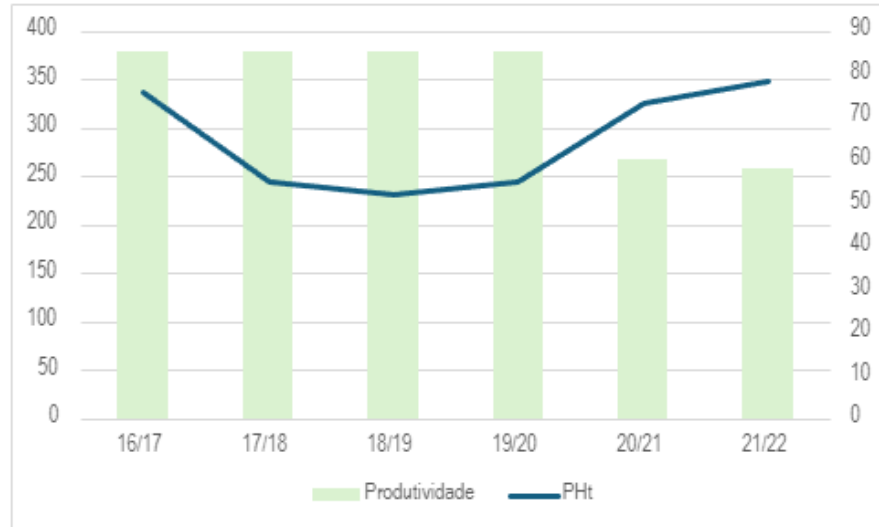


Gráfico 8 – Comparação entre a pegada hídrica total (mm/m³) à esquerda e produtividade (ton/ha) por safra do município de Ituverava

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao analisar a correlação entre a Produtividade e a Pegada Hídrica Total (PHT), do Gráfico 8, é possível identificar uma clara tendência inversa entre as duas variáveis. Onde, à medida que a Produtividade aumenta, a PHT diminui, e vice-versa. Esse padrão sugere que há uma relação inversa entre o uso de água e o desempenho da produção agrícola, especificamente no contexto observado.

A correlação negativa entre as duas variáveis indica que o aumento da Pegada Hídrica Total tende a reduzir a Produtividade. Isso implica em situações em que a demanda por água é maior, a produtividade da cultura pode ser comprometida. A força dessa correlação parece ser moderadamente forte, já que a tendência observada no gráfico é bastante consistente. Essa correlação sugere que a maior necessidade de irrigação, representada pela PHT, pode ser um reflexo de estresse hídrico, o que pode prejudicar o desenvolvimento das plantas. Além disso, é possível que outros fatores, como condições climáticas adversas, pragas, doenças ou falhas no manejo agrícola, também estejam afetando a Produtividade. Isso destaca a complexidade da relação entre a gestão da água e os resultados da produção agrícola.

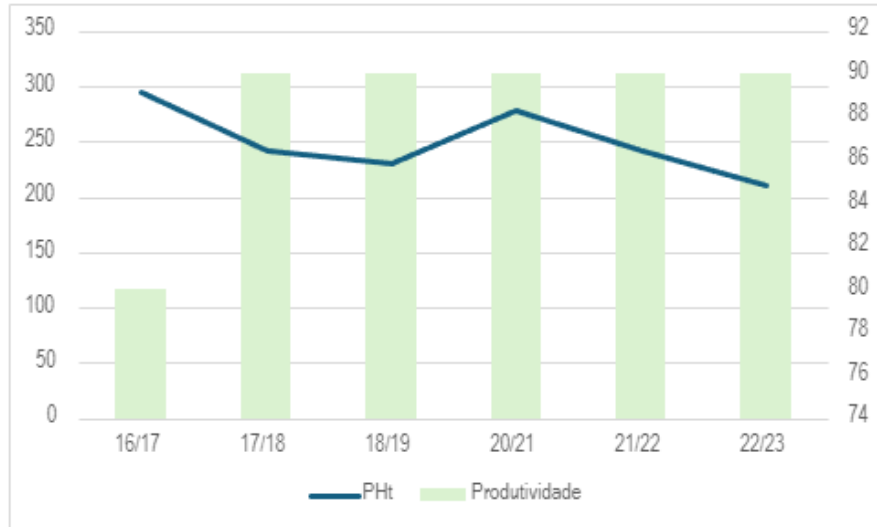


Gráfico 8 – Comparação entre a pegada hídrica total (mm/m³) à esquerda e produtividade (ton/ha) por safra do município de Jales

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao analisar o gráfico 9 de comparação entre a Pegada Hídrica Total (PHt) e da Produtividade ao longo das safras. Na safra 16/17, a produtividade é relativamente baixa, enquanto a PHt se apresenta em níveis elevados. Essa combinação inicial sugere que, naquele período, um maior uso de recursos hídricos não resultou em altos índices de produtividade. Em contraste, entre as safras de 17/18 a 19/20, a produtividade apresenta um aumento significativo e se mantém estável em níveis elevados, enquanto a PHt diminui consideravelmente, alcançando um patamar mais baixo e estável.

A partir da safra 20/21 até a 22/23, a Produtividade continua alta e estável, mas a PHt experimenta um aumento considerável. Embora a quantidade de água utilizada aumente em relação ao início do período analisado, ela permanece abaixo dos níveis observados na safra 16/17. Isso sugere que a produção se manteve eficiente, mesmo com um aumento no uso de água, o que chama atenção para possíveis melhorias na gestão e utilização dos recursos hídricos.

Essa análise revela uma relação inversa inicial entre as variáveis, onde, nas primeiras safras, a alta demanda de água estava associada a uma produtividade mais baixa. No entanto, a partir da safra 17/18, a Produtividade se estabilizou em níveis mais altos, enquanto a PHt ficou em patamares mais baixos. Esse comportamento pode indicar que a cultura passou por um período de adaptação, otimizando o uso da água sem comprometer os rendimentos. Tais dados sugerem que com ajustes no

manejo, foi possível maximizar a produtividade sem aumentar a pressão sobre os recursos hídricos.

Apesar do aumento ou estabilidade da Pegada Hídrica Total (PHT) ao longo das safras, é importante destacar que os municípios de Jales e Ituverava, estão em conformidade com as exigências legais estabelecidas pela Portaria nº251 do Ministério da Agricultura e Abastecimento, de 9 de agosto de 2010. De acordo com essa portaria, o consumo hídrico da cultura canavieira varia conforme seus estágios fenológicos, com especial ênfase para a presença de uma estação seca no período de maturação. Esse fator é crucial para o acúmulo de sacarose nos colmos da cana, o que facilita o manejo e a colheita, contribuindo diretamente para a eficiência da produção.

