UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – DECIV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

MARCELLA CYNTHIA CAVALCANTE DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIÕES DE AGRESTE E ZONA DA MATA EM PERNAMBUCO: SUBSÍDIOS PARA MELHORES PRÁTICAS DE MANEJO DA ÁGUA

RECIFE

2025

MARCELLA CYNTHIA CAVALCANTE DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIÕES DE AGRESTE E ZONA DA MATA EM PERNAMBUCO: SUBSÍDIOS PARA MELHORES PRÁTICAS DE MANEJO DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Lourdinha Florencio

RECIFE

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Araujo, Marcella Cynthia Cavalcante de.
Avaliação da pegada hídrica do cultivo de cana-de-açucar em regiões de Agreste e Zona da Mata em Pernambuco: subsídios para melhores práticas de manejo da água / Marcella Cynthia Cavalcante de Araujo. - Recife, 2025.
101 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.
Orientação: Lourdinha Florêncio.
Inclui referências e apêndices.

1. Fatores climáticos; 2. Cultivo agrícola; 3. Agricultura irrigada; 4. Precipitação; 5. Manejo de recursos hídricos; 6. Cropwat. I. Florêncio, Lourdinha. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

MARCELLA CYNTHIA CAVALCANTE DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIÕES DE AGRESTE E ZONA DA MATA EM PERNAMBUCO: SUBSÍDIOS PARA MELHORES PRÁTICAS DE MANEJO DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em ___/___/____

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva – PPGEC/UFPE

_____
Prof. Dra. Simone Machado Santos – UFPE

_____
Prof. Dr. Elvis Carissimi – UFSM

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa muito mais do que o encerramento de uma etapa acadêmica. É a materialização de um percurso cheio de desafios, superações e aprendizados que, em muitos momentos, pareceram intransponíveis. Por isso, este trabalho não seria possível sem o apoio de pessoas fundamentais ao longo da caminhada.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me sustentar nos momentos de maior incerteza e por renovar minha esperança mesmo quando pensei em desistir — sempre com a intercessão de Nossa Senhora do Carmo, cuja presença e proteção me acompanharam em cada etapa dessa jornada.

Ao meu marido, Frederico, minha eterna gratidão pela paciência, compreensão e apoio incondicional durante todo esse tempo. Aos meus filhos, Francisco e Marina, que são a razão da minha força diária, minha fonte constante de motivação e amor. Aos meus avós e à minha mãe, que não mediram esforços para me proporcionar uma educação sólida e sempre me ensinaram que o conhecimento é o melhor caminho. À minha irmã, pelo companheirismo e por estar sempre ao meu lado, pronta para me ajudar em todos os momentos.

À Professora Doutora Lourdinha Florêncio, deixo um agradecimento muito especial pela orientação dedicada e escuta atenta. Sua generosidade e firmeza foram essenciais para que este trabalho se tornasse realidade.

Sou também muito grata ao amigo Jocimar, por sua presença fundamental ao longo deste processo. Seu apoio foi decisivo nos momentos mais difíceis, ajudando-me a encontrar caminhos quando tudo parecia mais incerto.

Durante a jornada, enfrentei obstáculos que colocaram à prova minha motivação e confiança. Ainda assim, esses momentos me ensinaram sobre resiliência, paciência e sobre a importância de estar cercada por pessoas que verdadeiramente acreditam na nossa trajetória.

Aos colegas, professores e a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho, deixo minha sincera gratidão.

A todos vocês, meu muito obrigada!

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do Brasil, tendo grande relevância nas indústrias de açúcar e etanol. O presente estudo tem como objetivo analisar a Pegada Hídrica (PH) do cultivo de cana-de-açúcar nas bacias hidrográficas dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, localizadas no estado de Pernambuco, com ênfase nas regiões do Agreste e da Zona da Mata. A metodologia adotada para calcular a Pegada Hídrica envolveu a avaliação dos componentes de água verde (precipitação) e água azul (irrigação), com o cálculo da quantidade de água necessária para o cultivo proveniente da precipitação e da irrigação, respectivamente. Para estimar essa demanda hídrica, foi utilizado o software CROPWAT 8.0, uma ferramenta desenvolvida pela FAO que permite simular as necessidades hídricas das culturas agrícolas com base em dados climáticos, de solo e de cultivo, sendo fundamental para a obtenção de resultados precisos neste trabalho. Ademais, foi realizada uma análise de correlação de Pearson para investigar a relação entre os componentes da PH e variáveis climáticas, como precipitação, evapotranspiração potencial, temperatura média, umidade relativa do ar e insolação, visando identificar os fatores climáticos mais influenciam a demanda hídrica nas duas regiões estudadas. Os resultados indicaram que, na região do Agreste, a PH total apresentou valores significativamente mais elevados, variando de 329,60 m³/ton a 377,15 m³/ton, com a PH azul, relacionada à irrigação, sendo a principal responsável por essa alta demanda hídrica, especialmente em períodos de seca. Em contrapartida, na Zona da Mata, a PH total variou entre 239,85 m³/ton e 248,15 m³/ton, com uma maior contribuição da precipitação, refletindo a predominância da PH verde. A análise de correlação de Pearson mostrou que, em ambas as regiões, a precipitação e a evapotranspiração potencial foram os fatores climáticos mais determinantes na dinâmica hídrica. No Agreste, a alta dependência de irrigação e a sensibilidade à evapotranspiração destacam a necessidade de estratégias de manejo hídrico mais eficientes. Já na Zona da Mata, apesar de a precipitação também apresentar influência, a evapotranspiração se mostrou o fator climático mais relevante, no geral. Diante desse cenário, pode-se sugerir estratégias de manejo adaptadas às características locais. No Agreste, onde os solos são mais arenosos, recomenda-se a adoção de sistemas de irrigação eficientes, como o gotejamento, e a implementação de práticas de conservação do solo, como a cobertura vegetal e a adição de matéria orgânica. Na Zona da Mata, com solos mais argilosos, o foco deve ser o manejo adequado da umidade do solo, com a utilização de práticas como a descompactação e os sistemas agroflorestais. Assim, a Pegada Hídrica se configura como um indicador essencial para a formulação de políticas públicas voltadas ao manejo sustentável dos recursos hídricos e do solo, contribuindo para a resiliência da produção agrícola e para a preservação ambiental.

Palavras-chave: fatores climáticos; cultivo agrícola; agricultura irrigada; precipitação; manejo de recursos hídricos, cropwat 8.0.

BSTRACT

Sugarcane is one of the main crops in Brazil, playing a significant role in the sugar and ethanol industries. This study aims to analyze the Water Footprint (WF) of sugarcane cultivation in the river basins of Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, and Una, located in the state of Pernambuco, with an emphasis on the Agreste and Zona da Mata regions. The methodology adopted to calculate the Water Footprint involved the assessment of the green water (precipitation) and blue water (irrigation) components, calculating the amount of water required for cultivation from rainfall and irrigation, respectively. To estimate this water demand, the CROPWAT 8.0 software was used—a tool developed by the FAO that simulates crop water requirements based on climatic, soil, and crop data—proving essential for obtaining accurate results in this study. In addition, a Pearson correlation analysis was performed to investigate the relationship between the WF components and climatic variables, such as precipitation, potential evapotranspiration, average temperature, relative humidity and sunlight, aiming to identify the climatic factors that most influence water demand in the two regions studied. The results indicated that, in the Agreste region, the total PH presented significantly higher values, ranging from 329.60 m^3/ton to 377.15 m^3/ton, with the blue PH, related to irrigation, being the main responsible for this high water demand, especially in dry periods. In contrast, in the Zona da Mata, the total PH varied between 239.85 m^3/ton and 248.15 m^3/ton, with a greater contribution from precipitation, reflecting the predominance of the green PH. Pearson's correlation analysis showed that, in both regions, precipitation and potential evapotranspiration were the most determining climatic factors in water dynamics. In the Agreste, the high dependence on irrigation and sensitivity to evapotranspiration highlight the need for more efficient water management strategies. In the Zona da Mata, although precipitation also has an influence, evapotranspiration proved to be the most relevant climate factor overall. Given this scenario, management strategies adapted to local characteristics can be suggested. In the Agreste region, where soils are more sandy, it is recommended to adopt efficient irrigation systems, such as drip irrigation, and to implement soil conservation practices, such as plant cover and the addition of organic matter. In the Zona da Mata region, with more clayey soils, the focus should be on adequate soil moisture management, using practices such as decompaction and agroforestry systems. Thus, the Water Footprint is an essential indicator for the formulation of public policies aimed at the sustainable management of water and soil resources, contributing to the resilience of agricultural production and environmental preservation.

Keywords: climatic factors; agricultural cultivation; irrigated agriculture; precipitation; water resource management, cropwat 8.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de Irrigação por superfície	17
Figura 2	Sistema de Irrigação por aspersão	18
Figura 3	Sistema de Irrigação localizada	18
Figura 4	Desenvolvimento da Cana-de-açúcar	21
Figura 5	Localização das bacias hidrográficas em estudo	31
Figura 6	Fluxograma dos processos metodológicos empregados	34
Figura 7	Precipitação anual nas regiões de Agreste (A) e Zona da Mata (B), nas bacias do rio Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una	46
Figura 8	Produtividade de Cana-de-açúcar, nas regiões de Agreste (A) e Zona da Mata (B), nas bacias do rio Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una	47
Figura 9	Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata	48
Figura 10	Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata	51
Figura 11	Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata	55
Figura 12	Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Una, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata	56
Figura 13	Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Capibaribe, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata	72
Figura 14	Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Ipojuca, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata	74
Figura 15	Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Sirinhaém, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata	75
Figura 16	Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Una, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata	76
Figura 17	Evolução do uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas em estudo, entre 2010 e 2019	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo dos dados de entrada para o CROPWAT 8.0	36
Tabela 2	Fator de ajuste (Cv)	37
Tabela 3	Estações bases para coleta de dados climatológicos, na área de Agreste	38
Tabela 4	Estações bases para coleta de dados climatológicos, na área de Zona da Mata e Litoral	38
Tabela 5	Dados de solo para a região de Agreste	39
Tabela 6	Dados de solo para a região de Zona da Mata	40
Tabela 7	Dados da cultura para a região de Agreste	40
Tabela 8	Dados da cultura para a região de Zona da Mata	41
Tabela 9	Resultados de p para a bacia do rio Capibaribe, região de Agreste ($p \leq 0.05$)	60
Tabela 10	Resultados de p para a bacia do rio Capibaribe, região de Zona da Mata e Litoral ($p \leq 0.05$)	60
Tabela 11	Resultados de p para a bacia do rio Ipojuca, região de Agreste ($p \leq 0.05$)	61
Tabela 12	Resultados de p para a bacia do rio Ipojuca, região de Zona da Mata e Litoral ($p \leq 0.05$)	62
Tabela 13	Resultados de p para a bacia do rio Sirinhaém, região de Agreste ($p \leq 0.05$)	62
Tabela 14	Resultados de p para a bacia do rio Sirinhaém, região de Zona da Mata ($p \leq 0.05$)	63
Tabela 15	Resultados de p para a bacia do rio Una, região de Agreste ($p \leq 0.05$)	64
Tabela 16	Resultados de p para a bacia do rio Una, região de Zona da Mata ($p \leq 0.05$)	64
Tabela 17	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, região de Agreste	65
Tabela 18	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, região de Zona da Mata	65
Tabela 19	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, região de Agreste	66
Tabela 20	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, região de Zona da Mata	67

Tabela 21	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, região de Agreste	68
Tabela 22	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, região de Zona da Mata	68
Tabela 23	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Una, região de Agreste	70
Tabela 24	Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Una, região de Zona Mata	70
Tabela 25	Resumo das possíveis intervenções na irrigação, para a área de Agreste, considerando as variáveis climatológicas mais influentes	78
Tabela 26	Resumo das possíveis intervenções na irrigação, para a área de Zona da Mata/Litoral, considerando as variáveis climatológicas mais influentes	79

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**11**
2	**OBJETIVO**	**14**
2.1	**Objetivos Específicos**	**14**
3	**REVISÃO DE LITERATURA**	**15**
3.1	**Agricultura irrigada**	**15**
3.1.1	SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	16
3.2	**Cultivo de Cana-de-Açúcar**	**19**
3.2.1	CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO	22
3.3	**Demanda hídrica para agricultura**	**23**
3.3.1	FATORES AMBIENTAIS E CLIMÁTICOS INTERVENIENTES	25
3.4	**Pegada hídrica**	**28**
4	**METODOLOGIA**	**31**
4.1	**Área de estudo**	**31**
4.2	**Estimativa da Pegada Hídrica**	**34**
4.2.1	CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO FAO	36
4.2.2	COLETA DE DADOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS	37
4.2.3	DADOS DE SOLOS	39
4.2.4	DADOS DA CULTURA	40
4.3	**Análise de variância (ANOVA) e análise de correlação das variáveis climatológicas**	**41**
4.4	**Análise de componentes principais (ACP)**	**42**
4.5	**Uso e Ocupação do Solo**	**43**
5	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	**45**
5.1	**Estimativa da Pegada Hídrica**	**45**
5.2	**Análise Estatística**	**59**
5.3	**Evolução do uso e ocupação do solo**	**82**
6	**CONCLUSÃO**	**86**
	REFERÊNCIAS	**88**
	APENDICÊS	**99**

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada representa a atividade humana de maior demanda por recursos hídricos em escala global, correspondendo a aproximadamente 70% do consumo total de água doce do planeta (Stevens et al., 2021). Esse contexto evidencia tanto a importância da irrigação para a segurança alimentar quanto os desafios relacionados à gestão sustentável da água em regiões com disponibilidade hídrica limitada (Xiong et al., 2022). No Brasil, a agricultura irrigada possui relevância econômica e social expressiva, especialmente no semiárido, onde baixos índices pluvio

métricos e chuvas irregulares acentuam a dependência de fontes hídricas artificiais para a produção agrícola (Chapagain e Hoekstra, 2004; Vanham e Mekonnen, 2021). A água, portanto, configura-se como um insumo essencial ao desenvolvimento das plantas e ao sucesso da produção agrícola.

A gestão eficiente dos recursos hídricos tornou-se um aspecto fundamental para o desenvolvimento sustentável, especialmente em regiões onde a disponibilidade de água condiciona a continuidade das atividades produtivas (Aringo et al., 2022). Em Pernambuco, a cultura da cana-de-açúcar desempenha papel central na economia, sendo uma das principais atividades agrícolas e industriais do estado (Dutra Filho et al. 2021). Contudo, sua elevada demanda hídrica exige uma análise criteriosa dos impactos sobre os mananciais, especialmente nas bacias hidrográficas dos rios Sirinhaém, Capibaribe, Ipojuca e Una, que abrangem desde áreas semiáridas, onde essas bacias se originam, até zonas litorâneas, onde deságuam.

Em regiões de chuvas escassas ou irregulares, a irrigação é essencial para suprir a necessidade hídrica das culturas. A eficiência na gestão da água no setor agrícola é determinante para a otimização da produção e a promoção da sustentabilidade ambiental (Berbel et al., 2018; Silva, 2020). O manejo agrícola sustentável e a conservação dos recursos hídricos são estratégias essenciais para garantir a segurança alimentar e mitigar impactos ambientais negativos (Folegatti et al., 2010; Galli et al., 2012; Bortolini et al., 2018).

Nesse contexto, surge o conceito de Pegada Hídrica (PH), um indicador do uso da água que considera tanto o consumo direto quanto indireto por consumidores ou produtores (Pfister et al., 2009). Esse indicador permite avaliar o impacto ambiental do uso da água e identificar oportunidades para uma gestão mais eficiente (Chapagain e Hoekstra, 2004). A Pegada Hídrica é composta por três subindicadores: Azul, Verde e

Cinza. A Pegada Hídrica Azul refere-se à quantidade de água doce superficial e subterrânea consumida diretamente em processos industriais, agrícolas ou urbanos (Quinteiro et al., 2022). A Pegada Hídrica Verde corresponde à água da chuva utilizada pelas plantas no crescimento e desenvolvimento (Cao et al., 2020). Já a Pegada Hídrica Cinza representa o volume de água necessário para diluir poluentes e garantir padrões de qualidade aceitáveis (Hoekstra et al., 2011).