No entanto, é essencial considerar as mudanças climáticas e seus impactos sobre a oferta hídrica, que podem afetar a disponibilidade de água para as lavouras, sendo que a variabilidade climática, com eventos mais extremos de seca ou chuvas intensas, pode alterar a previsão de recursos hídricos necessários para o cultivo da cana-de-açúcar. A escassez de água em determinadas regiões, aliada à maior demanda por irrigação durante períodos críticos de crescimento, pode gerar desafios adicionais para a manutenção da produtividade, especialmente em um cenário de mudanças climáticas que afeta tanto a distribuição quanto a quantidade de chuvas.

Além disso, a portaria indica explicitamente que tanto o município de Jales quanto o de Ituverava estão aptos para o plantio de novas áreas de cana-de-açúcar, o que reforça a importância do planejamento e da gestão eficiente da água, considerando as possíveis flutuações na oferta hídrica devido às mudanças climáticas.

Dessa forma temos que mesmo com o aumento da Pegada Hídrica Total, esses municípios permanecem em conformidade com as normas estabelecidas, o que evidencia a adequação das práticas de manejo hídrico e o uso eficiente dos recursos naturais. Porém a crescente preocupação com as mudanças climáticas exige um monitoramento contínuo e estratégias de adaptação para garantir a resiliência da agricultura e a disponibilidade hídrica em longo prazo. A continuidade do cultivo da cana-de-açúcar, respeitando os parâmetros legais, deve ser acompanhada de práticas sustentáveis que equilibrem a produção com a preservação dos recursos hídricos essenciais, especialmente em um cenário climático instável.

Os resultados obtidos nesta dissertação, apresentam características compatíveis com outros estudos realizados em território nacional. No caso do estado do Paraná, por exemplo, pesquisa recente conduzida por Rodrigues et al. (2023) identificou que a pegada hídrica total da cana-de-açúcar variou entre 96,5 e 142,1 m³/t, com predominância expressiva da fração verde, reforçando a relevância da precipitação efetiva no abastecimento hídrico da cultura.

No presente trabalho, foram observados valores de pegada hídrica verde superiores aos do Paraná, especialmente nos anos de menor precipitação, o que pode ser explicado pelo clima mais seco e pelos solos com menor capacidade de retenção hídrica em algumas áreas do noroeste paulista, como os argissolos de Jales. Além disso, diferentemente do caso paranaense, o presente estudo identificou aumento proporcional da pegada hídrica azul em safras de baixa produtividade, mesmo sem uso contínuo de irrigação, o que pode sugerir suplementações pontuais ou variações na eficiência agronômica.

Em comparação internacional, segundo Hoekstra et al. (2011), a pegada hídrica global média da cana-de-açúcar é de 209 m³ por tonelada, composta por 145 m³/t de pegada verde, 60 m³/t de pegada azul, e 4 m³/t de pegada cinza. Os valores observados na presente pesquisa aproximam-se da fração verde desse total global, mas com valores de pegada azul proporcionalmente maiores em anos de crise hídrica, evidenciando maior vulnerabilidade da produção local à irregularidade pluviométrica.

Essas diferenças destacam a importância da análise regionalizada da pegada hídrica, uma vez que fatores edafoclimáticos e operacionais influenciam significativamente a eficiência do uso da água na agricultura, conforme também apontado por Hoekstra et al. (2011) e Mekonnen & Hoekstra (2011) em análises globais. Tal constatação reforça a necessidade de políticas públicas e manejos diferenciados conforme o contexto hídrico e produtivo de cada território.

4.1 MUDANÇA CLIMÁTICA E AGRICULTURA

Há ampla evidência científica de que as mudanças climáticas globais estão em um processo acelerado devido ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Segundo Alley (2005), eventos climáticos extremos já ocorreram no

passado e podem se repetir no futuro, fornecendo indícios das tendências atuais. Neste contexto, os impactos das mudanças climáticas são evidentes no aumento das temperaturas médias globais, na intensificação da desertificação e na maior frequência e severidade de fenômenos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, inundações e tempestades.

Dessa mesma forma, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), aliado ao apresentado por Ichikawa (2004), mostra que os eventos climáticos são provocados pela ação antrópica, bem como já são notadas com o aumento de temperatura média de diversas regiões do país, conforme se analisa no gráfico abaixo com dados extraídos do site Meteoblue, portal de serviços meteorológicos criado pela Universidade da Basileia, na Suíça.

Conforme o Gráfico 10 existe a ocorrência não apenas do aumento de temperatura, mas também do volume de chuvas por ano com acentuação de fortes chuvas e diminuição do volume de água. Nesse mesmo sentido, o acordo de Paris de 2015 estabeleceu uma medida e compromissos globais para limitar o aquecimento global a menos de 2° C. Assim, para reduzir este aquecimento, a estratégia lançada foi reduzir a expansão da emissão de gases de efeito estufa.

O gráfico 11 demonstram que as mudanças climáticas já nos atingem, com o aumento da temperatura e diminuição do volume de chuvas. Essas alterações afetam diretamente os ecossistemas brasileiros e, por consequência, a agricultura. Conforme Nobre *et al.* (2004), já se percebe a desertificação do semiárido, bem como a perda de diversidade biológica de fauna e flora.

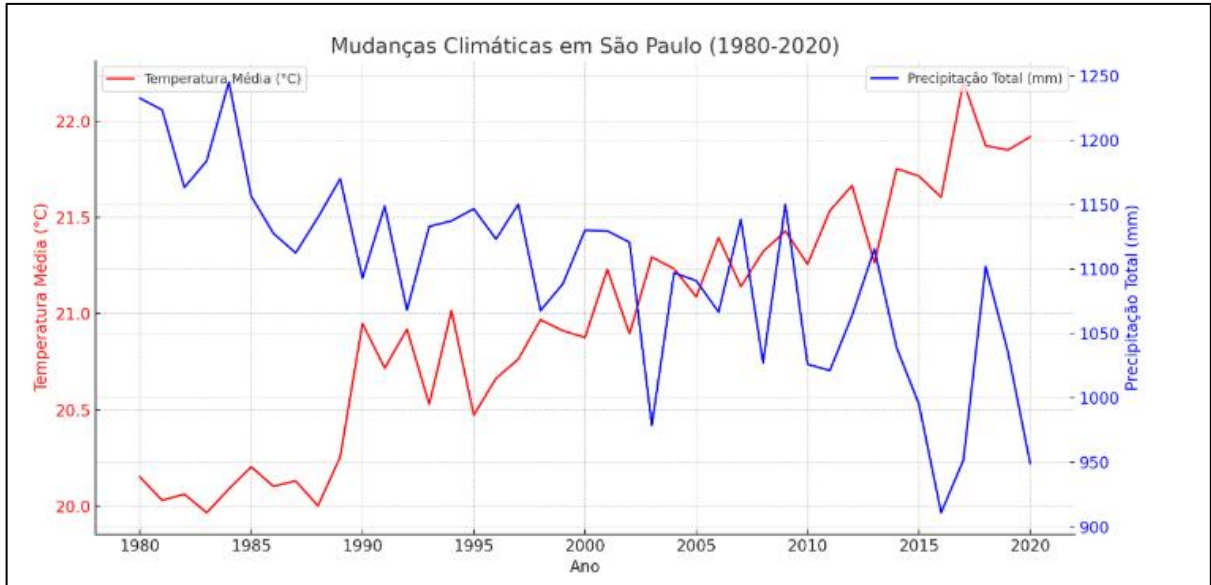
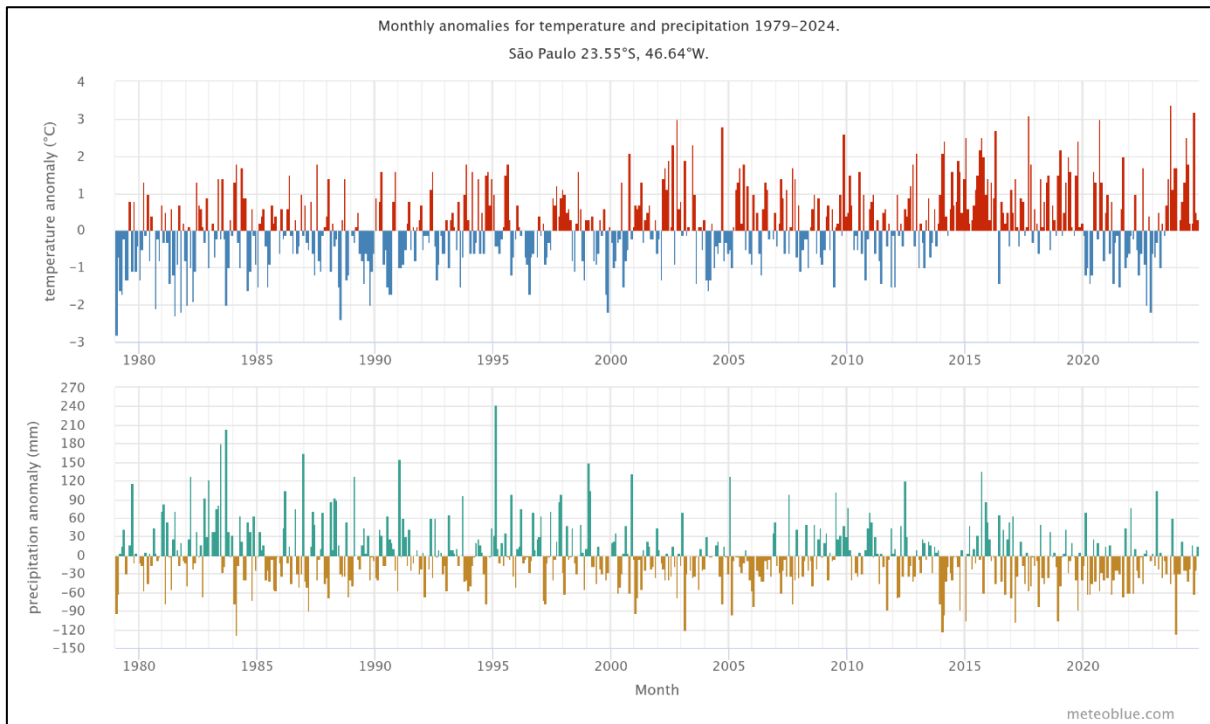


Gráfico 9 – Mudanças climáticas em São Paulo (1980-2020)

Fonte: Meteoblue (2024).

Gráfico 10 – Alterações de temperatura e precipitação em São Paulo (1979-2024)



Fonte: Meteoblue (2024).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), a agricultura responde por cerca de 46% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, desempenhando um papel importante nas mudanças climáticas (SEEG, 2023). Tais impactos estão diretamente relacionados ao

desmatamento e ao avanço das fronteiras agrícolas, assim como ao uso de fertilizantes nitrogenados e à fermentação entérica do gado, que libera grandes quantidades de metano (CH_4), um dos gases com maior potencial de aquecimento global (Bustamante et al., 2012).

As mudanças climáticas, afetam a agricultura de diversas maneiras, tornando a produção mais susceptíveis as variações das condições ambientais. Essas alterações já podem ser percebidas no estado de São Paulo, em decorrência do aumento das temperaturas médias, pela alteração no regime de chuvas e pela intensificação de eventos extremos, como ondas de calor, estiagens prolongadas e chuvas intensas em curtos períodos (Marengo et al., 2020). Esses fenômenos impactam cada região do estado de forma diferente, dependendo da disponibilidade de água, do tipo de solo e das culturas cultivadas.

O aumento da temperatura pode comprometer a produtividade de culturas sensíveis ao calor, como a cana-de-açúcar e o milho, além de favorecer a disseminação de pragas e doenças agrícolas, devido a invernos menos rigorosos (Sentelhas et al., 2015). Ao mesmo tempo, a irregularidade das chuvas pode dificultar o abastecimento de água para irrigação, exigindo um planejamento mais eficiente do uso dos recursos hídricos e a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.

Diante desse cenário, é fundamental compreender a relação entre agricultura e mudanças climáticas para desenvolver estratégias que minimizem os impactos ambientais e garantam a resiliência da produção agrícola no futuro.

4.1.1 Cana-de-açúcar e mudanças climáticas

O quarto relatório de avaliação do IPCC apresentou uma projeção de mudança climática à alteração da umidade do solo e frequência de eventos climáticos extremos, como inundações, altas temperaturas e secas em muitas localidades (Alexandrov; Hoogenboom, 2000). Esse cenário representa um desafio para culturas de ciclo longo, como a cana-de-açúcar, que se torna mais suscetível às variações climáticas.

Segundo Allen *et al.* (1985), a cana-de-açúcar, por possuir metabolismo C_4 , que apresenta maior eficiência fotossintética e menor transpiração quando da presença de uma elevada concentração de CO_2 . Desta forma, quando esse aumento de CO_2 ocorre juntamente com a elevação das temperaturas e com a implementação de boas

práticas de manejo agrícola, a produtividade da planta pode crescer, melhorando também sua eficiência no uso da água (Morgan et al., 2011).

No entanto, as temperaturas acima de 34°C podem comprometer o crescimento da cana-de-açúcar, reduzindo a taxa de fotossíntese (Guerra et al., 2014). Mediante aos dados obtidos neste estudo no município de Jales tal situação já é observada, onde as temperaturas médias superam os 25°C, com máximas frequentemente ultrapassando 38°C. Esse calor intenso provoca maior evapotranspiração, reduzindo a umidade do solo e desta forma aumenta a necessidade de irrigação.