A aplicação desse conceito possibilita a identificação das diferentes fontes de água utilizadas ao longo da produção agrícola (De Boer et al., 2013). Em regiões com precipitações regulares, a água verde desempenha papel predominante na manutenção das lavouras (Cao et al., 2020). Por outro lado, em áreas com chuvas escassas ou irregulares, a dependência da água azul é maior, aumentando a pressão sobre os recursos hídricos locais (Fuerte-Velázquez et al., 2024). Além disso, a Pegada Hídrica Cinza permite mensurar os impactos indiretos da agricultura sobre a qualidade da água, contribuindo para estratégias de mitigação dos efeitos ambientais (Hoekstra et al., 2011).

No setor agrícola, a Pegada Hídrica compreende tanto a água utilizada na irrigação quanto a incorporada nos insumos agrícolas e nos processos produtivos (Carvalho et al., 2000; Le Roux et al., 2017). Culturas como cana-de-açúcar, arroz, tomate, feijão e milho demandam volumes significativos de água, podendo gerar impactos expressivos na disponibilidade hídrica local e nos ecossistemas aquáticos (Chapagain e Hoekstra, 2004).

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do Brasil, desempenhando um papel fundamental na economia agrícola do país. O Brasil é o maior produtor mundial, com destaque para os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Pernambuco. A cultura é amplamente utilizada para a produção de açúcar e etanol, sendo um dos pilares do setor sucroalcooleiro nacional (Bellezoni et al., 2018).

A produção e o cultivo depende de condições climáticas favoráveis e de técnicas adequadas de irrigação e manejo, essenciais para garantir altos rendimentos e a sustentabilidade da atividade (Cardozo et al., 2018). A cana-de-açúcar, portanto, não apenas contribui para a economia regional e nacional, mas também demanda um planejamento cuidadoso e tecnologias inovadoras para garantir sua viabilidade a longo prazo em um cenário de mudanças climáticas e crescente demanda por recursos naturais (Kumar et al., 2024).

Neste contexto, a cana-de-açúcar é uma planta de clima tropical, que se desenvolve melhor em temperaturas elevadas e com boa disponibilidade de luz solar,

características típicas das regiões onde é cultivada (Obidzinski et al., 2015). Seu crescimento é favorecido por solos profundos e bem drenados, com alta fertilidade, embora a cultura possa se adaptar a diferentes tipos de solo, desde que sejam adotadas práticas adequadas de manejo e correção. A planta possui um ciclo que varia de 10 a 18 meses, dependendo da variedade e das condições climáticas, e sua colheita pode ser realizada de forma manual ou mecanizada, com impactos significativos na produtividade e na sustentabilidade do cultivo (Caversan et al., 2022).

Em Pernambuco, a produção de cana-de-açúcar concentra-se na Zona da Mata, região com condições climáticas propícias ao cultivo (Dutra Filho et al. 2021). No entanto, a atividade enfrenta desafios relacionados à disponibilidade hídrica, especialmente devido às variações pluviométricas e à necessidade de irrigação complementar em períodos secos (Vitorino et al., 2025). A eficiência no uso da água torna-se, portanto, um fator essencial para a sustentabilidade da produção, exigindo estratégias de gestão que minimizem os impactos ambientais e garantam a viabilidade da cultura a longo prazo.

Portando, a estimativa da Pegada Hídrica (PH) da cana-de-açúcar constitui uma ferramenta essencial para avaliar o impacto do cultivo sobre os recursos hídricos e para fomentar práticas agrícolas alinhadas aos princípios da sustentabilidade. Essa determinação da PH possibilita a quantificação do volume total de água consumido, tanto de forma direta quanto indireta, ao longo de todo o ciclo do cultivo, desde o plantio até a colheita, fornecendo dados precisos sobre a eficiência no uso desse recurso vital. Essa análise reveste-se de particular importância em regiões como o Agreste e a Zona da Mata de Pernambuco, onde a disponibilidade hídrica apresenta significativa variabilidade e a competição pelo uso da água entre diferentes setores econômicos é intensa.

2 OBJETIVO

Estimar a pegada hídrica do cultivo da cana-de-açúcar nas bacias hidrográficas dos rios Sirinhaém, Capibaribe, Ipojuca e Una, no estado de Pernambuco, considerando a influência dos fatores climáticos que mais impactam o consumo de água para irrigação. Além disso, com base na relação entre a demanda hídrica e as variáveis climáticas, busca-se propor estratégias que contribuam para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região.

2.1 Objetivos Específicos

1 – Estimar a Pegada Hídrica da Cana-de-Açúcar nas bacias hidrográficas de Pernambuco na década de 2010;
2 – Analisar estatisticamente os fatores climatológicos que exercem influência na pegada hídrica;
3 – Avaliar a evolução das áreas cultivadas de Cana de Açucar entre 2010 e 2019;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Agricultura irrigada

A agricultura irrigada consiste em uma prática agrícola que envolve o fornecimento artificial de água às plantas, com o objetivo de suprir as necessidades hídricas das culturas, especialmente em regiões onde a precipitação pluviométrica é insuficiente ou mal distribuída ao longo do ano (Macan et al., 2017). O conceito de irrigação remonta a civilizações antigas, sendo uma das principais inovações tecnológicas responsáveis pela transformação da agricultura em várias partes do mundo. É de conhecimento comum que este método de cultivo é fundamental para a produção de alimentos, fibras e outros produtos agrícolas, permitindo a expansão das áreas agricultáveis para regiões de clima árido e semiárido, onde a escassez de água naturalmente limitaria a agricultura convencional (Amaral, 2005).

Historicamente, a irrigação tem sido utilizada desde as primeiras civilizações, como as do Egito e Mesopotâmia, onde sistemas complexos de canais e reservatórios foram desenvolvidos para distribuir água de maneira controlada para as terras agrícolas (Barreto, 2022). Essas primeiras formas de irrigação eram baseadas no uso de fontes de água próximas, como rios e lagos, e dependiam de métodos manuais ou de sistemas rudimentares de bombeamento. Ao longo dos séculos, com o avanço da ciência e da tecnologia, a irrigação passou a ser mais sistemática, com a introdução de novas técnicas, como a irrigação por gravidade, aspersão e gotejamento, que oferecem maior eficiência no uso da água (Ribeiro et al., 2017).

As necessidades da agricultura irrigada são múltiplas e complexas, dependendo de fatores climáticos, hidrológicos e de solo. Para garantir o bom desenvolvimento das culturas, é essencial que a irrigação forneça água em quantidades adequadas, com a frequência necessária para atender às demandas das plantas em diferentes estágios de crescimento (Hill, 1994). Ademais, o manejo da irrigação deve levar em consideração diversos fatores, como o tipo de solo, a evapotranspiração, as condições climáticas locais e as características das culturas (Franzluebbers, 2021). A gestão eficiente da irrigação é, portanto, um dos pilares para a sustentabilidade da agricultura, pois o uso inadequado da água pode resultar em desperdício, salinização do solo e redução da produtividade.

A necessidade de irrigação em áreas agrícolas é determinada por diversos fatores, sendo o principal deles a variabilidade climática. Regiões com climas secos ou com

estações secas prolongadas exigem sistemas de irrigação para garantir uma produção agrícola estável. Assim, a irrigação desempenha um papel crucial na melhoria da eficiência na utilização dos recursos naturais, já que permite uma melhor alocação da água disponível, aumentando a produção de alimentos e minimizando a pressão sobre fontes naturais de água (Braden et al., 2011).

A irrigação se tornou particularmente importante em países em desenvolvimento, onde o crescimento populacional e a expansão da agricultura demandam soluções inovadoras para garantir a segurança alimentar. Nesse contexto, a agricultura irrigada é vista não apenas como uma técnica para aumentar a produtividade, mas também como um instrumento para o desenvolvimento econômico e social, especialmente em regiões áridas e semiáridas (Nóbrega, 2019). Entretanto, a implementação de sistemas de irrigação envolve custos elevados, tanto na infraestrutura necessária quanto na operação e manutenção dos sistemas, o que exige um planejamento adequado para garantir sua viabilidade econômica (Fernandes et al., 2018).

Neste sentido, a eficiência na utilização da água é uma preocupação crescente, já que a irrigação mal planejada pode levar à escassez de recursos hídricos, principalmente em regiões com disponibilidade limitada de água. O uso excessivo de água de irrigação pode causar uma série de problemas ambientais, como a salinização dos solos, que compromete a produtividade agrícola a longo prazo (Ferreira, 2011). Por isso, nos últimos anos, têm sido desenvolvidas tecnologias mais eficientes, como a irrigação por gotejamento, que permite uma distribuição mais precisa da água, reduzindo as perdas e promovendo uma maior sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.

3.1.1 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Para garantir uma irrigação eficiente, é fundamental conhecer os diferentes sistemas e métodos disponíveis, que variam de acordo com as características do solo, o tipo de cultura e a disponibilidade de recursos hídricos (Loss et al., 2019). A irrigação é uma prática essencial para maximizar a produtividade agrícola, especialmente em regiões onde a precipitação é irregular ou insuficiente.

Entre os principais sistemas utilizados, destacam-se a irrigação por superfície, por aspersão e os sistemas localizados, cada um com métodos específicos que influenciam diretamente a eficiência do uso da água. Os sistemas por superfície (Figura 1) são

caracterizados pela aplicação da água diretamente sobre o solo, utilizando a gravidade para distribuí-la ao longo do terreno, sendo amplamente adotados devido ao seu baixo custo de instalação e operação (Marouelli et al., 1996).

Dentro desse sistema, os métodos mais comuns incluem a irrigação por inundação, que consiste na aplicação uniforme da água sobre a superfície do solo, sendo muito utilizada em culturas como o arroz; a irrigação por sulcos, que direciona a água por canais abertos entre as fileiras de plantio, adequada para cultivos como milho e cana-de-açúcar; e a irrigação por faixas, que distribui a água em áreas niveladas, promovendo maior controle na infiltração (Andrade e Brito, 2006). Embora amplamente utilizados, os sistemas por superfície podem apresentar perdas de água por escoamento superficial e percolação profunda, exigindo um manejo adequado para otimizar sua eficiência.

Figura 1 - Sistema de Irrigação por superfície, chamado de irrigação por inundação

Fonte: Irrigat (2025)

Já os sistemas por aspersão (Figura 2), possuem seu funcionamento a partir da distribuição da água sob pressão, simulando a precipitação natural por meio de aspersores estrategicamente posicionados. Esse sistema inclui diferentes métodos: o convencional fixo, que utiliza tubulações permanentes para uma aplicação uniforme da água, sendo indicado para gramados, hortaliças e culturas perenes; o convencional móvel, que permite a realocação dos aspersores conforme necessário, garantindo maior flexibilidade; o pivô central, que opera com uma estrutura giratória para cobrir grandes áreas de forma automatizada, sendo amplamente empregado em cultivos como soja e milho; e o autopropelido, que utiliza aspersores montados em um sistema móvel, promovendo uma irrigação eficiente em áreas de médio porte (Martins et al., 2011).

As principais vantagem consistem na alta eficiência na aplicação da água sobre a cultura, podendo ser utilizado em uma ampla gama de culturas e tipos de solo, além da

economia de mão de obra e a possibilidade de aplicação controlada dos recursos hídricos (Faria et al., 2012). Apesar dessas vantagens, os sistemas por aspersão podem ser suscetíveis a perdas por evaporação e deriva do vento, tornando essencial um planejamento cuidadoso.

Figura 2 - Sistema de Irrigação por aspersão

Fonte: Maxmaq (2019)

Dentre os sistemas mais tradicionais, ainda há os sistemas de irrigação localizada (Figura 3), onde ocorre a aplicação da água diretamente na zona radicular das plantas, aumentando a eficiência no uso dos recursos hídricos e reduzindo desperdícios (Pimentel, 2017). Os principais métodos incluem o gotejamento, que libera a água de forma precisa através de emissores posicionados ao longo das linhas de plantio, sendo amplamente utilizado na fruticultura e horticultura; a microaspersão, que dispersa pequenas gotas de água sobre a superfície do solo, garantindo uma distribuição homogênea em áreas maiores, sendo ideal para culturas perenes e viveiros; e a irrigação subsuperficial, que aplica a água abaixo da superfície do solo, minimizando perdas por evaporação e reduzindo a proliferação de plantas daninhas (Salcedo et al., 2011).

Figura 3 - Sistema de Irrigação localizada, chamado de irrigação por gotejamento

Fonte: Cursos CPT (2017)

Apesar de altamente eficientes, os sistemas localizados requerem um investimento inicial mais elevado e manutenção rigorosa para evitar entupimentos nos emissores. A escolha do sistema de irrigação mais adequado depende de diversos fatores, como as características climáticas, a demanda hídrica das culturas, a qualidade da água disponível e os custos operacionais (Tessler, 2021). Dessa forma, compreende-se que a adoção de práticas de manejo sustentável e o uso de tecnologias que otimizem a aplicação da água são essenciais para garantir a produtividade agrícola e a conservação dos recursos hídricos.

3.2 Cultivo de Cana-de-Açúcar

O cultivo da cana-de-açúcar é uma atividade agrícola de grande importância econômica, especialmente em países tropicais e subtropicais, onde as condições climáticas são favoráveis ao seu desenvolvimento. Essa cultura pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, sendo caracterizada por seu alto potencial produtivo e elevada concentração de sacarose no colmo, o que a torna essencial para a produção de açúcar, etanol e diversos subprodutos (Caputo et al., 2008). A planta é nativa das regiões tropicais do sul e sudeste da Ásia e da região da Melanésia, englobando principalmente a ilha de Nova Guiné, ao norte da Austrália (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011).

A cultura é adaptada a climas tropicais e subtropicais, apresentando um bom desenvolvimento em temperaturas médias entre 20°C e 30°C. Embora a planta possa tolerar variações térmicas, temperaturas abaixo de 15°C reduzem significativamente seu crescimento, enquanto valores superiores a 38°C podem afetar a fotossíntese e o acúmulo de sacarose (Samui et al., 2014). A disponibilidade hídrica também é um fator determinante para a produtividade da cultura, sendo ideal um regime pluviométrico anual entre 1.200 mm e 1.800 mm, distribuídos ao longo do ciclo vegetativo. Em regiões onde a precipitação não é suficiente, a irrigação se torna essencial para garantir um bom desenvolvimento da lavoura, principalmente durante a fase inicial do crescimento (Caversan et al., 2022). Além disso, solos profundos, bem drenados e com boa capacidade de retenção de água são mais adequados para o cultivo, sendo que os solos argilosos tendem a proporcionar melhor suporte hídrico, enquanto os arenosos exigem maior manejo para evitar perdas de umidade. O pH ideal para a cana-de-açúcar varia entre 5,5 e 6,5, sendo necessária a correção da acidez do solo em condições adversas por meio da aplicação de calcário (Verma et al., 2019).

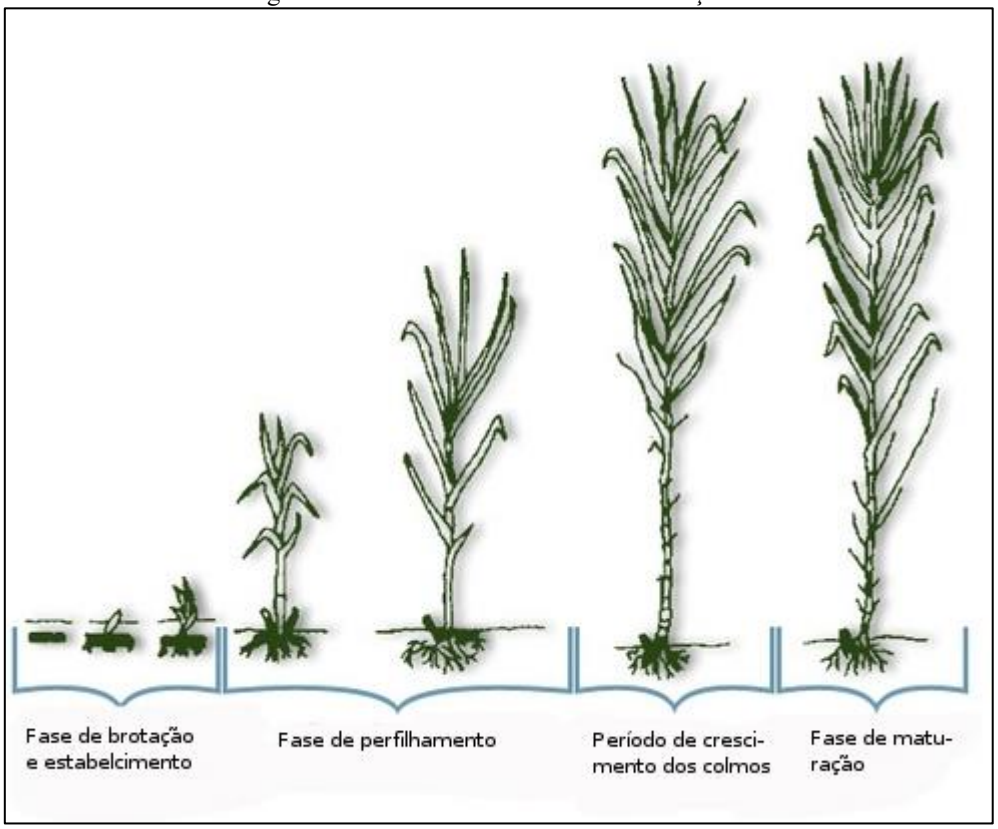
Do ponto de vista botânico, a cana-de-açúcar é uma gramínea perene de crescimento cespitoso, caracterizada por colmos longos e cilíndricos, que podem atingir alturas entre dois e seis metros, dependendo das condições ambientais e do manejo adotado (Casagrande, 1991). Seu sistema radicular é fasciculado e relativamente superficial, o que a torna sensível a déficits hídricos prolongados. As folhas são alternadas e apresentam uma bainha que envolve o colmo, sendo responsáveis pela captação de luz para a realização da fotossíntese. O colmo, principal parte econômica da planta, é composto por nós e entrenós, onde se acumulam os açúcares produzidos durante o ciclo de crescimento. A inflorescência da cana, chamada de ráquila, é uma panícula terminal que raramente se desenvolve em cultivos comerciais, pois a colheita geralmente ocorre antes da fase reprodutiva.