Já no município de Ituverava, embora observe-se uma elevação nas temperaturas ao longo dos últimos anos, a disponibilidade de água na região é maior, porém, a produção de cana-de-açúcar apresenta uma pegada hídrica superior à de Jales, configurando assim uma maior dependência de irrigação suplementar para garantir bons rendimentos. A distribuição irregular das chuvas também contribui para perdas de água por escoamento superficial e lixiviação de nutrientes, exigindo mais insumos e irrigação frequente.

Outro fator prepondera causado pelos impactos das mudanças climáticas é o favorecimento do crescimento de plantas daninhas, as quais entram em processo de competição com a cana-de-açúcar por nutrientes e água, afetando sua produtividade e em muitos casos essas plantas reagem ao aumento de CO₂ crescendo de maneira acelerada, podendo até dobrar sua taxa fotossintética em comparação às culturas agrícolas (Patterson et al., 1999).

Além disso, as mudanças que vem ocorrendo no regime hídrico (El Niño e La Niña), podem influenciar na proliferação de pragas, que tendem a se beneficiar do aumento da umidade no solo, resultado da maior eficiência hídrica das plantas expostas a altos níveis de CO₂ (Fuhrer, 2003). Para minimizar esses efeitos, torna-se essencial o aprimoramento das estratégias de manejo agrícola, as quais permeiam desde a inclusão do controle de ervas daninhas até o monitoramento de pragas.

Assim as mudanças climáticas também afetam a disseminação e intensidade das doenças que atingem a cana-de-açúcar, influenciando seu ciclo de vida e o dos agentes patogênicos. A junção de diferentes fatores como variações de temperatura, alterações no regime de chuvas e mudanças na circulação dos ventos podem favorecer a incidência de doenças e pragas, exigindo novas estratégias de controle (Patterson et al., 1999).

Conforme Alves e Marengo (2010), as principais doenças que ocorrem na cana-de-açúcar no Brasil seriam favorecidas por um cenário futuro com o aumento de temperatura e mudança na dinâmica dos ventos. Tais cenários podem mudar a taxa de desenvolvimento das pragas, mudar a resistência de insetos hospedeiros e, assim, alterar a forma de distribuição geográfica de pragas, necessitando de novas estratégias de controle (Coakley *et al.*, 1999).

Quanto às áreas de expansão da cana-de-açúcar no território paulista, atualmente, conforme demonstrado nesta dissertação, o noroeste paulista é a área onde se concentra tal cultivo, passando por longos períodos de estiagem entre os meses de abril e novembro. Tal limitação hídrica acarreta a queda de taxas de fotossíntese, que compreende toda a fase de maturação e o início do perfilhamento da cultura.

Considerando o comportamento da cana-de-açúcar à elevação do CO₂ atmosférico, especialmente em relação à otimização da utilização dos recursos hídricos pela planta, é possível que as áreas as quais possuem maior limitação pelo estresse hídrico sejam mais beneficiadas do que aquelas que já possuem cana em seu território, devido à redução da necessidade de irrigação. Isso poderia mitigar as restrições econômicas associadas à irrigação da cultura, promovendo maior equilíbrio produtivo entre essas duas áreas.

Dessa forma, Jales, apesar de apresentar menor volume de chuvas, pode se tornar uma alternativa mais viável para a expansão da produção de cana-de-açúcar. A menor pegada hídrica da cultura nesse município, provavelmente associada à eficiência do uso da água e adaptação ao regime de sequeiro, pode representar uma vantagem competitiva em um cenário de mudanças climáticas e aumento das restrições hídricas.

Por outro lado, Ituverava, que apresenta uma pegada hídrica total maior devido à baixa produtividade de suas áreas plantadas, pode enfrentar desafios para manter sustentável a produção. A necessidade consumo hídrico mais elevado aliado ao aumento da alteração do clima, pode demandar estratégias mais eficientes de uso da água e alternativas de manejo para mitigar os impactos climáticos.

4.1.2 Estratégias para adaptação da cultura canavieira às mudanças climáticas

O Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR) do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) projeta que, nos próximos 10 anos, a produção brasileira de cana-de-açúcar poderá sofrer uma redução de até 20% em decorrência das mudanças climáticas. Essa diminuição pode causar impactos significativos no mercado de etanol, do qual o Brasil é grande produtor. Estima-se uma redução de 3,8% na safra 2024/2025 em função dos baixos volumes de chuva e aumento da temperatura. Assim, torna-se indispensável a adoção de medidas que possam mitigar os impactos adversos causados pela mudança do clima, as quais serão descritas abaixo.

4.1.2.1 Melhoramento genético e uso de variedades resilientes

No município de Jales, o principal foco deve ser direcionado para a implementação de cultivares mais resistentes ao calor e ao déficit hídrico para manter um bom desempenho em condições de menor disponibilidade hídrica, enquanto em Ituverava, a necessidade imediata é a implementação de cultivares mais tolerantes à incidência de pragas e doenças, potencializadas pelos efeitos deletérios das mudanças climáticas.

Neste contexto, o setor sucroenergético deve estreitar parcerias com instituições de pesquisa, como universidades e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), com o objetivo de desenvolver cultivares adaptadas às características físico-químicas e ambientais das áreas de estudo, levando em conta o microclima local.

4.1.2.2 Redução da Pegada Hídrica

Nos municípios de Jales e Ituverava, a pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar apresentou comportamentos distintos, sendo mais elevada em Ituverava e menor em Jales, mesmo com o maior volume de precipitações registrado nas safras do primeiro. Essa diferença evidencia que o volume de chuvas, isoladamente, não determina a eficiência hídrica da produção. Assim, a redução da pegada hídrica nessas regiões deve estar fundamentada na modernização das práticas de manejo agrícola, no uso de tecnologias de monitoramento climático e na conservação dos mananciais

hídricos, contribuindo para o aumento da resiliência produtiva frente às mudanças climáticas e para a redução da pressão sobre os recursos hídricos disponíveis.

Para o monitoramento hídrico climático, é necessária análise precisa das condições hídricas da lavoura, permitindo que a aplicação da irrigação e a conservação da umidade do solo sejam otimizadas para reduzir desperdícios e melhorar a eficiência da absorção de água pela cultura, que pode ser realizada, dentre outras maneiras, através da instalação de sensores de umidade do solo, para evitar a irrigação em períodos que a umidade do solo já é suficiente para o desenvolvimento da planta.

Implementação de estações meteorológicas locais com o intuito de realizar previsões meteorológicas mais precisas realizando modelos preditivos para o manejo agrícola.

Desenvolvimento de estratégias para armazenamento de água da chuva permitindo o melhor aproveitamento de águas pluviais, adoção de irrigação por gotejamento evitando a evapotranspiração das irrigações aéreas.

Essas e outras ações permitem um manejo hídrico mais eficiente, reduzindo a pegada hídrica, melhorando a eficiência produtiva de Ituverava e garantindo maior resiliência às secas de Jales.

Outro ponto importante é a recuperação de nascentes e proteção de mananciais para a conservação dos recursos hídricos naturais, garantindo a manutenção dos aquíferos, nascentes e cursos d'água superficiais que abastecem os sistemas agrícolas, a intensificação agrícola aumentam a pressão sobre os mananciais, tornando prioritária a implementação de ações voltadas à recuperação de nascentes e proteção de áreas estratégicas para a recarga hídrica.

Dessa forma é necessário fomentar a recuperação de vegetação nativa com foco em áreas de preservação permanente, bem como a criação de incentivos para que produtores rurais adotem boas práticas ambientais de conservação hídrica como Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), desenvolvimento de linhas de crédito agrícola especiais para práticas que visem a conservação de água e a criação de certificações ambientais específicas para cana-de-açúcar plantada de forma sustentável, como o selo Etanol Mais Verde.

A recuperação de fontes hídricas é um investimento estratégico para garantir a resiliência da produção canavieira em Jales e Ituverava, minimizando os impactos ambientais e assegurando a sustentabilidade do uso da água a longo prazo.

A redução da pegada hídrica é fator crucial para garantir a sustentabilidade diante das mudanças climáticas e da crescente pressão sobre recursos hídricos, a adoção de tecnologia no monitoramento hídrico, práticas de conservação do solo e recuperação de nascentes garantem que a produção permaneça sustentável, podendo colocar Jales à vanguarda da produção agrícola já que se trata de área de expansão canavieira.

4.1.2.3 Planejamento Territorial e Zoneamento Agroambiental adequado.

Conforme visto, existe diferenças na pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar em regiões distintas do estado de São Paulo, por terem particularidades ambientais, climáticas e socioeconômicas, dessa forma, a definição de área prioritárias para a expansão da cana-de-açúcar deve ser realizada de forma estratégica para minimizar os impactos das mudanças climáticas evitando conflitos com outras atividades econômicas e ambientais.

Em Jales, onde a disponibilidade hídrica é naturalmente limitada, o aumento do período de estiagem pode reduzir a capacidade produtiva do solo, em Ituverava, embora haja maior precipitação anual, a má distribuição das chuvas e um manejo inadequado elevaram a pegada hídrica local, além do mais, o avanço desordenado da cana pode vir a gerar conflitos com ecossistemas essenciais para a manutenção de recursos hídricos e da regulação do clima.

Para tanto se faz necessária a definição da área prioritárias para a expansão com um planejamento territorial adequado analisando locais com áreas de maior resiliência climática, expansão por áreas já antropizadas dentre outras, compatibilizando com outras atividades econômicas.

Com as estratégias descritas e sintetizadas na tabela 7, os municípios de Jales e Ituverava assegurarão a sustentabilidade, competitividade e expansão da cultura da cana-de-açúcar, promovendo um equilíbrio entre produtividade, preservação ambiental e desenvolvimento econômico. Assim, garantirão a continuidade da cultura, mitigando os impactos das mudanças climáticas e reduzindo a vulnerabilidade da produção.

4.1.2.4. Monitoramento climático inteligente

Com a intensificação das mudanças climáticas e suas consequências, como alteração no período de secas, ondas de calor, distribuição de chuvas com volumes irregulares, é importante que se faça o monitoramento do clima e planejamento das safras, pois facilita a gestão hídrica, o planejamento das operações agrícolas, como a seleção de equipamentos adequados para colheita, a exemplo da possível necessidade de emprego de caminhão de combate a incêndio junto às frentes de colheita, em dias muito secos e com alta probabilidade de propagação das chamas, mitigando os riscos para à produção e ao meio ambiente.

Jales e Ituverava apresentam respostas distintas às mudanças climáticas, enquanto Jales enfrenta escassez hídrica mais acentuada e longos períodos de estiagem, Ituverava lida com a variabilidade da intensidade e frequência das chuvas, ambos os casos são exemplos de desafios para a produção sustentável.

Nesse contexto, o monitoramento climático, associado ao uso de tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem climática preditiva, é fundamental para orientar as decisões estratégicas para o cultivo.

Dessa forma se faz necessária a coleta de dados contínuos sobre temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e radiação solar, já que são parâmetros que impactam diretamente na pegada hídrica.

Além do mais, o monitoramento em tempo real da disponibilidade hídrica do solo, com um mapeamento intralavoura permitindo o monitoramento de locais com estresse hídrico, é ferramenta importante para analisar os períodos de estresse hídrico reduzindo a irrigação desnecessária e por consequência a pegada hídrica, o monitoramento climático permite o ajuste do período de plantio e colheita evitando perda de produtividade e exposição do plantio a riscos provocados pelo desalinhamento do calendário agrícola em função das possíveis variabilidades climáticas.

A implementação do monitoramento climático e planejamento agrícola em Jales e Ituverava representa um pilar na construção de medidas para a resiliência climática produtiva para os dois locais.

4.1.2.5. Conservação do solo e recursos naturais.

A intensificação da monocultura tem levado ao longo dos anos à degradação de áreas produtivas, com perda de fertilidade do solo, compactação de solo, erosão, redução de biodiversidade de fauna e flora, dentre outros problemas ambientais, aliado aos processos de mudança climática tendem a acelerar estes processos degradativos, tornando essencial a adoção de estratégias que aliem a diversificação produtiva à restauração ecológica das áreas impactadas.

Nesse sentido temos que a diversificação das atividades agrícolas contribui para reduzir à vulnerabilidade climática dos sistemas produtivos, evitando a dependência de uma única cultura, favorecendo inclusive a diversificação faunística por conta de ambientes distintos que podem abrigar diferentes espécimes.

No caso de Jales, onde a limitação hídrica é um fator limitante da produção, a diversificação com espécies mais tolerantes à seca pode melhorar a eficiência do uso da água diminuindo o impacto gerado pelo consumo hídrico de uma cultura com larga área de plantio, podendo favorecer ainda a viabilidade econômica de áreas menos produtivas. Já em Ituverava a diversificação permite atenuar o impacto da pressão sobre recursos hídricos nos períodos de maior demanda por irrigação, além do mais, uma alternância de cultura pode favorecer a recomposição da fertilidade do solo.

Quanto à recuperação de áreas degradadas, restaura a funcionalidade ecológica dos agrossistemas e promove a sustentabilidade da expansão agrícola frente às mudanças do clima, para tanto se faz necessário a elaboração de um diagnóstico para mapeamento de áreas degradada para que sejam direcionados esforços para estes locais, com especial atenção aos locais que são áreas de recarga hídrica e matas ciliares devido a sua importância ecossistêmica, bem como a reconexão de fragmentos florestais e o aumento da biodiversidade.