O ciclo de crescimento da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro estágios principais: germinação, crescimento vegetativo, maturação e colheita. O ciclo total da cultura pode variar entre 270 e 450 dias, dependendo da variedade cultivada, das condições ambientais e do manejo adotado. A germinação ocorre a partir de mudas vegetativas, denominadas toletes, que são segmentos de colmo contendo gemas viáveis. Esse processo tem duração média de 30 a 45 dias e é influenciado principalmente pela temperatura e umidade do solo. Durante essa fase, a absorção de água pelo tolete inicia a brotação das gemas, dando origem a novas plantas. O crescimento vegetativo é a fase mais longa do ciclo, ocorrendo entre 120 e 270 dias, dependendo da variedade e das condições ambientais. Esse estágio se caracteriza pela elongação dos colmos e pelo desenvolvimento foliar, período em que ocorre a maior absorção de água e nutrientes. Durante essa fase, fatores como disponibilidade hídrica, radiação solar e nutrição adequada são fundamentais para determinar o potencial produtivo da cultura (Castro e Kluge, 2001).

A fase de maturação ocorre nos últimos 90 a 150 dias do ciclo e é marcada pelo acúmulo de sacarose nos colmos, sendo influenciada por condições climáticas como redução da umidade e temperaturas mais amenas (Rossetto e Santiago, 2019). Durante esse período, a restrição da irrigação pode ser uma estratégia utilizada para estimular o acúmulo de açúcar e melhorar a qualidade da matéria-prima para a indústria. A colheita da cana-de-açúcar pode ser realizada manualmente ou mecanicamente, devendo ser conduzida no momento ideal para maximizar a produtividade e a concentração de sacarose nos colmos (Embrapa, 2022). Após a colheita, a rebrota da planta permite a obtenção de novos cortes, conhecidos como soqueiras, que podem ser explorados por

vários ciclos antes da necessidade de renovação do canavial. A Figura 4, ilustra de forma geral, o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Figura 4 - Desenvolvimento da Cana-de-açúcar



Fonte: Embrapa (2022)

A produtividade da cana-de-açúcar depende de uma série de fatores, incluindo manejo adequado da fertilização, controle de pragas e doenças, práticas conservacionistas do solo e uso eficiente da água. A aplicação de fertilizantes deve ser baseada na análise do solo e na demanda nutricional da cultura, sendo os macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio essenciais para um bom desenvolvimento. Ademais, o manejo integrado de pragas e doenças é fundamental para evitar perdas na produção, exigindo monitoramento contínuo e estratégias preventivas (Tokeshi, 2005).

Diante da importância da cana-de-açúcar para a economia e a produção de biocombustíveis, o uso de tecnologias avançadas, como o melhoramento genético, sistemas de irrigação eficientes e técnicas de manejo sustentável, torna-se essencial para garantir altos rendimentos e reduzir impactos ambientais. O desenvolvimento de variedades mais produtivas e resistentes a estresses hídricos e fitossanitários contribui significativamente para a sustentabilidade do setor, permitindo a manutenção da produtividade mesmo diante de adversidades climáticas.

3.2.1 CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO

O cultivo e a produção de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco possuem grande relevância histórica, econômica e social, sendo um dos pilares da agroindústria do estado. A cultura da cana está profundamente enraizada na economia pernambucana desde o período colonial, tendo desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento regional, especialmente na Zona da Mata. Desde o século XVI, os engenhos de açúcar tornaram-se centros de poder econômico e social, moldando a paisagem, a arquitetura e as relações de trabalho na região. Segundo Oliveira et al. (2018), os engenhos pernambucanos se configuravam como unidades produtivas complexas, integrando áreas de cultivo, processamento, moradia e práticas religiosas, cujo legado permanece vivo por meio dos vestígios arqueológicos encontrados no estado. O acervo preservado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) reforça essa herança, evidenciando a importância dos engenhos na constituição do patrimônio cultural brasileiro. Com o passar dos séculos, a produção se modernizou, incorporando novas tecnologias e práticas agrícolas mais eficientes para aumentar a produtividade e a sustentabilidade do setor. Atualmente, Pernambuco se destaca como um dos principais produtores de cana-de-açúcar do Nordeste brasileiro, abastecendo tanto a indústria sucroalcooleira quanto a produção de bioenergia (SOUZA et al., 2020).

A presença da cana-de-açúcar no estado ocorre predominantemente na Zona da Mata, onde as condições climáticas e edafológicas favorecem o desenvolvimento da cultura. A região apresenta um regime pluviométrico anual médio entre 1.200 mm e 1.800 mm, com chuvas concentradas no outono e inverno, e temperaturas médias variando entre 24°C e 28°C, características que proporcionam condições adequadas para o crescimento e maturação da cana (Barbosa e Morais, 2021). Os solos da Zona da Mata, majoritariamente argilosos e de elevada fertilidade, oferecem boas condições para a fixação e nutrição da planta, embora o manejo adequado do solo seja essencial para evitar a compactação e a erosão. Em contrapartida, no Agreste e no Sertão pernambucano, onde a precipitação é irregular e inferior a 800 mm anuais, o cultivo da cana enfrenta desafios relacionados à escassez hídrica, sendo necessário o uso de sistemas de irrigação para garantir a viabilidade produtiva.

No que diz respeito a produção, em Pernambuco, a cana-de-açúcar é direcionada principalmente para as indústrias de açúcar e etanol, que desempenham papel estratégico

na economia estadual (Vitorino et al., 2025). O estado abriga diversas usinas sucroalcooleiras, responsáveis pelo processamento da matéria-prima e pela produção de açúcar cristal, refinado e mascavo, além de etanol hidratado e anidro, utilizados como biocombustíveis (Dutra Filho et al., 2020). O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar tem se consolidado como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética nacional. Os subprodutos da moagem da cana, como o bagaço e a vinhaça, são aproveitados para a geração de energia elétrica e para a fertilização dos solos, promovendo a sustentabilidade da produção.

Em relação aos desafios do setor canavieiro pernambucano, as questões climáticas consistem nas principais dificuldades em razão da variabilidade pluviométrica que ocorre no estado. A escassez hídrica, especialmente nas áreas mais secas do estado, como o agreste e o sertão, exige a implementação de estratégias de manejo eficiente da água, como o uso de sistemas de irrigação localizada, que reduzem o desperdício e aumentam a produtividade da lavoura (Dutra Filho et al. 2021). Ademais, a diversificação das práticas agrícolas, incluindo a rotação de culturas e a adoção de sistemas agroflorestais, tem sido incentivada como forma de minimizar impactos ambientais e melhorar a qualidade do solo.

Apesar dos desafios, a canavicultura pernambucana continua sendo um setor estratégico para a economia estadual, gerando empregos diretos e indiretos, movimentando a indústria e contribuindo para o desenvolvimento regional. Dessa forma, o cultivo e a produção de cana-de-açúcar em Pernambuco permanecem como atividades essenciais para o estado, tanto do ponto de vista econômico quanto social e ambiental. O avanço tecnológico, aliado a práticas agrícolas sustentáveis e ao desenvolvimento de políticas públicas eficazes, é determinante para a continuidade do setor e para sua adaptação aos desafios do futuro, garantindo a competitividade e a sustentabilidade da produção no longo prazo.

3.3 Demanda hídrica para agricultura

A demanda hídrica para a agricultura é um dos aspectos fundamentais para a produção agrícola sustentável, sendo determinada por uma série de fatores climáticos, edafológicos e fisiológicos das culturas cultivadas. A necessidade de água na agricultura está diretamente relacionada à evapotranspiração das plantas, à disponibilidade hídrica

do solo e às características climáticas de cada região, tornando o manejo adequado da irrigação essencial para garantir a produtividade e a eficiência no uso dos recursos hídricos (Kindler, 1988). Com o aumento da demanda por alimentos e a crescente variabilidade climática, a gestão da água na agricultura torna-se um desafio crucial, exigindo estratégias que conciliem a produção agrícola com a conservação dos recursos hídricos.

Neste contexto, a referida demanda hídrica de uma cultura agrícola consiste na quantidade de água necessária para suprir a evapotranspiração durante todo o seu ciclo produtivo, garantindo seu pleno desenvolvimento e a obtenção de altos rendimentos (Xu et al., 2019). A evapotranspiração, que representa a soma da transpiração das plantas e da evaporação direta do solo, é um dos principais parâmetros utilizados para estimar essa demanda. Esse parâmetro é influenciado por variáveis climáticas como temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Em regiões de clima seco ou semiárido, onde a precipitação natural é insuficiente para atender às necessidades das culturas, a irrigação torna-se indispensável para suprir essa carência hídrica (Hua et al. 2023).

O tipo de solo também desempenha um papel determinante na demanda hídrica agrícola, pois suas propriedades físicas e químicas influenciam a capacidade de retenção de água e a disponibilidade para as plantas. Solos arenosos, por exemplo, possuem baixa capacidade de retenção de umidade e exigem irrigações mais frequentes, enquanto solos argilosos retêm maior quantidade de água, reduzindo a necessidade de irrigação constante (Li et al. 2021). Ademais, práticas de manejo do solo, como cobertura vegetal, adição de matéria orgânica e técnicas de conservação, podem contribuir significativamente para a redução da perda de água por evaporação e escoamento superficial, otimizando a disponibilidade hídrica para as culturas.

O cálculo da demanda hídrica agrícola é realizado com base na evapotranspiração da cultura (ETc), que, por sua vez, é obtida multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ETo) pelo coeficiente de cultura (Kc). A ETo representa a perda de água por evapotranspiração de uma superfície padrão, geralmente um gramado bem irrigado, e é determinada por modelos matemáticos como o método de Penman-Monteith, amplamente utilizado por sua precisão na estimativa da demanda hídrica. O coeficiente de cultura (Kc) varia ao longo do ciclo fenológico da planta e reflete sua capacidade de transpirar e utilizar a água disponível no solo (Perea et al., 2024). Culturas como o milho e a cana-de-açúcar, por exemplo, apresentam diferentes valores de Kc em função de sua fase de

desenvolvimento, sendo maior nas fases de crescimento vegetativo e menor durante a maturação.

A irrigação desempenha um papel crucial na complementação da demanda hídrica agrícola, garantindo a disponibilidade de água em períodos de déficit hídrico. Diferentes sistemas e métodos de irrigação podem ser utilizados para atender a essa demanda, sendo escolhidos com base em critérios como tipo de solo, disponibilidade de água, exigências das culturas e viabilidade econômica (Macan et al., 2017).

No contexto global, a demanda hídrica para a agricultura enfrenta desafios crescentes devido ao aumento da população, à expansão das áreas agrícolas e às mudanças climáticas, que alteram os padrões de precipitação e elevam a frequência de períodos de estiagem prolongada. O uso eficiente da água na agricultura torna-se, portanto, uma prioridade para garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade dos recursos hídricos (Stevens et al., 2021). A implementação de políticas públicas voltadas para a gestão integrada dos recursos hídricos, o incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, e a capacitação dos produtores rurais para a adoção de boas práticas de irrigação são medidas fundamentais para enfrentar esses desafios e garantir a sustentabilidade da produção agrícola no longo prazo (Aringo et al., 2022).

Dessa forma, a demanda hídrica para a agricultura deve ser compreendida dentro de um contexto multidisciplinar, que envolve fatores climáticos, tecnológicos, econômicos e ambientais. A busca por soluções inovadoras e sustentáveis para o uso da água na agricultura é essencial para garantir a produtividade das culturas e a conservação dos recursos hídricos, assegurando a viabilidade da atividade agrícola em um cenário de crescente pressão sobre os recursos naturais.

3.3.1 FATORES AMBIENTAIS E CLIMÁTICOS INTERVENIENTES

A demanda hídrica para a agricultura é influenciada por uma complexa interação de fatores ambientais, climáticos, hidrológicos e edáficos que determinam a disponibilidade e a necessidade de água ao longo do ciclo das culturas. Entre esses fatores, destacam-se a evapotranspiração, a radiação solar, a precipitação, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento, a temperatura, as características hidrológicas da região e as propriedades do solo (Pereira et al. 2002). O entendimento desses elementos é essencial para o manejo sustentável dos recursos hídricos na agricultura, garantindo uma produção eficiente e minimizando impactos ambientais relacionados ao uso da água.

Os fatores climáticos exercem um papel central na demanda hídrica agrícola. A evapotranspiração, que corresponde à soma da evaporação direta da água do solo e da transpiração das plantas, é um dos principais processos responsáveis pela perda de umidade e, consequentemente, pela necessidade de reposição hídrica (Franzluebbers, 2021). A taxa de evapotranspiração é regulada por variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. Em regiões de clima quente e seco, a evapotranspiração é mais intensa, exigindo maior aplicação de água para suprir a demanda das culturas, enquanto em áreas de clima úmido e ameno, a necessidade de irrigação tende a ser reduzida.

A radiação solar é outro fator determinante, pois influencia diretamente a fotossíntese e o metabolismo das plantas. Quanto maior a incidência de radiação solar, maior será a temperatura das folhas e a taxa de transpiração, intensificando a perda de água e aumentando a demanda hídrica (Kittas, 1990). Em contrapartida, períodos de menor insolação podem reduzir a necessidade de irrigação, mas também podem afetar o crescimento das plantas e sua produtividade.

A precipitação é a principal fonte natural de reposição da umidade do solo e influencia diretamente a necessidade de irrigação. A distribuição temporal e espacial das chuvas é um aspecto crítico para a agricultura, pois chuvas regulares e bem distribuídas ao longo do ciclo das culturas reduzem a necessidade de irrigação suplementar, enquanto períodos de estiagem prolongada podem comprometer o desenvolvimento das plantas e a produtividade (Silva, 2020). Ademais, a intensidade e a frequência das chuvas afetam a infiltração da água no solo, podendo gerar escoamento superficial excessivo e erosão, o que reduz a disponibilidade hídrica para as culturas.

Em relação a umidade relativa do ar, em condições de baixa umidade, há um aumento na perda de água pelas folhas, o que eleva a necessidade de irrigação. Já em ambientes com alta umidade relativa, a transpiração é reduzida, diminuindo a demanda hídrica das culturas. Esse fator é particularmente relevante em regiões semiáridas, onde a baixa umidade do ar pode acentuar o déficit hídrico das plantas e aumentar a necessidade de manejo eficiente da irrigação (Berbel et al., 2018).

A velocidade do vento é outro elemento climático que influencia a demanda hídrica, pois atua na remoção da camada de ar úmido ao redor das folhas, acelerando a transpiração e a evaporação do solo. Em áreas onde os ventos são constantes e intensos, as taxas de evapotranspiração podem ser significativamente elevadas, aumentando a necessidade de reposição hídrica (Alonso et al. 2024). O uso de barreiras vegetais, como

quebra-ventos, pode ser uma estratégia eficaz para reduzir as perdas de água e minimizar os impactos negativos do vento sobre a agricultura.