Uma das consequências do aumento da cobertura vegetal sob a ótica deste autor essas ações são particularmente importantes em Ituverava, onde existe um plantio mais antigo de cana-de-açúcar ocorrendo assim uma maior pressão sobre os recursos hídricos durante determinados períodos. Em Jales, a recuperação de áreas permite novas frentes de expansão da cana de açúcar de forma sustentável.

Tabela 7 : Síntese das ações e das estratégias para a expansão sustentável da área de cultivo da cana-de-açúcar, preservando os recursos hídricos nos municípios de Jales e Ituverava

Ação	Estratégia
1. Melhoramento genético e uso de variedades resilientes	- Desenvolver cultivares mais resistentes ao calor e déficit hídrico em Jales.
	- Focar em cultivares tolerantes a pragas e doenças em Ituverava.
	- Parcerias com universidades e EMBRAPA para adaptação genética às condições locais e microclimas.
2. Redução da Pegada Hídrica	- Modernizar o manejo da irrigação, utilizando tecnologia de sensores de umidade do solo para otimizar a irrigação.
	- Implementar estações meteorológicas locais para previsões mais precisas e melhor planejamento agrícola.
	- Adotar irrigação por gotejamento para evitar a evapotranspiração e reduzir o consumo de água.
	- Recuperar nascentes e proteger mananciais hídricos, com foco na conservação dos recursos hídricos naturais.
	- Incentivar práticas de conservação hídrica, como Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e linhas de crédito agrícolas.
3. Planejamento Territorial e Zoneamento Agroambiental	- Definir áreas prioritárias para a expansão, levando em consideração a resiliência climática e a disponibilidade hídrica.
	- Priorizar expansão em áreas já antropizadas, evitando conflitos com ecossistemas e garantindo a regulação climática.
	- Realizar o zoneamento agroambiental adequado para garantir a compatibilidade com outras atividades econômicas.
4. Monitoramento climático inteligente	- Implementar o monitoramento climático para garantir a utilização eficiente da água e otimização da irrigação.
	- Desenvolver modelos preditivos para antecipar eventos climáticos e otimizar as práticas de manejo agrícola.
5. Conservação do solo e recursos naturais	- Adotar práticas de conservação do solo, como a cobertura vegetal, para evitar erosão e melhorar a retenção de água.
	- Recuperar áreas de vegetação nativa e reforçar a proteção de áreas de preservação permanente (APPs).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo ressaltam a relevância de analisar e avaliar a demanda hídrica como um fator primordial para a sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar, especialmente no contexto das mudanças climáticas. A avaliação da pegada hídrica da cultura, especialmente em regiões de sequeiro, permite compreender os limites e as oportunidades de melhoria no uso da água, contribuindo para o planejamento de estratégias agrícolas mais resilientes.

Dessa forma, conclui-se que os impactos oriundos das alterações climáticas tendem a maximizar ainda mais as deficiências produtivas, resultando em um aumento significativo da pegada hídrica total da cultura. Tais mudanças incluem variações no regime de chuvas, elevação da temperatura média anual e maior frequência de eventos climáticos extremos, como estiagens prolongadas e ondas de calor, que afetam diretamente o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Essas condições representam um desafio substancial para a manutenção da produtividade agrícola e, conseqüentemente, para a segurança alimentar e energética do país.

Frente a esse cenário, torna-se imprescindível a adoção de medidas preventivas e estratégias de adaptação inovadoras que permitam mitigar os efeitos adversos dessas mudanças. Essas ações devem assegurar a eficiência hídrica e a sustentabilidade do setor sucroenergético, por meio do uso racional dos recursos naturais e da incorporação de boas práticas agrícolas. Nesse sentido, a presente pesquisa destacou contrastes importantes entre os dois municípios analisados: Ituverava e Jales.

O município de Ituverava, com histórico de cultivo intensivo da cana-de-açúcar por mais de 30 anos, apresentou declínio em sua produtividade agrícola nas últimas safras, o que implicou um aumento proporcional da pegada hídrica por tonelada de cana produzida. Esse fenômeno pode estar associado ao esgotamento dos nutrientes do solo, à compactação e à degradação física e química provocadas pelo uso contínuo da terra, além dos impactos climáticos, como a diminuição da precipitação e o aumento das temperaturas. Esses fatores evidenciam a urgência de se atualizar os métodos de manejo agrícola adotados na região, com foco na conservação do solo, na rotação de culturas e no uso de variedades mais adaptadas ao estresse hídrico.

Por outro lado, Jales, município com menor tempo de cultivo da cana-de-açúcar e com predominância de argissolos, manteve sua produtividade agrícola e apresentou uma tendência de redução na pegada hídrica azul, indicando uma menor dependência de fontes hídricas suplementares. Esse desempenho positivo pode estar relacionado

à adoção de estratégias de manejo mais conservacionistas, como a escolha de variedades resistentes à seca, a adequação do calendário agrícola ao regime pluviométrico local e a aplicação de técnicas que aumentam a retenção de água no solo. Dessa forma, Jales configura-se como um exemplo de como a adaptação climática e o uso responsável da água podem contribuir para uma produção agrícola mais sustentável.

O presente estudo, portanto, não se limita apenas à análise das condições locais dos municípios em foco, mas busca fomentar a discussão sobre a importância da gestão hídrica no contexto agrícola brasileiro. Ele serve como alerta para a necessidade urgente de ações que promovam uma agricultura eficiente, adaptada às novas realidades climáticas e ambientalmente responsável. As recomendações aqui apresentadas são relevantes tanto para os produtores rurais quanto para os tomadores de decisão e formuladores de políticas públicas, reforçando a importância de integrar a questão hídrica às estratégias de desenvolvimento territorial.

Além disso, a pesquisa identificou fatores críticos que devem ser monitorados com atenção, como o declínio da produtividade em áreas de cultivo prolongado, o aumento da pegada hídrica em safras com déficit hídrico e a disparidade nos resultados entre diferentes condições edafoclimáticas. Tais achados apontam para a necessidade de investigações adicionais em outras regiões com características semelhantes, visando o aprimoramento do zoneamento agroambiental da cana-de-açúcar. Essa ferramenta pode ser essencial para orientar a expansão agrícola de forma ordenada, maximizando a eficiência produtiva e minimizando os impactos ambientais.

A proposta de uma agricultura mais sustentável deve incorporar, além da redução da pegada hídrica, a utilização de tecnologias avançadas, como sensores de umidade do solo, estações meteorológicas automatizadas e sistemas de irrigação de precisão, que permitam o monitoramento em tempo real e a tomada de decisões mais informadas. Tais inovações podem contribuir para a redução do desperdício de água e para o aumento da resiliência das lavouras frente às adversidades climáticas.

Embora os resultados desta dissertação tragam contribuições relevantes, algumas limitações devem ser reconhecidas. Primeiramente, o escopo geográfico da pesquisa foi limitado a dois municípios, o que restringe a generalização dos achados para outras regiões produtoras. A metodologia adotada, baseada no modelo CROPWAT 8.0, também apresenta limitações relacionadas à simplificação do balanço

hídrico e à dependência de parâmetros médios fixos, o que pode comprometer a precisão das estimativas. Adicionalmente, a ausência de dados primários sobre irrigação efetiva e sobre carga poluente impossibilitou a análise da pegada hídrica cinza e limitou a avaliação da pegada azul.

Diante dessas limitações, sugere-se que estudos futuros ampliem o número de municípios analisados, diversifiquem as abordagens metodológicas (como o uso de modelos mais complexos, como SWAT e AquaCrop) e incorporem dados primários obtidos por meio de trabalho de campo e entrevistas com produtores. Além disso, é recomendável que se explore o uso de sensoriamento remoto e séries temporais de imagens de satélite, para monitorar padrões de estresse hídrico e variações na produtividade agrícola ao longo do tempo.

Também se destaca a importância de integrar a dimensão socioeconômica às análises de sustentabilidade hídrica, investigando o papel de fatores como acesso a crédito, assistência técnica, políticas públicas e nível de tecnificação no desempenho hídrico das propriedades rurais. Essa abordagem multidimensional é fundamental para promover uma gestão hídrica mais justa, eficiente e ambientalmente equilibrada.

Por fim, recomenda-se a construção de planos de ação regionais que envolvam múltiplos atores – produtores, órgãos ambientais, instituições de pesquisa e sociedade civil – com o objetivo de implementar estratégias de adaptação e monitoramento contínuo. Tais planos devem estabelecer responsabilidades claras, prazos realistas e indicadores mensuráveis, como a variação da pegada hídrica, a produtividade agrícola e o índice de uso racional da água. Com isso, será possível avançar na construção de uma agricultura verdadeiramente sustentável, capaz de responder aos desafios do século XXI.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, W. G. de. **Consumo hídrico e coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar cultivada sob diferentes lâminas de irrigação**. 2012. 89 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- ALEXANDROV, V. A.; HOOGENBOOM, G. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s.l.], v. 104, p. 315–327, 2000.
- ALLEN, R. G.; *et al.* A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 81, n. 1-2, p. 1–22, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>.
- ALLEY, R. B. Mudança climática brusca. *In*: ALLEY, R. B. **Scientific American Brasil**. 12. ed. 2005. pp. 8–15.
- ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.], v. 100, p. 337-350, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00704-009-0165-2>.
- ANDRADE, G. O. de. O ciclo da cana-de-açúcar no Rio Grande do Norte. **Revista de História da USP**, São Paulo, n. 35, p. 123–129, 1958.
- ANDRADE, M. C. **A terra e o homem no Nordeste**: contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2005.
- BRANCO, J. E. H.; BRANCO, D. H.; AGUIAR, E. M.; CAIXETA FILHO, J. V.; RODRIGUES, L. Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: Application of a MINLP network equilibrium model. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v. 127, p. 105249, 2019.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1997.
- BRASIL. **Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002**. Institui o Código Civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 139, n. 8, 2002.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria nº 251, de 9 de agosto de 2010**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 ago. 2010.

BRASIL. Ministério da Fazenda. **Ministério da Fazenda revisa PIB e aponta perspectivas positivas para economia brasileira em 2023**. 2023. Disponível em: www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2023/maio/ministerio-da-fazenda-revisa-pib-e-aponta-perspectivas-positivas-para-economia-brasileira-em-2023. Acesso em: 10 aBr. 2024.

RODRIGUES, L. N.; PELLEGRINO, G. Q.; VIEIRA, S. R. Pegada hídrica da cana-de-açúcar no estado do Paraná. **Revista Paranaense de Agricultura**, v. 19, n. 1, p. 135–144, 2023.

CAMPOS, N.; STUDART, T. **Gestão das águas: princípios e práticas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 198 p.

CARVALHO, C. P. O. Novas estratégias competitivas para o novo ambiente institucional: o caso do setor sucroalcooleiro em Alagoas: 1990/2001. *In*: MORAES, M. A. F. D.; SHIKIDA, P. F. A. (org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: Evolução, desenvolvimento e desafio**. São Paulo: Atlas, 2002.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O.; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15210/rbes.v4i1.11576>.

APARECIDO, L. E. O. *et al.* Climate efficiency for sugarcane production in Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, p. 1–12, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-83660-3.

BRANCO, R. *et al.* Zoneamento agroambiental e perspectivas da cana-de-açúcar no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Agrária**, v. 14, n. 1, p. 72–90, 2019.

BRASIL. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

FERRARINI, R. R. A irrigação e os desafios da sustentabilidade hídrica na agricultura brasileira. **Revista Irriga**, v. 27, n. 2, p. 343–358, 2022. DOI: 10.15809/irriga.2022v27n2p343.

FERREIRA, M. R. *et al.* Sugarcane yield future scenarios in Brazil as projected by the DSSAT/CANEGRO model. **Agricultural Systems**, v. 188, p. 103019, 2021. DOI: 10.1016/j.agry.2020.103019.

LEITE, R. P. *et al.* Efeitos do estresse hídrico e térmico na produtividade da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1481–1488, 2008.

MARIN, F. R. *et al.* Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, v. 117, p. 149–162, 2013. DOI: 10.1007/s10584-012-0559-1.

MONTEIRO, J. E. B. A. Estimativa de perdas de produtividade da cana-de-açúcar por déficit hídrico no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 604–610, 2012.

PIRES, R. C. M. *et al.* Mudanças climáticas e produtividade agrícola: uma análise da cana-de-açúcar no Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 370–389, 2021.

VIANNA, L. T.; SENTELHAS, P. C. Zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 22, n. 1, p. 1–14, 2014.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. **Water International**, [s.l.], v. 33, n. 1, p. 19–32, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060801927812>.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E.; OLIVEIRA, D. M.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 211, p. 173-184, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>.

CIAGRO. Instituto Agrônomo – Fundag. **Portal Agrometeorológico e Hidrológico do Estado de São Paulo**. 2023. Disponível em: <http://www.ciiagro.org.br/diario/periodo>. Acesso em: 10 dez. 2023.

COAKLEY, S. M.; SCHERM, H.; CHAKRABORTY, S. Climate change and plant disease management. **Annual Reviews of Phytopathology**, [s.l.], v. 37, p. 399–426, 1999.

COSTA, D. H.; MONDARDO, M. L. A modernização da agricultura no Oeste baiano: migração e novas territorialidades. **Revista Geonorte**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 520–536, 2013.