A temperatura do ar, por sua vez, está diretamente relacionada ao consumo de água pelas plantas. Temperaturas elevadas intensificam a evapotranspiração e aceleram o metabolismo vegetal, resultando em maior demanda hídrica. Já temperaturas mais baixas reduzem a taxa de transpiração, diminuindo a necessidade de irrigação. Entretanto, variações extremas de temperatura podem afetar o crescimento e a produtividade das culturas, tornando essencial um manejo adequado da irrigação para mitigar impactos climáticos adversos (Yang et al. 2019).

Além dos fatores climáticos, as características hidrológicas da região desempenham um papel fundamental na determinação da demanda hídrica. A disponibilidade de água superficial e subterrânea, a capacidade de armazenamento dos aquíferos, a taxa de infiltração e a dinâmica do escoamento hídrico influenciam diretamente a oferta de água para a agricultura (Li et al. 2021). Em regiões onde os recursos hídricos são limitados, o uso sustentável da água torna-se essencial para evitar a superexploração dos mananciais e garantir a viabilidade da produção agrícola a longo prazo.

Os fatores edáficos, relacionados às características do solo, também são determinantes na demanda hídrica agrícola (Hill, 1994). A textura do solo, por exemplo, influencia sua capacidade de retenção de água: solos arenosos apresentam baixa capacidade de retenção, exigindo irrigação mais frequente, enquanto solos argilosos possuem maior retenção de umidade, permitindo um suprimento mais gradual às raízes das plantas. Assim, a estrutura do solo afeta a infiltração e a drenagem da água, sendo que solos compactados dificultam a penetração da água e podem levar ao acúmulo superficial, aumentando a necessidade de estratégias de manejo que promovam a descompactação e a melhoria da porosidade (Halliwell et al. 2001).

Diante da complexidade dos fatores climáticos, hidrológicos e edáficos que influenciam a demanda hídrica agrícola, torna-se essencial a adoção de práticas de manejo que otimizem o uso da água. Portanto, a demanda hídrica para a agricultura é um fenômeno complexo, influenciado por múltiplos fatores interdependentes. A interação entre variáveis climáticas, hidrológicas e edáficas determina a necessidade de água das culturas e a disponibilidade hídrica na paisagem agrícola. O monitoramento contínuo dessas variáveis, aliado ao uso de práticas conservacionistas e tecnologias avançadas, é

essencial para garantir um manejo sustentável dos recursos hídricos, promovendo a resiliência da produção agrícola e a preservação ambiental.

3.4 Pegada hídrica

A Pegada Hídrica é definida como um indicador fundamental para avaliar o consumo de água associado à produção de bens e serviços, permitindo compreender a relação entre a utilização dos recursos hídricos e a sustentabilidade ambiental. O conceito de Pegada Hídrica foi introduzido por Chapagain e Hoekstra (2004) e se baseia na quantificação da água utilizada direta e indiretamente ao longo do ciclo de vida de um produto ou atividade. Essa abordagem considera não apenas a quantidade de água consumida, mas também sua origem e impacto ambiental, proporcionando uma visão mais abrangente da gestão hídrica. A Pegada Hídrica é dividida em três componentes principais: água azul, água verde e água cinza, cada uma representando uma forma distinta de uso e impacto sobre os recursos hídricos (Hoekstra et al., 2011).

A água azul refere-se ao volume de água retirada de corpos hídricos superficiais ou subterrâneos para uso em processos produtivos, como irrigação agrícola, abastecimento industrial e consumo doméstico. Esse tipo de consumo tem grande relevância para a gestão de recursos hídricos, pois envolve a captação direta de mananciais e pode gerar impactos como a redução da disponibilidade hídrica e a degradação de ecossistemas aquáticos. A água verde, corresponde à parcela da água proveniente da precipitação que é armazenada no solo e absorvida pelas plantas durante seu crescimento. Esse componente é especialmente relevante na agricultura de sequeiro, onde as culturas dependem exclusivamente da chuva para seu desenvolvimento. Por sua vez, a água cinza representa o volume de água necessário para diluir poluentes até que a qualidade da água retorne a níveis aceitáveis dentro dos padrões ambientais. Esse conceito é essencial para avaliar o impacto da contaminação da água por resíduos agrícolas, industriais e urbanos, destacando a importância de práticas sustentáveis de uso e descarte da água.

A Pegada Hídrica permite a comparação entre diferentes atividades econômicas, regiões geográficas e padrões de consumo, auxiliando na formulação de políticas públicas e estratégias de gestão sustentável da água. Além disso, possibilita a identificação de áreas críticas onde a demanda hídrica é elevada ou onde os recursos hídricos estão sob maior pressão (Pfister et al., 2009). No contexto das mudanças climáticas e do aumento da

escassez hídrica, esse indicador se torna ainda mais relevante, pois permite a adoção de medidas para reduzir o desperdício de água e promover práticas mais eficientes de uso e conservação.

No setor agrícola, a Pegada Hídrica assume um papel de destaque, uma vez que a agricultura é responsável pela maior parte do consumo de água no mundo. A produção de alimentos requer grandes volumes de água, tanto na forma de irrigação quanto na absorção direta da umidade do solo (Le Roux et al., 2017). Nesse contexto, a Pegada Hídrica da Agricultura Irrigada se torna um aspecto crucial para a sustentabilidade dos recursos hídricos, pois a irrigação representa a principal fonte de consumo de água azul e pode gerar impactos significativos na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas.

Assim, o quantitativo de água gasto na agricultura varia de acordo com fatores como clima, tipo de solo, cultura agrícola e eficiência do sistema de irrigação utilizado (Carvalho et al., 2000). Em regiões áridas e semiáridas, onde a precipitação é escassa, a dependência da irrigação é maior, resultando em um aumento significativo na Pegada Hídrica azul. Por outro lado, em regiões com chuvas regulares e solos com boa capacidade de retenção de umidade, a contribuição da água verde pode ser mais expressiva, reduzindo a necessidade de irrigação suplementar.

Os sistemas de irrigação desempenham um papel fundamental na determinação da Pegada Hídrica na agricultura. Métodos como a irrigação por gotejamento e a irrigação por microaspersão, podem reduzir significativamente o consumo de água azul, minimizando as perdas por evaporação e percolação profunda. Em contrapartida, sistemas como a irrigação por sulcos e por aspersão convencional, podem aumentar o desperdício de água e elevar a Pegada Hídrica total da produção agrícola, dependendo dos fatores climáticos existentes. Dessa forma, a adoção de tecnologias e práticas de manejo sustentável da irrigação é essencial para otimizar o uso da água e reduzir os impactos ambientais associados à agricultura irrigada (Vanham e Mekonnen, 2021).

Portanto, a gestão da Pegada Hídrica na Agricultura Irrigada requer uma abordagem integrada que considere tanto a eficiência do uso da água quanto os impactos sobre os ecossistemas aquáticos. Medidas como o monitoramento do consumo hídrico, o desenvolvimento de políticas de incentivo à adoção de sistemas de irrigação mais eficientes e a implementação de programas de reuso da água podem contribuir para a redução da Pegada Hídrica no setor agrícola.

Diante dos desafios relacionados à segurança hídrica e à necessidade de aumentar a produtividade agrícola de forma sustentável, a Pegada Hídrica surge como uma

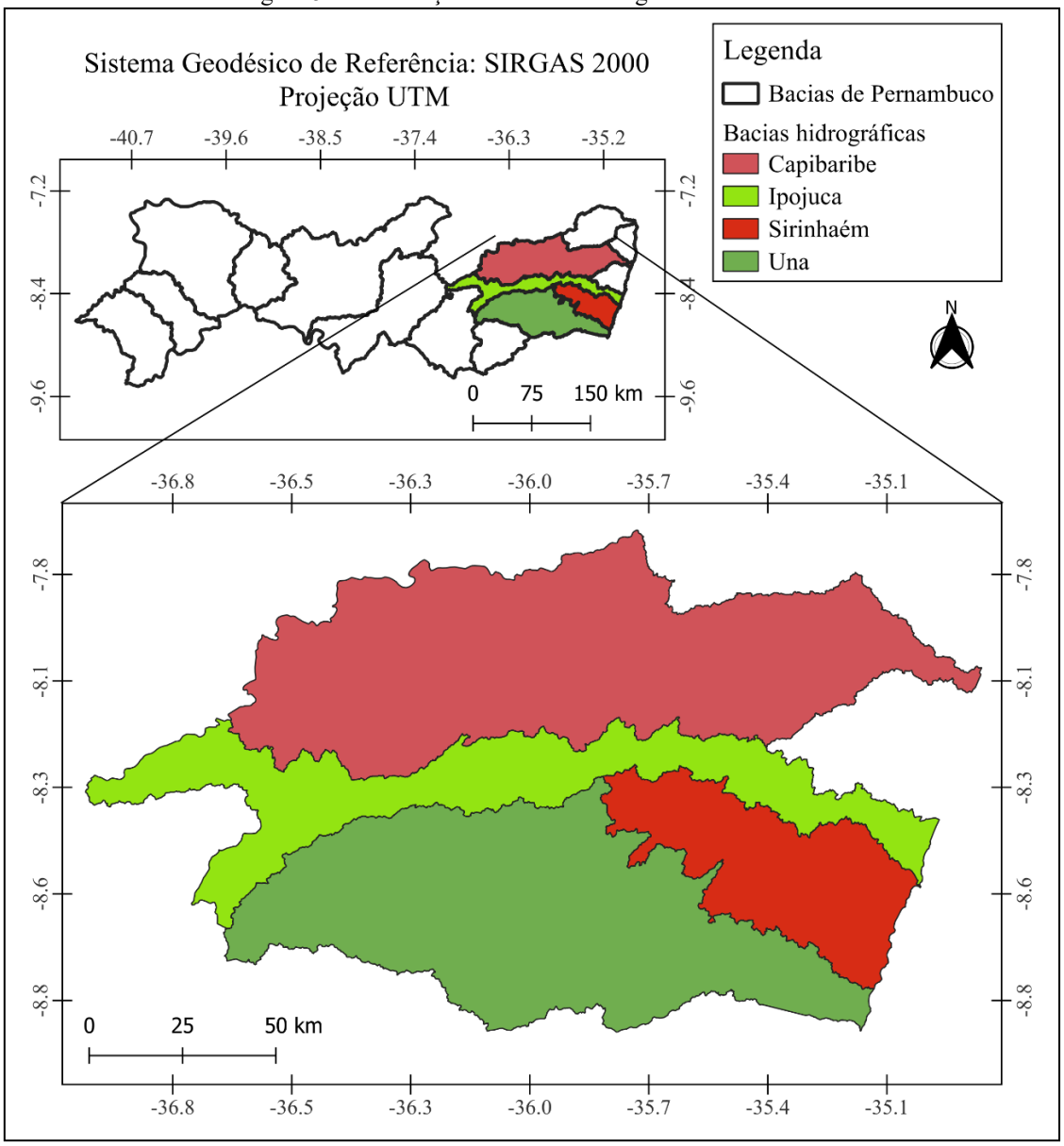
ferramenta estratégica para orientar a tomada de decisões e promover o uso racional e sustentável da água na agricultura irrigada. A integração de políticas de gestão hídrica, a inovação tecnológica e o engajamento dos produtores rurais são elementos-chave para garantir que a irrigação seja realizada de maneira eficiente, minimizando impactos ambientais e contribuindo para a resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo abrange quatro bacias hidrográficas situadas no estado de Pernambuco, sendo: as bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Essas unidades hidrográficas, ilustradas na Figura 5, desempenham um papel estratégico na dinâmica hidrológica regional e na gestão dos recursos hídricos, sendo fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico e para a sustentabilidade ambiental do estado.

Figura 5 - Localização das bacias hidrográficas em estudo



A cultura da cana-de-açúcar, uma das atividades econômicas de maior relevância histórica e econômica para Pernambuco, é amplamente praticada nessas bacias hidrográficas, abrangendo desde o cultivo e colheita até o processamento industrial e a exportação de produtos derivados (Dutra Filho et al. 2021). O impacto dessa cultura na disponibilidade hídrica e na qualidade da água é significativo, tornando-se um elemento central na análise da pegada hídrica da região.

Essas quatro bacias hidrográficas apresentam características geográficas peculiares, abrangendo desde áreas de clima semiárido, onde se situam suas nascentes, até as regiões litorâneas, onde suas águas deságuam no oceano Atlântico (APAC, 2024a). Essa transição entre domínios fisiográficos tão distintos reflete-se na variabilidade dos regimes hidrológicos, na disponibilidade hídrica e nos usos múltiplos da água ao longo do curso fluvial. As nascentes, localizadas em áreas de baixa pluviosidade e elevada evapotranspiração, impõem desafios hídricos significativos, especialmente no que tange à recarga dos mananciais e à manutenção da vazão dos cursos d'água. Em contrapartida, as regiões estuarinas e costeiras, receptoras finais das águas das bacias, apresentam dinâmicas hidrológicas influenciadas por marés, aporte sedimentar e interações entre água doce e salina, aspectos essenciais para a biodiversidade e para atividades econômicas como a pesca e o turismo. As informações acerca das quatro bacias hidrográficas em estudo estão contidas principalmente no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH, 2022).

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe, com uma área aproximada de 7.455 km², constitui uma das mais extensas e relevantes de Pernambuco. Seu território abrange municípios de expressiva importância, como Recife, Caruaru, Gravatá, Bezerros e Limoeiro, caracterizando-se por uma elevada densidade urbana, especialmente na região metropolitana da capital. Além da cultura da cana-de-açúcar, a bacia sustenta uma agricultura diversificada, incluindo a produção de frutas e hortaliças, bem como atividades pecuárias. Ademais, essa bacia desempenha um papel crucial no abastecimento hídrico da Região Metropolitana do Recife, além de suportar um robusto setor industrial e de serviços.

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca estende-se por aproximadamente 3.435 km² e abrange municípios como Arcoverde, Belo Jardim, Sanharó e Pesqueira. A economia regional é fortemente alicerçada na agricultura, com predominância do cultivo da cana-de-açúcar, além da presença significativa da pecuária e da produção de grãos. Todavia, a bacia enfrenta desafios ambientais relevantes, notadamente a degradação da qualidade da

água em decorrência da poluição oriunda de efluentes industriais e urbanos, bem como do uso intensivo dos recursos hídricos para a irrigação agrícola.

A bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, cuja área corresponde a aproximadamente 2.090 km², compreende municípios como Sirinhaém, Rio Formoso, Tamandaré e Barreiros. A monocultura da cana-de-açúcar se destaca como a principal atividade agrícola, sendo esta bacia historicamente vinculada à agroindústria sucroalcooleira. Além disso, a pesca e a aquicultura desempenham papel relevante na economia regional, especialmente nas zonas costeiras. O turismo, impulsionado pelo potencial paisagístico e pela rica biodiversidade das áreas litorâneas, também contribui significativamente para o desenvolvimento econômico local.

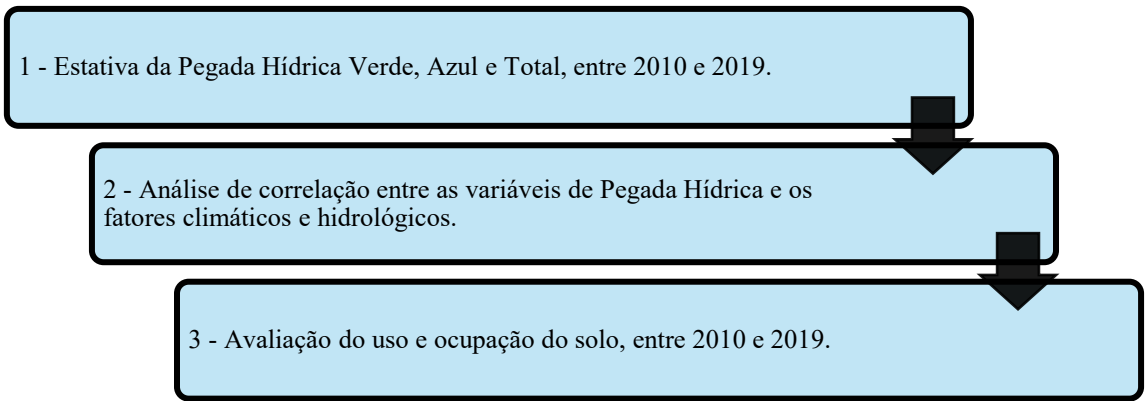
A bacia hidrográfica do rio Una, que se estende por aproximadamente 6.262 km², engloba municípios como Palmares, Água Preta, Catende e Joaquim Nabuco. A cultura da cana-de-açúcar predomina como a principal atividade agrícola, coexistindo com a produção de cacau e frutas tropicais. A pecuária e a pesca artesanal configuram-se como atividades complementares na economia da bacia. Além do caráter produtivo, essa unidade hidrográfica abriga áreas de relevante interesse ambiental, destacando-se pela sua biodiversidade e pela presença de ecossistemas sensíveis, que demandam estratégias eficazes de conservação e manejo sustentável dos recursos naturais.