EISENBERG, P. L. **Modernização sem mudança**: a indústria açucareira em Pernambuco, 1840-1910. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1977. 294 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Argissolos**. 2017a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos>. Acesso em: 10 abr. 2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Fenologia**. 2022. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas/fenologia>. Acesso em: 13 jul. 2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Latossolos**. 2017b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos>. Acesso em: 10 abr. 2024.

FERRARINI, A. dos S. F. A agricultura irrigada no Paraná: expansão de áreas e uso de recursos hídricos. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, [s.l.], v. 43, n. 142, p. 41–59, 2022.

FUHRER, J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s.l.], v. 97, p. 1–20, 2003.

GOUVÊA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 66, n. 5, p. 593–605, 2009.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M. **Manual de avaliação da pegada hídrica**: Estabelecendo o padrão global. Tradução: Solução Supernova. Oxford: Earthscan, 2011.

HOEKSTRA, R.; VAN DEN BERGH, J. Structural decomposition analysis of physical flows in the economy. **Environmental and Resource Economics**, [s.l.], v. 23, p. 357–378, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021234216845>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Ituverava**. 2023a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ituverava/panorama>. Acesso em: 10 abr. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Jales**. 2023b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/jales/panorama>. Acesso em: 10 abr. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PAM - Produção Agrícola Municipal**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ICHIKAWA, A. **Global warming – the challenges**. A report of Japan's global warming initiative. New York: Springer, 2004.

IEA. Instituto de Economia Agrícola. **SP expande produtividade da cana-de-açúcar com tecnologia, pesquisa e clima favorável**. 2024. Disponível em: <https://www.agricultura.sp.gov.br/pt/b/sp-expande-produtividade-da-cana-de-acucar-com-tecnologia-pesquisa-e-clima-favoravel-1#:~:text=S%C3%A3o%20Paulo%20lidera%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o,a%C3%A7%C3%BAcar%20representou%2087%25%20do%20total>. Acesso em: 10 abr. 2024.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 89, p. 107–122, 2004.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Agrometeorologia dos cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. José Eduardo Monteiro (org.). INMET: Brasília, 2009. 530 p.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. A.; VENTURINI FILHO, W. G. Reguladores vegetais e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em meio de safra. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 1843-1850, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000600024>.

LICKS, E. B. **Viabilidade de irrigação para a produção de cana-de-açúcar nos municípios de Araçatuba e de Piracicaba**. 2020. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

MEKONNEN, M.; HOEKSTRA, A. Y. **National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption**. Value of Water Research Report Vo. 50. Delft, The Netherlands: UNESCO: 2011.

MELO, J. E. **O açúcar no café: agromanufatura açucareira e modernização em São Paulo (1850-1910)**. 487 f. 2009. Tese (Doutorado em História) – Departamento de História, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

METEOBLUE. **Mudança climática São Paulo**. 2024. Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/climate-change/s%C3%A3o-paulo_brasil_3448439. Acesso em: 20 set. 2024.

MONTEIRO, L. A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MORGAN, J. A.; LECAIN, D. R.; PENDALL, E.; BLUMENTHAL, D. M.; KIMBALL, B. A.; CARRILLO, Y.; WILLIAMS, D. G.; WHITE, J. H.; DIJKSTRA, F. A.; WEST, M. C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. **Nature**, [s.l.], v. 476, p. 202–205, 2011.

NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; MARENGO, J. A.; SALATI, E. Impact of climate change scenarios for 2100 on the biomes of South America. *In: First International CLIVAR Conference*, Baltimore, USA, 21-25 June 2004.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Uso sustentável de água e energia é tema central de simpósio global**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/185822-uso-sustent%C3%A1vel-de-%C3%A1gua-e-energia-%C3%A9-tema-central-de-simp%C3%B3sio-global>. Acesso em 10 abr. 2024.

PATTERSON, D. T.; WESTBROCK, J. K.; JOYCE, R. J. V.; LINGREN, P. D.; ROGASIK, J. Weeds, insects and diseases. **Climate Change**, [s.l.], v. 43, p. 711–727, 1999.

PEREIRA, F. M. **Águas para o futuro: (re)definindo o uso da água de forma sustentável do Açude Luiz Oliveira (Paraíso) em São Francisco, Paraíba**. 2022. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Campina Grande, Cajazeiras, 2022.

PERRUCCI, G. **A república das usinas**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1978.

PIRES, M. O. Programas agrícolas na ocupação do Cerrado. **Sociedade e Cultura**, Goiânia, v. 3, n. 1, p. 111–131, 2000. DOI: <https://doi.org/10.5216/sec.v3i1.459>.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 297–305, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200008>.

PRADO, H. **Pedologia fácil: aplicação em solos tropicais**. 4. ed. Piracicaba: Hélio do Prado, 2013. 284 p.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Uberlândia: EdUFU, 2020. 272 p.

ROSSI, M.; NALON, M. A.; KANASHIRO, M. M. **Atlas de suscetibilidades dos solos do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Ambientais, 2022. 99 p.

SABADIN, J. F. G. **Avaliação de modelo agrometeorológico para tolerância de genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) ao déficit hídrico**. 78 f. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo Piracicaba, 2013.

SIBCS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SIGRH. Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos. **Cobrança pelo uso da água**. Portal SigRH, 2023. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cobrancapelousodaagua>. Acesso em: 12 maio 2024.

TAVARES, A. S.; JUNIOR, H. M.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R. L. Modelos de erosão hídrica e tolerância das perdas de solo em latossolos distróficos no Sul de Minas Gerais. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. especial, n. 12, p. 268–277, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132694>.

GUERRA, A.; BARBOSA, A. M.; GUIDORIZZI, K. A.; SOUZA, G. M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. *Revista Agrarian*, v. 7, n. 24, p. 36-42, 2014.

TEIXEIRA, M. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. Equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 693–699, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400001>.

THOMSON, L. J.; MACFADYEN, S.; HOFFMANN, A. A. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. **Biological Control**, [s./], v. 52, p. 296–306, 2010.

Adicionar

Bustamante, M. M. C., Nobre, C. A., Smeraldi, R., Aguiar, A. P., Barioni, L. G., Ferreira, L. G., ... & Ometto, J. P. (2012). Estimativas de emissões de gases de efeito estufa do setor agropecuário brasileiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(2), 411-424.

Marengo, J. A., Cunha, A. P., & Alves, L. M. (2020). A seca de 2010 na Amazônia: impactos, variabilidade e previsibilidade. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(1), 77-89.

Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M., & Farias, J. R. (2015). Impacto das mudanças climáticas sobre a produção agrícola brasileira. *Ciência Rural*, 45(5), 747-754.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. (2023). Emissões do setor agropecuário no Brasil. Disponível em: seeg.eco.br.