Os solos das bacias hidrográficas dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, em Pernambuco, apresentam uma distribuição predominante de Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo e Planossolos Háplicos, conforme a classificação pedológica estabelecida pela Embrapa (2024). Na região do Agreste, os solos tendem a possuir uma textura arenosa, o que resulta em maior permeabilidade e menor capacidade de retenção de água, tornando a região mais suscetível à seca e exigindo estratégias eficientes de conservação hídrica. Já na Zona da Mata, os solos apresentam, em sua maioria, textura argilosa, caracterizada por maior retenção de umidade e fertilidade relativamente elevada, o que favorece a atividade agrícola e o desenvolvimento da vegetação natural. Essas características pedológicas influenciam diretamente a dinâmica hídrica das bacias e a necessidade de práticas de manejo específicas para otimizar o uso da água e a produtividade agrícola.

Deste modo, a análise da pegada hídrica na cultura da cana-de-açúcar nas bacias hidrográficas em estudo revela-se uma abordagem imprescindível para a formulação de políticas públicas e estratégias de gestão dos recursos hídricos que conciliem a sustentabilidade ambiental com as demandas socioeconômicas da região. A compreensão

da dinâmica de consumo e disponibilidade hídrica ao longo dos diferentes trechos dessas bacias permite avaliar os impactos da atividade agrícola sobre os recursos hídricos, subsidiando medidas de mitigação e adaptação que visem minimizar a degradação ambiental e garantir a resiliência dos ecossistemas aquáticos. Para realizar o referido estudo, a Figura 6 revela resumidamente os procedimentos metodológicos empregados, que serão discutidos a seguir.

Figura 6 – Fluxograma dos processos metodológicos empregados



4.2 Estimativa da Pegada Hídrica

A metodologia utilizada para o cálculo da Pegada Hídrica no cultivo da Cana-de-açúcar baseou-se nas recomendações do The Water Footprint Assessment Manual para cultivos agrícolas (Hoekstra et al., 2011). A estimativa teve como base a soma dos componentes Verde e Azul da Pegada Hídrica, que medem diferentes tipos e formas de apropriação de água.

A Pegada Hídrica Verde (m^3/ton) corresponde ao indicador do volume de água verde utilizada pela cultura, sendo a precipitação que não é transformada em escoamento superficial ou em infiltração para os aquíferos, conforme mostra a Equação 1. O consumo de água verde (DHCverde) é estimado em função da evapotranspiração diária (ET) da água advinda da precipitação, durante o período de crescimento completo, como mostra a Equação 2. Os dados de produtividade da cultura foram adquiridos no banco de dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2024).

$$PHverde = \frac{DHCverde}{Prtv} \quad (1)$$

Onde:
PHproc,verde = Pegada Hídrica Verde (m^3/ton)

DHCverde = Consumo (demanda) de água verde pela cultura (m³/ha);
Prtv = produtividade da cultura (ton/ha).

$$DHCverde = 10 * \sum_{di} ETverde \quad (2)$$

Onde:
DHCverde = Consumo (demanda) de água verde pela cultura (m³/ha);
ETverde = Evapotranspiração verde diária durante os dias de plantio.

A Pegada Hídrica Azul (m³/ton) se refere ao indicador do volume de água azul, que advém da água superficial ou e subterrânea, consumida durante o processo de produção de bens e serviços (Hoekstra et al., 2011), conforme mostra a Equação 3. De mesma forma similar, o consumo de água azul (DHCazul) é resultado do somatório da evapotranspiração diária referente a água proveniente da água superficial ou subterrânea, conforme mostra a Equação 4. Compreende-se que esse consumo de água azul é estimado em função da evapotranspiração diária (ET) da água advinda do escoamento superficial ou subterrâneo (irrigação).

$$PHazul = \frac{DHCazul}{Prtv} \quad (3)$$

Onde:
PHazul = Pegada Hídrica Azul (m^3/ton)
DHCazul = Consumo (demanda) de água azul pela cultura (m³/ha);
Prtv = produtividade da cultura (ton/ha).

$$DHCazul = 10 * \sum_{di} ETazul \quad (4)$$

Onde:
DHCazul = Consumo (demanda) de água azul pela cultura (m³/ha);
ET = Evapotranspiração azul diária durante os dias de plantio.

No tange o cálculo da ETverde e da ETazul, as equações 5 e 6 revelam como ocorreu a estimativa destes parâmetros. A ETverde tem relação com a água precipitada que é usufruída pela planta, enquanto a ETazul tem relação com a água provenientes das fontes de escoamento superficial ou subterrâneo que, de forma geral, compreender o sistema de irrigação do cultivo agrícola.

$$ETverde = \min (ETc, Peft) \quad (5)$$

Onde:
ETverde = Evapotranspiração verde (mm);
ETc = Evapotranspiração da cultura (mm);
Peft = Precipitação efetiva (mm).

$$ETazul = \max(0, ETc - Peft) \quad (6)$$

Onde:
ETazul = Evapotranspiração azul (mm);
ETc = Evapotranspiração da cultura (mm);
Peft = Precipitação efetiva (mm).

Os dados de clima utilizados para as estimativas de Pegada Hídrica foram obtidos com base na estação meteorológica de Picos para o Piauí e a estação de Cabrobó para Pernambuco (INMET, 2024) e, com o uso no software CROPWAT 8.0 (Hoekstra et al., 2011) foram modeladas as variáveis climáticas e, obtidos os valores de ETazul e ETverde do cultivo de Cana-de-açúcar nas áreas de estudo, entre os anos de 2010 e 2019. A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados de entrada no CROPWAT 8.0, indicando as variáveis climáticas, da cultura, do solo e do sistema de irrigação para estimativa da ETzul e ET verde.

Tabela 1 - Resumo dos dados de entrada para o CROPWAT 8.0

Componente	**Variável**
Clima	Temperatura máxima e mínima (ºC)
	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)

4.2.1 CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO FAO

A estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) no software CROPWAT é realizada com base no método proposto pela RAD-FAO, utilizando-se as equações descritas a seguir (Hoekstra et al., 2011). A evapotranspiração de referência (ETo) é

calculada por meio da Equação 7, sendo que o fator de ponderação (W) é calculado utilizando a Equação 8. A Tmed que consiste na temperatura média do ar, é estimada pela média aritmética entre as temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do dia, conforme expresso na Equação 9.

$$ETo = Cv * (W * Rs) \quad (7)$$

$$W = 0{,}483 + 0{,}01 * (Tmed) \quad (8)$$

$$Tmed = \frac{Tmax + Tmin}{2} \quad (9)$$

Onde:
ETo (RAD-FAO) = evapotranspiração (mm dia^{-1});
Rs (d) = radiação solar incidente (mm dia^{-1});
W = fator de ponderação;
Cv = fator de ajuste em função dos intervalos de velocidade média do vento (m s^{-1}) e intervalos de umidade relativa média (%).

O fator de ajuste (Cv) é obtido a partir da Tabela 2, que relaciona os intervalos de velocidade média do vento e os intervalos de umidade relativa média. A Tabela 2 apresenta os valores de Cv para diferentes combinações dessas variáveis, permitindo a adequação do cálculo da evapotranspiração às condições climáticas locais.

Tabela 2 – Fator de ajuste (Cv)

Velocidade média do vento (m s^{-1})	**Umidade Relativa média (%)**			
	< 40	**40 - 55**	**55 - 70**	**>70**
0 – 2	0,971	0,92	0,857	0,814
2 – 5	1,057	1,014	0,927	0,886
5 – 8	1,143	1,1	0,986	0,923
>8	1,229	1,172	1,043	1

Assim, a partir da evapotranspiração de referência (ETo), estima-se a evapotranspiração da cultura (ETc) foi determinada por meio da Equação 10, que considera a referida ETo ajustada pelos coeficientes da cultura (Kc) e de molhamento (Ks).

$$ETc = ETo * Kc * Ks \quad (10)$$

Onde:
ETc = evapotranspiração da cultura (mm $mês^{-1}$);
ETo = evapotranspiração de referência (mm $mês^{-1}$);
Kc = coeficiente da cultura;
Ks = coeficiente de molhamento.

4.2.2 COLETA DE DADOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS

A aquisição das variáveis climáticas das bacias hidrográficas dos rios Sirinhaém, Capibaribe, Ipojuca e Una fundamenta-se na utilização de estações meteorológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024). A Tabela 3 releva as estações selecionadas para representar as regiões de Agreste, enquanto a Tabela 4 expõe as estações utilizadas para obtenção de dados das regiões de Zona da Mata/Litoral.

Tabela 3 – Estações bases para coleta de dados climatológicos, na área de Agreste

Bacia	**Estação**	**Altitude**	**Coordenadas**			
			Latitude		**Longitude**	
Sirinhaém	Arcoverde – 82890	683,91	8,43	Sul	37,06	Oeste
Capibaribe	Surubim – 82797	421,44	7,84	Sul	35,80	Oeste
Ipojuca	Surubim – 82797	421,44	7,84	Sul	35, 80	Oeste
Una	Arcoverde – 82890	683,91	8,43	Sul	37,06	Oeste

Tabela 4 – Estações bases para coleta de dados climatológicos, na área de Zona da Mata e Litoral

Bacia	**Estação**	**Altitude**	**Coordenadas**			
			Latitude		**Longitude**	
Sirinhaém	Recife – 82900	11,3	8,06	Sul	34,96	Oeste
Capibaribe	Recife – 82900	11,3	8,06	Sul	34,96	Oeste
Ipojuca	Recife – 82900	11,3	8,06	Sul	34,96	Oeste
Una	Porto de Pedras - 82996	15,21	9,16	Sul	35,30	Oeste

Assim, dados climáticos obtidos a partir das estações meteorológicas selecionadas, no período compreendido entre 2010 e 2019, foram empregados como dados de entrada para a estimativa da Pegada Hídrica do cultivo de cana-de-açúcar nas bacias hidrográficas em estudo. Dessa forma, a partir dos parâmetros climáticos regionais, como temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação, foi possível determinar a demanda hídrica com uso do software CROPWAT, considerando as variações hidrológicas e as especificidades de cada bacia hidrográfica ao longo da década analisada.

Em relação aos dados pluviométricos, as estações pluviométricas da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2024b) foram selecionadas para a aquisição de dados de precipitação. Essas estações, distribuídas entre as regiões do Agreste e da Zona da Mata/Litoral, possibilitaram compreender a variabilidade espacial e temporal da precipitação, servindo como dados de entrada para a estimativa da Pegada Hídrica da cultura da cana-de-açúcar, a partir do software CROPWAT.

Na região do Agreste, as estações utilizadas para monitoramento da precipitação em cada bacia hidrográfica consistem em:

- Capibaribe: Frei Miguelinho - IPA (218), Surubim (203);
- Ipojuca: Belo Jardim (20), Belo Jardim - Açude Bituri (374), Caruaru - IPA (24), Caruaru (211);
- Sirinhaém: Camocim de São Felix (282), Barra de Guaribara (459);
- Una: São Bento do Una - IPA (21), São Bento do Una - PCD (486), Jucati (157), Bonito - Fazenda Vila Bela (469).

No que se refere a região da Zona da Mata e Litoral, as estações responsáveis pela coleta de dados pluviométricos consistem em:

- Capibaribe: São Lourenço da Mata - Tapacurá (267);
- Ipojuca: Ipojuca (387), Primavera (108);
- Sirinhaém: Gameleira (393);
- Una: Água Preta (80).

4.2.3 DADOS DE SOLOS

Para a caracterização dos solos das regiões do Agreste e da Zona da Mata, para as bacias hidrográficas em estudo, foram considerados os valores dos parâmetros edáficos apresentados nas Tabelas 5 e 6, conforme as diretrizes manuais da Embrapa (2011) e Embrapa (2024). Esses parâmetros representam as características físicas do solo, essenciais para a estimativa da Pegada Hídrica, sendo utilizados como dados de entrada no software CROPWAT. A Tabela 5 apresenta os parâmetros considerados para os solos da região do Agreste, onde predomina uma textura arenosa. Ademais, a Tabela 6 descreve os parâmetros adotados para os solos da Zona da Mata, caracterizados por textura argilosa.

Tabela 5 – Dados de solo para a região de Agreste

Parâmetro	**Valor/descrição**
Tipo de solo	Textura arenosa
Umidade total disponível (mm/m)	110
Taxa máxima de infiltração (mm/dia)	70
Profundidade máxima da raiz (cm)	700
Depleção inicial da umidade (%)	0

Parâmetro	Valor/descrição
Umidade inicial disponível (mm/m)	110

Tabela 6 – Dados de solo para a região de Zona da Mata

Parâmetro	Valor/descrição
Tipo de solo	Textura argilosa
Umidade total disponível (mm/m)	150
Taxa máxima de infiltração (mm/dia)	40
Profundidade máxima da raiz (cm)	700
Depleção inicial da umidade (%)	0
Umidade inicial disponível (mm/m)	150

4.2.4 DADOS DA CULTURA

Em relação a cultura de cana-de-açúcar, foram arbitrados os parâmetros agronômicos apresentados nas Tabelas 7 e 8, com base em considerações de trabalhos como o de Neves et al. (2023) e Oliveira et al. (2020). Estes valores foram utilizados como dados de entrada no software CROPWAT, sendo essenciais para a modelagem da demanda hídrica da cultura nas respectivas regiões. A Tabela 7 apresenta os parâmetros para a região do Agreste, onde a cultura possui um ciclo de 340 dias, com data de plantio em 1º de outubro. A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados para a região da Zona da Mata, considerando o mesmo ciclo de 340 dias e a mesma data de plantio.

Tabela 7 – Dados da cultura para a região de Agreste

Parâmetro	Valor	Período do Ciclo
Data de plantio	01/out	-
Ciclo (dias)	340	-
Coeficiente de cultivo (kc)	0,65	Início
	1,1	Médio
	0,85	Final
Duração das fases (dias)	30	Início
	60	Desenvolvimento
	190	Médio
	60	Final
Altura máxima (m)	3	-
Profundidade da raiz (m)	0,3	-
	1,2	-
Fator de resposta	1,2	Início
	0,75	Desenvolvimento
	0,5	Médio

Parâmetro	Valor	Período do Ciclo
	0,5	Final
	0,1	Total
Fator de esgotamento (fração)	0,65	-

Tabela 8 – Dados da cultura para a região de Zona da Mata

Parâmetro	Valor	Período do Ciclo
Data de plantio	01/out	-
Ciclo (dias)	340	-
Coeficiente de cultivo (kc)	0,55	Início
	1,06	Médio
	0,76	Final
Duração das fases (dias)	30	Início
	50	Desenvolvimento
	180	Médio
	60	Final
Altura máxima (m)	3	-
Profundidade da raiz (m)	0,3	-
	1,2	-
Fator de resposta	1,2	Início
	0,75	Desenvolvimento
	0,5	Médio
	0,5	Final
	0,1	Total
Fator de esgotamento (fração)	0,65	-

4.3 Análise de variância (ANOVA) e análise de correlação das variáveis climatológicas

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para examinar a influência de fatores climáticos, como precipitação, evapotranspiração potencial, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação, sobre os parâmetros da Pegada Hídrica, incluindo o consumo de água verde e azul, além da Pegada Hídrica verde, azul e total. Esse método estatístico testa a hipótese nula (H_0), que pressupõe a igualdade estatística entre as médias das variáveis analisadas, contra a hipótese alternativa (H_1), que indica a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa (Bilgin, 2015). A análise foi conduzida com um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), de modo que fatores climáticos com valores de p inferiores a esse limite ($p \leq 0,05$) levaram à rejeição da hipótese nula, evidenciando sua influência significativa sobre os parâmetros da Pegada Hídrica.

Ademais, a correlação estatística mede a força e a direção da relação linear entre variáveis quantitativas, sendo o coeficiente de Pearson (r) um dos métodos mais utilizados para essa avaliação (Akoglu, 2018). Esse coeficiente varia de -1 a 1, indicando correlação positiva perfeita quando próximo de 1, negativa perfeita quando próximo de -1 e ausência de correlação linear quando r = 0 (Schober et al., 2018).

Neste estudo, a correlação entre dados climatológicos e a Pegada Hídrica do cultivo de Cana-de-açúcar foi analisada para identificar os parâmetros climáticos ou hidrológicos que mais influenciam a Pegada Hídrica total, verde e azul, além das demandas de água verde e azul. Essa análise permite identificar os fatores que mais impactam a demanda hídrica do Cana-de-açúcar no Semiárido e na Zona da Mata de Pernambuco, auxiliando na definição de estratégias de manejo hídrico mais eficientes e sustentáveis, com melhor adequação dos métodos de irrigação às condições climáticas e hidrológicas locais.

4.4 Análise de componentes principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada que transforma um conjunto inicial de variáveis correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais. Esse processo, baseado em uma transformação linear, tem como principal objetivo reduzir a dimensionalidade dos dados, preservando a maior parte da variabilidade original (Dharani & Sreenivasulu, 2021). Para garantir a comparabilidade das variáveis em diferentes escalas, utiliza-se a matriz de correlação R, na qual os dados são previamente padronizados (Hongyu et al., 2016).

A ACP permite identificar agrupamentos de indivíduos com características semelhantes por meio da representação gráfica bidimensional ou tridimensional, facilitando a interpretação geométrica da dispersão dos dados (Gupta et al., 2013). Nesse contexto, os indivíduos são posicionados com base na variância de suas características, refletindo sua distribuição dentro da amostra (Congreves et al., 2015). O método fundamenta-se na extração dos autovalores e autovetores de uma matriz de variâncias-covariâncias [S] ou de correlações [R] entre as variáveis.

Segundo Johnson e Wichern (2007), os componentes principais são combinações lineares das variáveis aleatórias X1, X2, ..., Xp. Geometricamente, essas combinações correspondem a uma rotação do sistema de coordenadas original, gerando um novo

conjunto de variáveis, Y1, Y2, ..., Yp, denominadas componentes principais. O primeiro componente (Y1) é definido como a combinação linear que captura a maior variabilidade dos dados, sendo expresso Equação 7.

$$Y_1 = b_{11}X_1 + b_{21}X_2 + \ldots + b_{p1}X_p = b'_1X \quad (6)$$

Os coeficientes bi1b_{i1}bi1 correspondem aos elementos do vetor característico associado ao maior autovalor γ1 da matriz de covariância amostral S. O segundo componente principal (Y2) está relacionado ao segundo maior autovalor (γ2), e assim sucessivamente, até que toda a variância seja explicada. Os autovalores, ordenados em $\gamma 1 \geq \gamma 2 \geq \cdots \geq \gamma p \geq 0$, representam as variâncias dos componentes principais (Johnson & Wichern, 2007). O primeiro componente principal retém a maior parcela da variabilidade total dos dados originais. De forma geral, as componentes principais podem ser expressas de acordo com e Equação 7.

$$PC_{(m)} = \gamma_{(m)1}X_1 + \gamma_{(m)2}X_2 + \ldots + \gamma_{(m)p}X_p \quad (7)$$

Cada componente é extraída de modo que sua variância (γ′X) seja a máxima entre todas as combinações lineares possíveis, sujeita à restrição γ′γ=1, garantindo que a maior dispersão dos pontos seja preservada (Rencher, 2002). O autovalor de cada componente indica a proporção da variância explicada, enquanto o autovetor define a direção da componente no espaço multidimensional. O sinal dos autovetores revela o tipo de associação entre a componente principal e as variáveis do estudo, sendo que valores negativos indicam correlação inversa.

Neste contexto, a ACP foi aplicada para avaliar a a influência das variáveis climatológicas, como precipitação, evapotranspiração potencial, insolação, temperatura e umidade relativa do ar, sobre a Pegada Hídrica da cana-de-açúcar no período de 2010 a 2019. A análise foi realizada no software R Studio, permitindo visualizar a dispersão dos componentes climáticos e sua correlação com os anos e a Pegada Hídrica Total.

4.5 Uso e Ocupação do Solo

Para analisar a dinâmica do uso e ocupação do solo nas bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, foram utilizadas imagens de 2010 a 2019 do MapBiomas, com

resolução espacial de 30 metros e projeção WGS 84 (MAPBIOMAS, 2024a). As imagens, classificadas por pixels conforme as categorias de uso da terra, foram processadas no software QGIS 3.14 a partir da coleção 9 do MapBiomas, via Google Earth Engine (MAPBIOMAS, 2024b).

Os dados permitiram identificar a expansão agrícola e as alterações na cobertura vegetal nestas bacias, fornecendo uma visão das transformações no uso do solo e seus impactos ambientais. A análise comparativa entre as bacias visou avaliar o crescimento agrícola e seus efeitos sobre os recursos hídricos locais, subsidiando políticas de gestão sustentável e uso racional da terra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da obtenção dos dados climáticos e hidrológicos das bacias hidrográficas do rio Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, com a utilização do *software* CROPWAT foram estimadas as Pegadas Hídricas para o cultivo de Cana-de-açúcar. Posteriormente, foram empregadas as análises de correlações e a avaliação do uso e ocupação do solo. A seguir, são detalhados os resultados obtidos.

5.1 Estimativa da Pegada Hídrica

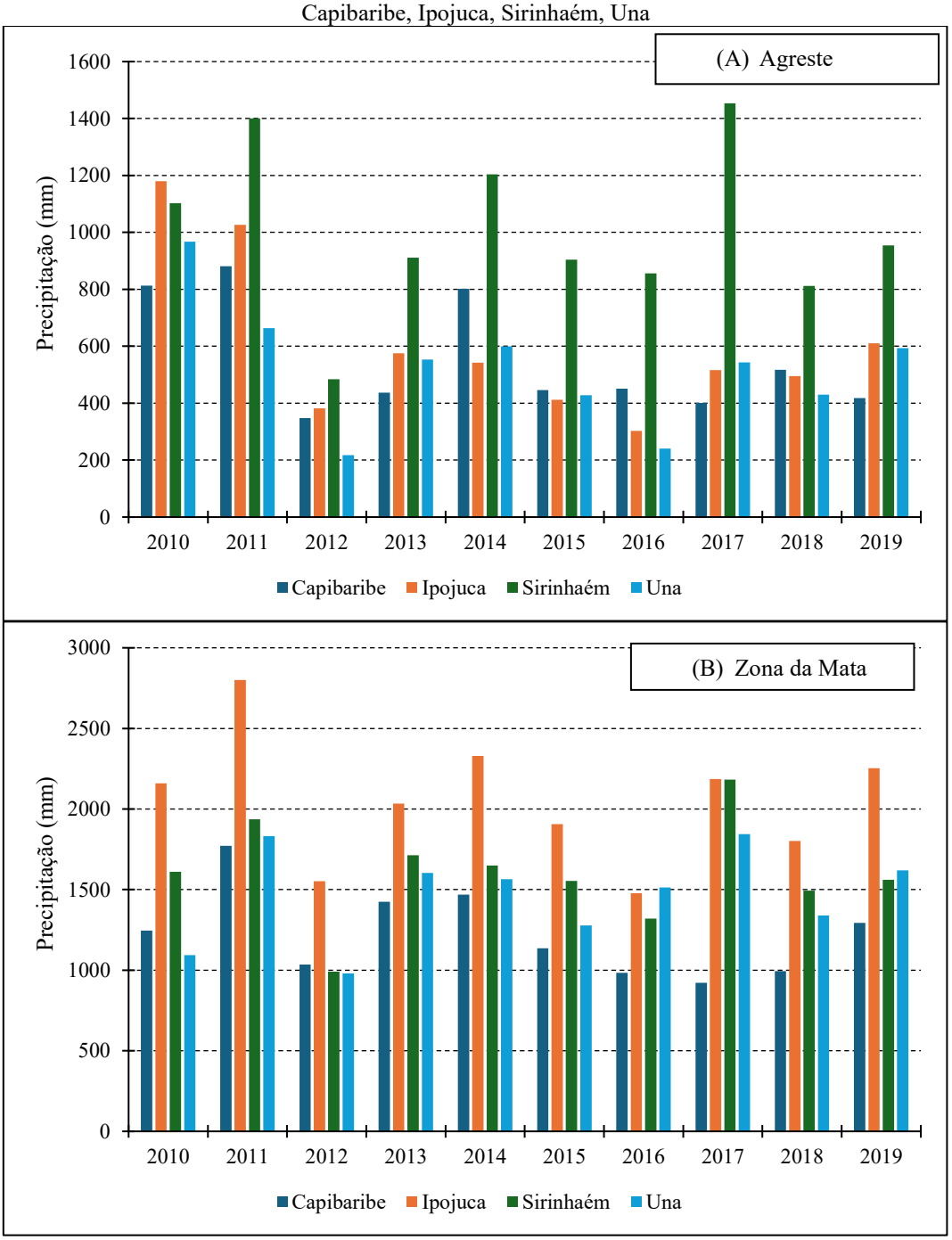
A precipitação anual entre 2010 e 2019 nas bacias hidrográficas do rio Capibaribe, rio Ipojuca, rio Sirinhaém e rio Uma, para as regiões do Agreste e da Zona da Mata são reveladas na Figuras 7, refletindo as características climáticas dessas áreas. Na região do Agreste (Figura 7a), observa-se uma grande variabilidade nos volumes anuais de precipitação, com anos de chuvas mais abundantes e períodos de estiagem severa. Destaca-se o ano de 2011, quando a bacia do Rio Sirinhaém registrou um dos maiores índices pluviométricos da série (1400,6 mm), contrastando com 2012, em que todas as bacias apresentaram volumes extremamente baixos, como no Rio Una (217,8 mm). Esse padrão evidencia a irregularidade climática característica da região, com oscilações significativas que afetam diretamente a disponibilidade hídrica e a necessidade de armazenamento e gestão eficiente da água.

Ademais, é possível observar uma redução expressiva na precipitação em alguns anos consecutivos, especialmente entre 2015 e 2017, período em que as bacias do Ipojuca e do Una registraram valores reduzidos, como em 2016, quando a precipitação no Ipojuca foi de apenas 303,0 mm. Esses períodos de menor pluviosidade pode estar associados a eventos prolongados de seca, que impactam a recarga dos mananciais e aumentam a dependência de fontes hídricas suplementares, como barragens e aquíferos.

Na Zona da Mata (Figura 7b), os volumes de precipitação são consideravelmente mais elevados em comparação ao Agreste, devido à influência do clima tropical úmido e à proximidade com o oceano. A bacia do Ipojuca registrou alguns dos maiores índices pluviométricos da série, com valores expressivos em anos como 2011 (2800,8 mm) e 2014 (2329,1 mm), evidenciando a maior disponibilidade hídrica da região. Essa tendência também se verifica na bacia do Capibaribe, que apresentou precipitações superiores a 1200 mm na maioria dos anos analisados.

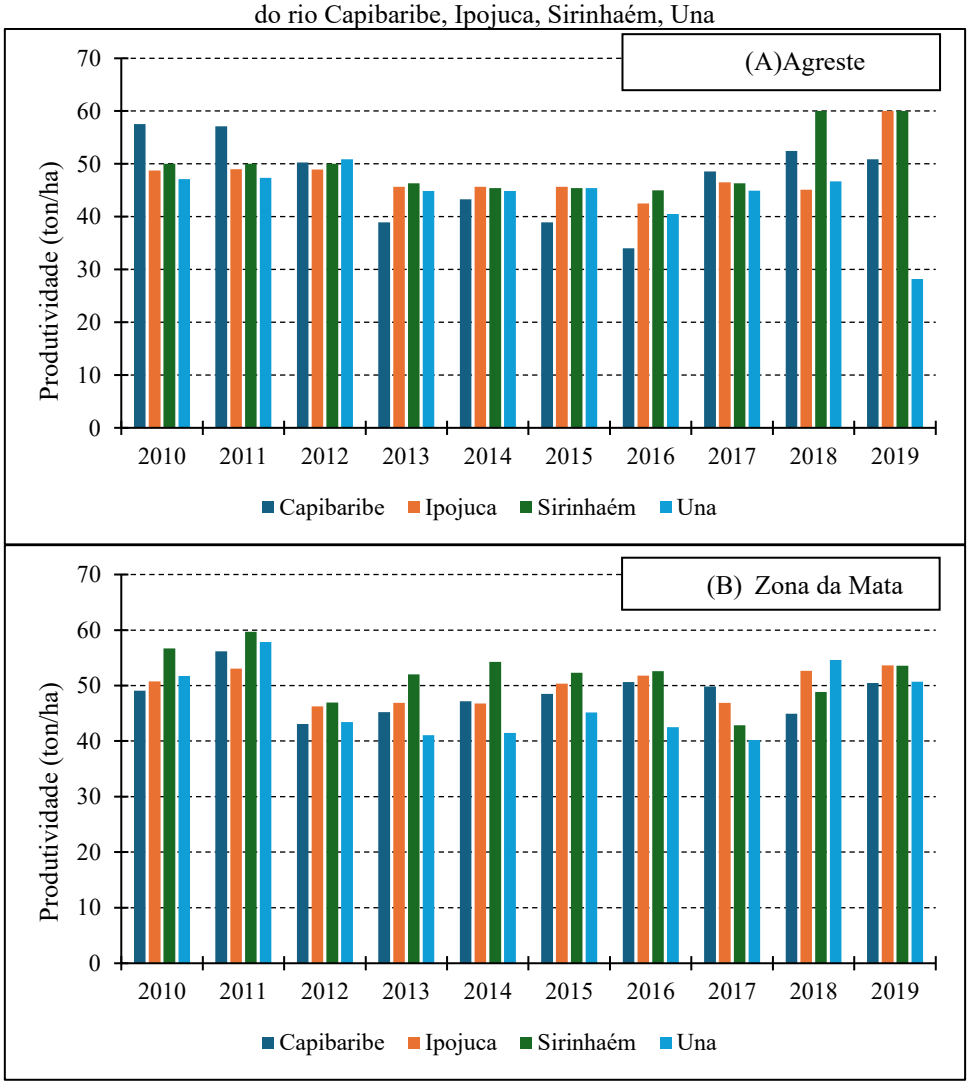
Outro aspecto relevante é a menor variabilidade interanual da precipitação na Zona da Mata, quando comparada ao Agreste. Embora tenha havido períodos de menor pluviosidade, como em 2016, os volumes de chuva ainda se mantiveram relativamente altos em todas as bacias, garantindo uma maior estabilidade hídrica. A bacia do Una, que no Agreste apresentou baixos índices de precipitação em vários anos, apresentou volumes significativamente superior na Zona da Mata, reforçando a diferença climática entre as duas regiões.

Figura 7 – Precipitação anual nas regiões de Agreste (A) e Zona da Mata (B), nas bacias do rio Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una



A Figura8 revela os valores de produtividade da cana-de-açúcar nas regiões do Agreste e da Zona da Mata, considerando as bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, revela diferenças significativas entre as duas regiões. No Agreste, a produtividade média foi menor em comparação com a Zona da Mata, com valores variando entre 44,09 ton/ha (bacia do Una) e 49,85 ton/ha (bacia do Sirinhaém). Na Zona da Mata, as médias foram mais elevadas, oscilando entre 46,88 ton/ha (bacia do Una) e 51,98 ton/ha (bacia do Sirinhaém). Isso indica que as condições edafoclimáticas e a infraestrutura agrícola da Zona da Mata podem favorecer um melhor rendimento da cultura em relação ao Agreste, onde a menor disponibilidade hídrica pode ser um fator limitante.

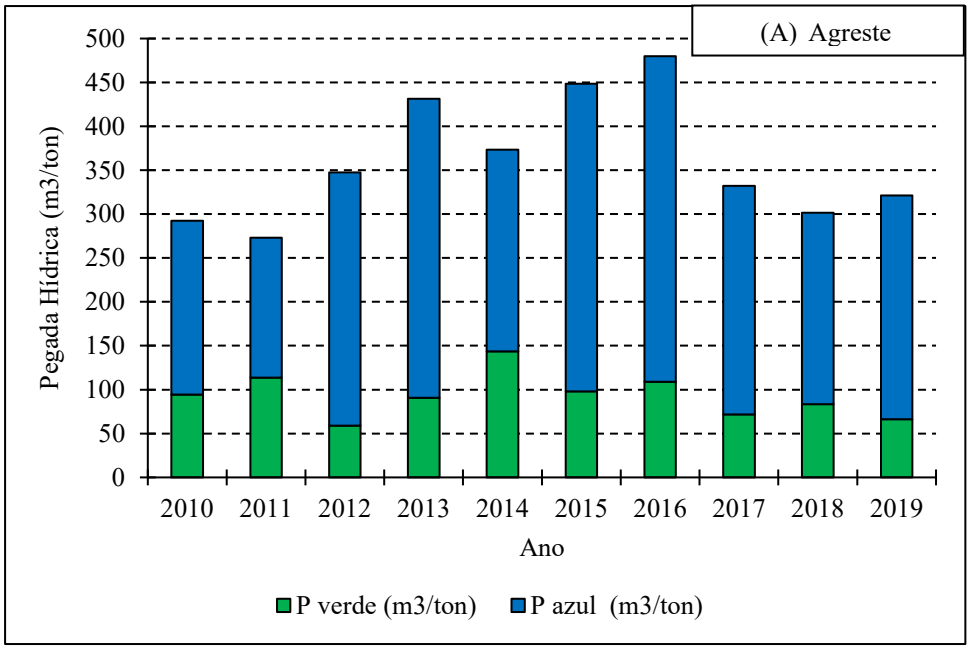
Figura 8 – Produtividade de Cana-de-açúcar, nas regiões de Agreste (A) e Zona da Mata (B), nas bacias do rio Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una

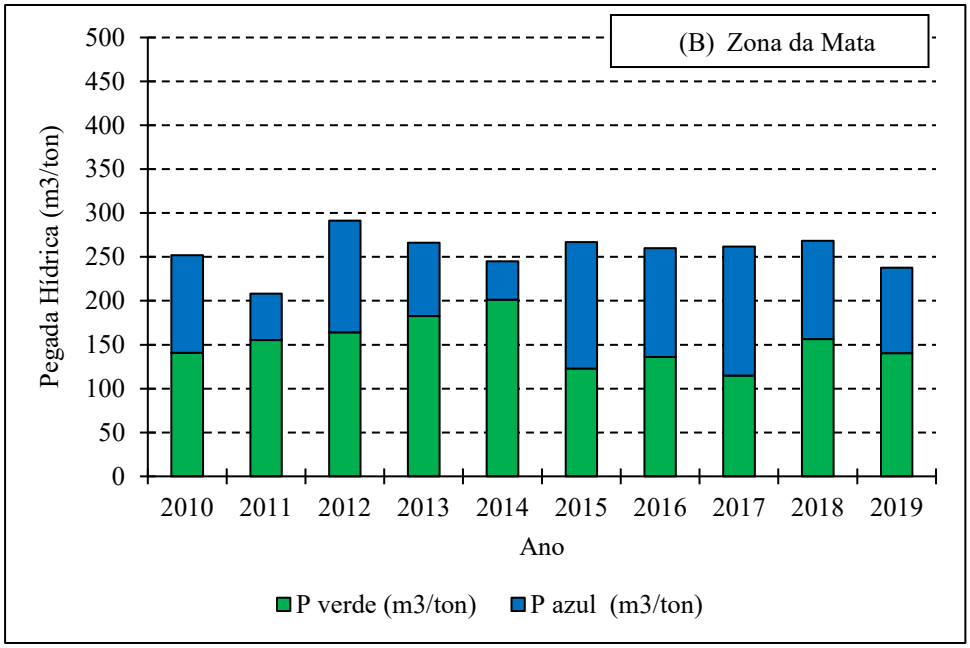


Ao longo dos anos, observa-se uma maior estabilidade da produtividade na Zona da Mata, enquanto no Agreste há oscilações mais acentuadas. No Agreste, destacam-se quedas expressivas na bacia do Capibaribe, com redução de produtividade de 57,55 ton/ha em 2010 para 34,00 ton/ha em 2016, seguida de uma recuperação parcial nos anos subsequentes. Na Zona da Mata, a bacia do Sirinhaém apresentou os melhores desempenhos médios (51,98 t/ha), com valores acima de 50 ton/ha na maior parte dos anos analisados. A bacia do Una, por outro lado, demonstrou menor produtividade em ambas as regiões, especialmente no Agreste, onde atingiu apenas 28,21 ton/ha em 2019.

Os resultados relacionados a Pegada Hídrica (PH) da cultura da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Capibaribe estão expostos na Figura 9, em que 9A revela os valores obtidos para região do Agreste e, 9B na região da Zona da Mata/Litoral. No diz respeito a região de Agreste (Figura 9A), a média da Pegada Hídrica Total (PHtotal) ao longo da década foi de 360,13 m³/ton, sendo a fração azul (PHazul), correspondente ao uso de água de irrigação, responsável por aproximadamente 74% desse total, com uma média de 267,12 m³/ton. Em contraste, a fração verde (PHverde), que representa a captação da água da chuva pela cultura, apresentou uma média de 93,01 m³/ton.

Figura 9 – Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata





A fração verde da Pegada Hídrica (PHverde) apresentou significativa variabilidade ao longo do período analisado, refletindo diretamente as flutuações no regime pluviométrico. No ano de 2010, por exemplo, quando a precipitação anual atingiu 813,1 mm, a PHverde foi estimada em 94 m³/ton. Em contraposição, no ano de 2012, caracterizado por um cenário de seca extrema, com precipitação de apenas 347,50 mm, a PHverde reduziu-se para 59 m³/ton. Essa redução evidencia a influência determinante da disponibilidade hídrica atmosférica no armazenamento de água no solo e, consequentemente, na sua captação pela cultura. Nos anos com índices pluviométricos mais elevados, como 2011 (Prec = 880,9 mm), a PHverde foi mais expressiva (114 m³/ton), indicando uma maior dependência da água da chuva para o crescimento da cultura.

Por conseguinte, a fração azul da Pegada Hídrica (PHazul) apresentou valores elevados, especialmente em anos de precipitação reduzida. No ano de 2012, por exemplo, a PHazul atingiu 288 m³/ton, evidenciando a necessidade de suplementação hídrica para viabilizar a produção agrícola em um contexto de escassez severa. Esse comportamento foi reiterado em outros anos de baixa precipitação, como 2015 (PHazul = 351 m³/ton) e 2016 (PHazul = 371 m³/ton). A predominância da PHazul sobre a PHverde reflete a forte dependência da irrigação na região, especialmente em anos com déficit hídrico acentuado, o que impõe desafios para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A Pegada Hídrica Total, resultante da soma das frações verde e azul, oscilou entre 273 m³/ton (em 2011) e 480 m³/ton (em 2016). Em anos mais chuvosos, como 2010 e

2011, a PHtotal apresentou valores reduzidos (292 m³/ton e 273 m³/ton, respectivamente), uma vez que a maior disponibilidade de água da chuva atenuou a necessidade de irrigação. Em contrapartida, nos anos mais secos, como 2012, 2015 e 2016, a PHtotal apresentou elevação significativa, ultrapassando 400 m³/ton, devido à maior dependência da PHazul para suprir as necessidades hídricas da cultura.

Em relação a região de Zona da Mata (Figura 9B), no período de 2010 a 2019, obteve-se uma média da Pegada Hídrica Total (PHtotal) de 255,74 m³/tonelada (ton), resultado da contribuição das frações verde (PHverde) e azul (PHazul), cujas médias foram de 151,41 m³/ton e 104,34 m³/ton, respectivamente. Esses valores indicam que, na Zona da Mata, a fração verde desempenha um papel predominante no suprimento hídrico da cultura, ao contrário do que se observa em regiões com menor precipitação, como a região de Agreste, onde há maior dependência da irrigação. A precipitação média anual na região durante a década analisada foi de 1.227,28 mm, com variações significativas entre os anos, o que influenciou diretamente a distribuição dos componentes da Pegada Hídrica.

A fração verde da Pegada Hídrica (PHverde), que representa o volume de água da chuva utilizado pela cultura, oscilou entre 115 m³/ton (em 2017) e 201 m³/ton (em 2014). Em anos com maior precipitação, como 2011 (1.771,6 mm), a PHverde foi elevada (155 m³/ton), demonstrando uma maior contribuição das chuvas para a disponibilidade hídrica no solo. No entanto, mesmo em anos com menor precipitação, como 2017 (921,6 mm), a PHverde permaneceu relativamente alta (115 m³/ton), o que indica que a umidade residual do solo pode ter contribuído para a manutenção da disponibilidade hídrica na cultura. O ano de 2014 apresentou a maior PHverde da série (201 m³/ton), possivelmente em razão de condições climáticas favoráveis à retenção de umidade no solo, além da distribuição temporal das chuvas ao longo do ciclo da cultura.

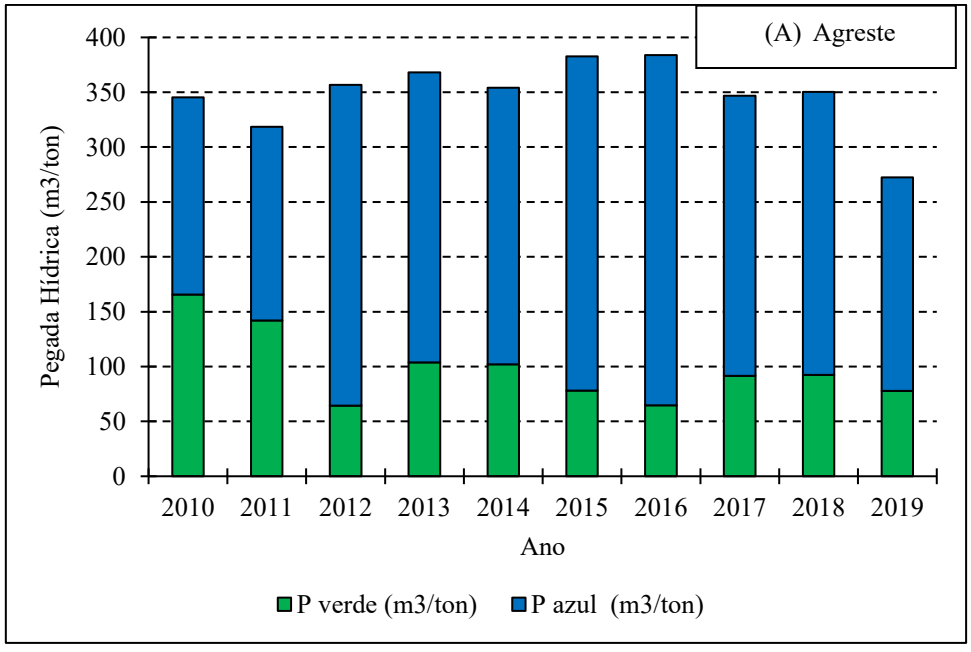
A fração azul da Pegada Hídrica (PHazul), que reflete a necessidade de irrigação suplementar, apresentou maior variabilidade interanual. Os valores mais elevados foram observados em anos de menor precipitação, como 2017 (PHazul = 147 m³/ton), 2015 (144 m³/ton) e 2012 (127 m³/ton), evidenciando a dependência da irrigação em períodos de déficit hídrico. Já em anos com precipitação acima da média, como 2011 (1.771,6 mm) e 2014 (1.468,4 mm), a PHazul foi reduzida (53 m³/ton e 44 m³/ton, respectivamente), demonstrando que a maior disponibilidade de água da chuva diminuiu a necessidade de irrigação.

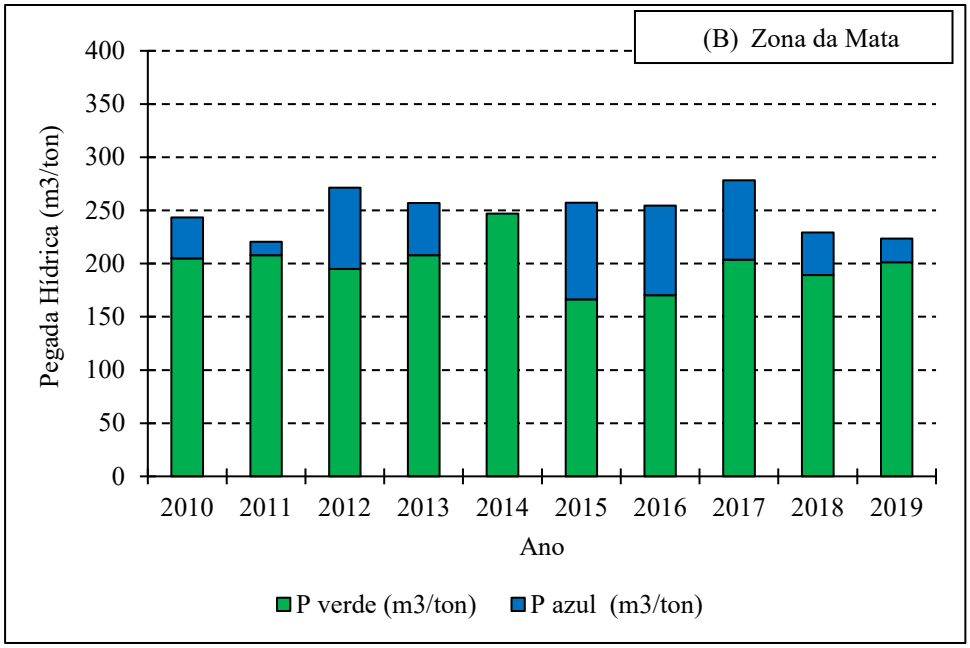
A Pegada Hídrica Total (PHtotal), que resulta da soma das frações verde e azul, variou entre 208 m³/ton (em 2011) e 291 m³/ton (em 2012). A análise desses valores evidencia que a PHtotal foi menor em anos de alta precipitação, como 2011 e 2014 (208 m³/ton e 245 m³/ton, respectivamente), enquanto foi mais elevada em anos de menor disponibilidade hídrica, como 2012 e 2018 (291 m³/ton e 268 m³/ton, respectivamente). Esse padrão reflete a relação inversa entre a disponibilidade hídrica atmosférica e a demanda por irrigação suplementar.

A variação da Pegada Hídrica na Zona da Mata demonstra a influência direta do regime pluviométrico sobre a demanda hídrica da cultura da cana-de-açúcar. Em anos de maior precipitação, a fração verde da PH se destaca, reduzindo a necessidade de irrigação e, consequentemente, a fração azul. Entretanto, em períodos de menor precipitação, a dependência da irrigação aumenta, elevando a PHazul e impactando a PHtotal. Esses resultados ressaltam a importância do monitoramento climático e da adoção de práticas de manejo sustentável da água na região, visando a otimização do uso dos recursos hídricos e a resiliência da produção agrícola frente às variações climáticas.

A análise da Pegada Hídrica (PH) na bacia do rio Ipojuca, abrangendo as regiões do Agreste e da Zona da Mata, revela contrastes significativos na dinâmica do uso da água para a produção agrícola. Essas diferenças estão diretamente relacionadas à disponibilidade hídrica e às características climáticas distintas de cada região, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata





A partir da avaliação dos valores médios obtidos no período de 2010 a 2019, constata-se que a Pegada Hídrica Total (PHtotal) na região do Agreste (Figura 10A) apresentou um valor médio de 347,91 m³/tonelada (ton), substancialmente superior à média verificada na Zona da Mata (Figura 10B), onde obteve-se o valor de 248,15 m³/ton. Esse resultado decorre, sobretudo, da maior dependência da irrigação na região do Agreste, refletida pela elevada Pegada Hídrica Azul (PHazul), cuja média anual foi de 249,64 m³/ton, em contraposição ao valor médio de 48,80 m³/ton na Zona da Mata.

O predomínio da PHazul no Agreste decorre das condições climáticas mais áridas da região, onde a precipitação média anual foi de apenas 604,35 mm, representando menos da metade do volume registrado na Zona da Mata, que apresentou um índice médio de 2.049,89 mm. Diante desse cenário de menor disponibilidade hídrica atmosférica, a irrigação torna-se essencial para a viabilidade da produção agrícola, especialmente em anos de seca severa. Em 2016, por exemplo, a precipitação foi de apenas 303,0 mm, levando a PHazul ao seu valor máximo na série histórica, com 319 m³/ton. Situação semelhante ocorreu em 2015, quando a precipitação foi de 411,9 mm e a PHazul atingiu 305 m³/ton, e em 2012, quando a combinação de um baixo índice pluviométrico (382,3 mm) e uma alta demanda por irrigação resultou em uma PHazul de 292 m³/ton. Esses dados evidenciam que, nos períodos de estiagem prolongada, a necessidade de irrigação intensificada eleva expressivamente a PHtotal na região.

Em contrapartida, a Zona da Mata (Figura 10B), com média de PHtotal de 248,15 m³/ton, apresenta uma predominância da Pegada Hídrica Verde (PHverde), indicando que

o suprimento hídrico das culturas é majoritariamente atendido pelas chuvas. A média da PHverde foi de 199,34 m³/ton, enquanto a PHazul manteve-se em níveis bastante reduzidos, oscilando entre 0 m³/ton (em 2014) e 91 m³/ton (em 2015), com uma média geral de 48,80 m³/ton. Esse padrão se deve ao elevado índice pluviométrico da região, que superou os 2.000 mm em diversos anos analisados, alcançando um máximo de 2.800,8 mm em 2011 e 2329,1 em 2014. Como resultado, a necessidade de irrigação na Zona da Mata permaneceu baixa ao longo do período avaliado, o que se refletiu em valores mais baixos de PHazul e, consequentemente, em uma menor PHtotal, principalmente no ano de 2011, 2014 e 2019.

Ao longo da série histórica, as variações interanuais da Pegada Hídrica demonstram padrões distintos entre as duas regiões. No Agreste, verifica-se uma relação inversa entre a precipitação e a PHazul, evidenciando que a escassez hídrica atmosférica requer um aporte substancial de água para irrigação. Em 2019, por exemplo, a precipitação relativamente mais elevada (610,5 mm) resultou na redução da PHazul para 195 m³/ton, demonstrando que mesmo pequenos aumentos na oferta hídrica natural podem atenuar a necessidade de irrigação. Na Zona da Mata, em contrapartida, a Pegada Hídrica apresenta maior estabilidade, com a PHtotal variando entre 220 m³/ton (em 2011) e 278 m³/ton (em 2017). Essa menor amplitude de variação sugere que a dependência de recursos hídricos adicionais para a produção agrícola na região é consideravelmente menor.

A Pegada Hídrica (PH) na bacia do rio Sirinhaém, é evidenciada na Figura 11, onde também é possível visualizar contrastes significativos entre as regiões do Agreste (Figura 11A) e da Zona da Mata (Figura 11B). Os valores médios entre 2010 e 2019 indicam que a Pegada Hídrica Total (PHtotal) no Agreste atingiu 329,60 m³/tonelada (ton), enquanto na Zona da Mata esse valor foi inferior, registrando uma média de 239,85 m³/ton. Esse comportamento decorre, sobretudo, da maior dependência de irrigação na região do Agreste, conforme demonstrado pela média da Pegada Hídrica Azul (PHazul), que alcançou 191,82 m³/ton, em contraste com os 72,46 m³/ton verificados na Zona da Mata.

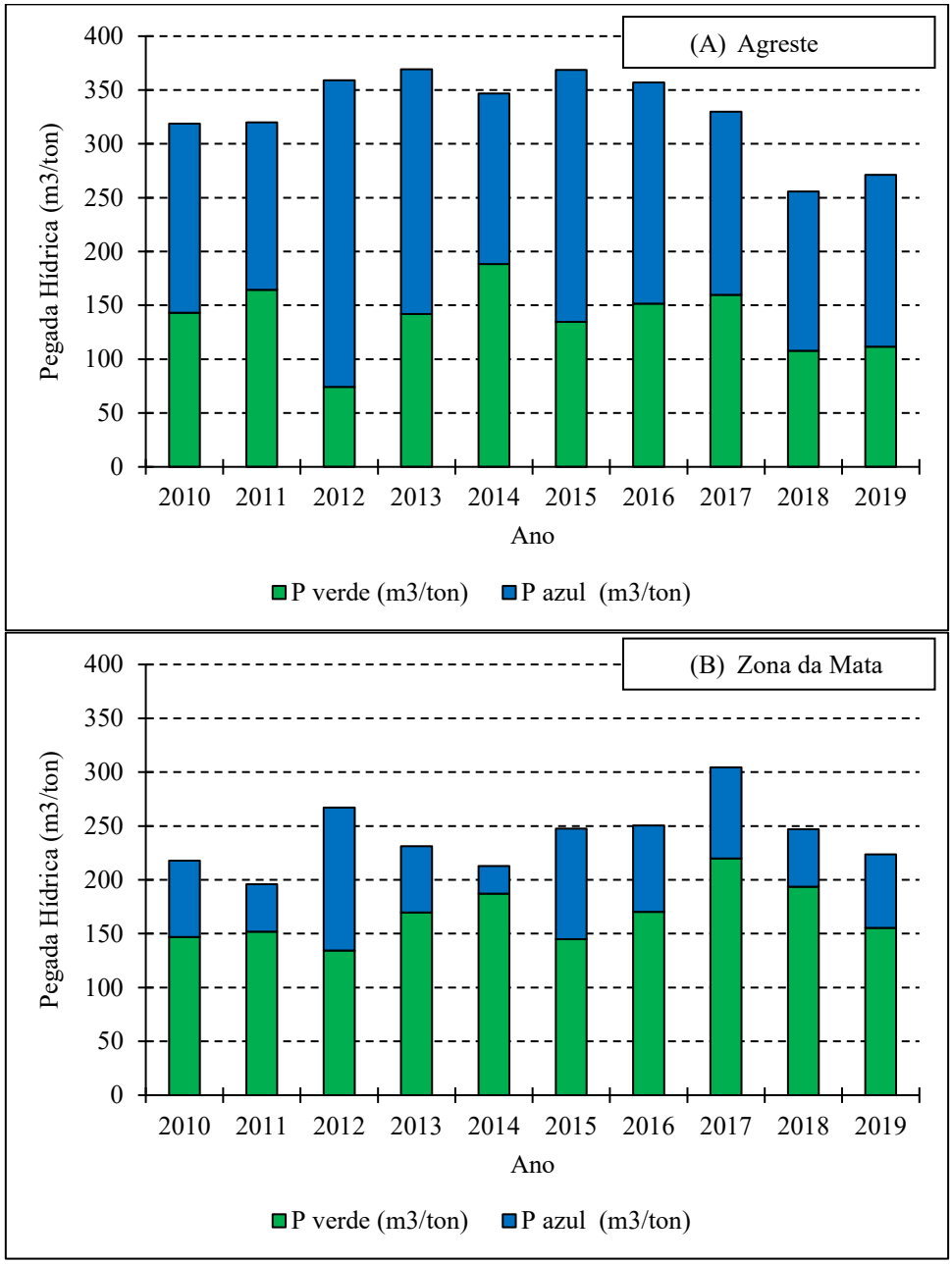
Nesta bacia, a elevada PHazul no Agreste reflete a menor disponibilidade hídrica atmosférica, evidenciada por um índice pluviométrico médio de 1.008,2 mm ao longo do período analisado. Em 2012, a precipitação foi de apenas 484,1 mm, levando a PHazul ao patamar de 285 m³/ton, o maior valor registrado na série histórica. Situação semelhante ocorreu em 2015 e 2013, quando os índices pluviométricos de 903,9 mm e 911,0 mm

coincidiram com PHazul de 234 m³/ton e 227 m³/ton, respectivamente. Esse cenário evidencia que, nos períodos de menor precipitação, a necessidade de irrigação se intensifica, elevando a PHtotal na região.

Na Zona da Mata, a predominância da Pegada Hídrica Verde (PHverde) reflete a maior contribuição das chuvas no suprimento hídrico das culturas agrícolas. A média da PHverde foi de 167,39 m³/ton, enquanto a PHazul se manteve em níveis reduzidos, variando de 26 m³/ton (em 2014) a 133 m³/ton (em 2012), com uma média de 72,46 m³/ton. Esse padrão é explicado pelo índice pluviométrico médio da região, que foi de 1.601,1 mm, possibilitando uma menor dependência da irrigação. Em anos com precipitação elevada, como 2017, quando foram registrados 2.182,5 mm, a PHazul permaneceu relativamente baixa (85 m³/ton), evidenciando que a oferta hídrica natural atendeu à maior parte das necessidades hídricas das culturas.

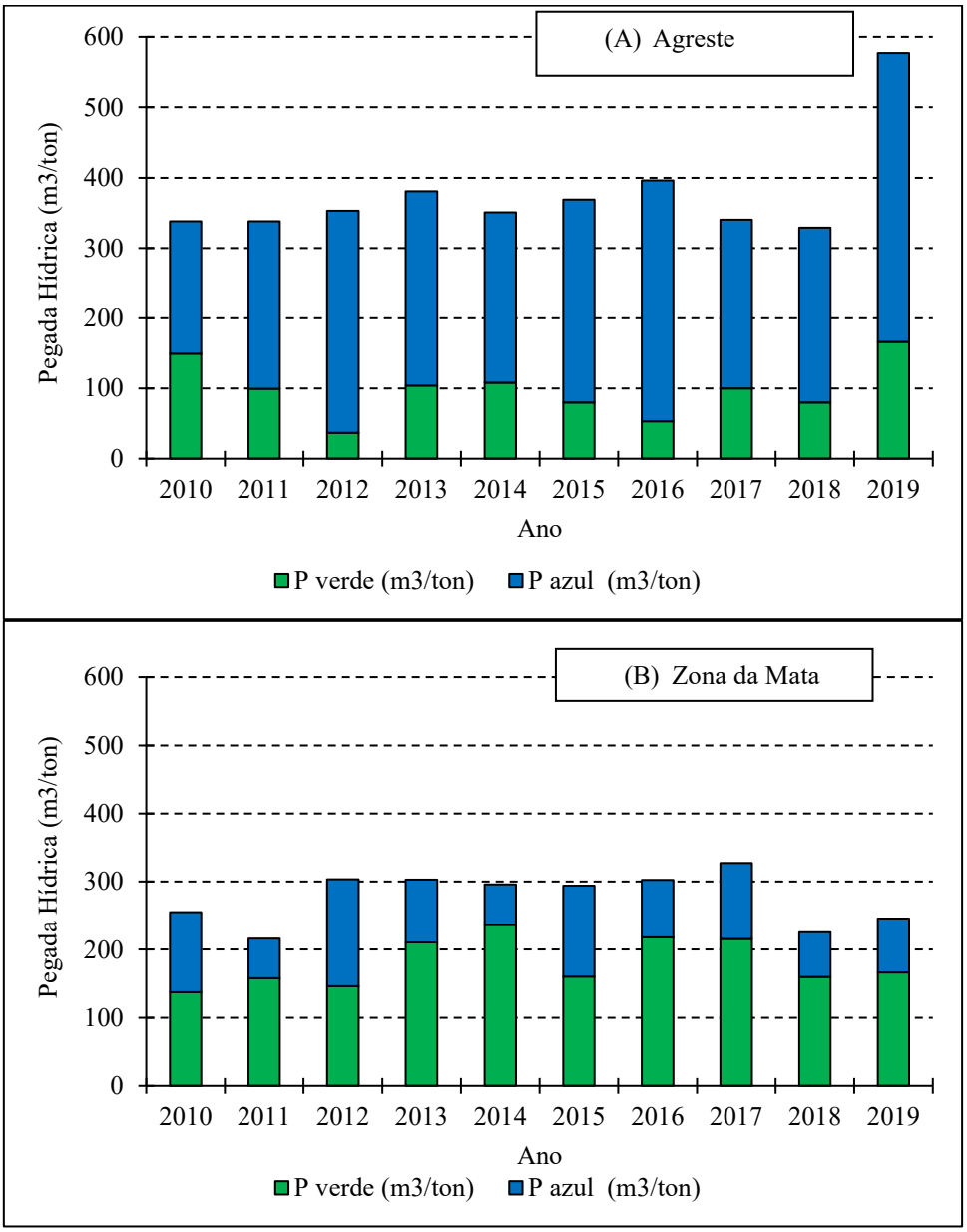
A variabilidade anual da Pegada Hídrica nas duas referidas regiões confirma padrões distintos. No Agreste, observa-se uma correlação inversa entre a precipitação e a PHazul, confirmando que a escassez hídrica atmosférica exige um maior aporte de água de irrigação. Em 2018, por exemplo, um índice pluviométrico de 812,2 mm contribuiu para a redução da PHazul para 148 m³/ton, refletindo um menor uso de água para irrigação. Já na Zona da Mata, as variações da PHtotal são menos acentuadas, uma vez que a disponibilidade hídrica natural reduz a necessidade de fontes adicionais de água. Mesmo em anos de menor precipitação, como 2012, quando foram registrados 990,5 mm, a PHtotal manteve-se em um patamar moderado de 267 m³/ton, sem grandes elevações na PHazul.

Figura 11 – Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata



No que se refere a Pegada Hídrica (PH) na bacia do rio Una, a Figura 12, revela os resultados obtidos, para as regiões do Agreste (Figura 12A) e da Zona da Mata (Figura 12B). A média da Pegada Hídrica Total (PHtotal) no Agreste atingiu 377,15 m³/tonelada (ton), enquanto na Zona da Mata esse valor foi substancialmente menor, registrando 276,86 m³/ton. Tal diferença reflete, sobretudo, a maior dependência de fontes hídricas artificiais na região do Agreste, conforme evidenciado pela elevada Pegada Hídrica Azul (PHazul), cuja média foi de 279,37 m³/ton, em contraposição aos 95,88 m³/ton verificados na Zona da Mata.

Figura 12 – Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do rio Una, (A) região de Agreste e (B) região da Zona Mata



A escassez hídrica atmosférica no Agreste é um fator determinante para a expressiva PHazul observada. Com uma precipitação média anual de apenas 523,7 mm ao longo do período analisado, a necessidade de irrigação para suprir as demandas agrícolas se intensifica. Essa condição se torna ainda mais evidente em anos de precipitação extremamente reduzida, como 2016, quando o índice pluviométrico atingiu apenas 240,5 mm, resultando em uma PHazul de 343 m³/ton, o maior valor registrado na série histórica. De forma semelhante, em 2012, com precipitação de 217,8 mm, a PHazul

atingiu 316 m³/ton, reforçando a relação direta entre baixa disponibilidade hídrica natural e maior extração de água para irrigação.

Na Zona da Mata, a predominância da Pegada Hídrica Verde (PHverde) destaca a maior contribuição das chuvas para o suprimento hídrico das culturas agrícolas. A PHverde média foi de 180,98 m³/ton, enquanto a PHazul manteve-se em patamares reduzidos, variando entre 58 m³/ton (em 2011) e 157 m³/ton (em 2012). Essa dependência menor de fontes artificiais de água está diretamente associada ao índice pluviométrico médio de 1.466,4 mm, significativamente superior ao observado no Agreste. Em anos de alta precipitação, como 2017, quando foram registrados 1.843,5 mm, a PHazul manteve-se relativamente baixa, em 111 m³/ton, demonstrando que a oferta hídrica natural atende, em grande parte, às necessidades das culturas agrícolas.

O comportamento anual da Pegada Hídrica em ambas as regiões na bacia do rio Una, revela padrões distintos de dependência hídrica. No Agreste, a oscilação da PHtotal acompanha as variações na precipitação, evidenciando que períodos de estiagem impõem maior necessidade de irrigação e, consequentemente, elevam a PHazul. Um exemplo expressivo ocorreu em 2019, quando, apesar de uma precipitação relativamente moderada de 593,1 mm, a PHazul atingiu 410 m³/ton, resultando na maior PHtotal da série histórica (577 m³/ton). Já na Zona da Mata, as variações da PHtotal são menos acentuadas, pois a maior disponibilidade hídrica natural mitiga a necessidade de suplementação hídrica artificial. Mesmo em anos de menor precipitação, como 2012 (979,4 mm), a PHtotal permaneceu dentro de uma faixa controlada, sem elevações abruptas na PHazul.

Diante dos resultados obtidos nas quatro bacias estudadas, observa-se que a gestão hídrica nas bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una deve ser planejada com base em estratégias diferenciadas, levando em consideração as especificidades climáticas e hidrológicas de cada região. No Agreste, a elevada dependência da Pegada Hídrica Azul (PHazul) destaca a urgência de aprimorar a eficiência no uso da água, principalmente por meio da modernização dos sistemas de irrigação e da adoção de práticas que promovam a conservação do solo e a retenção de umidade. Esse cenário é particularmente crítico em trechos das bacias do Capibaribe e do Ipojuca, onde a irregularidade pluviométrica impõe desafios adicionais à sustentabilidade dos recursos hídricos.

Na Zona da Mata, onde a Pegada Hídrica Verde (PHverde) predomina, as estratégias devem priorizar a preservação da disponibilidade hídrica natural. Medidas como o fortalecimento da cobertura vegetal, o controle do uso do solo e a manutenção de áreas de recarga são essenciais para garantir a resiliência dos mananciais. Esse contexto

é especialmente relevante nas bacias do Sirinhaém e do Una, onde a oferta hídrica natural desempenha um papel central na dinâmica do ciclo hidrológico.

A Pegada Hídrica estimada para a produção de cana-de-açúcar na região da Zona da Mata de Pernambuco variou entre 210 e 280 m³/t, valores significativamente superiores aos reportados por Adetoro et al. (2020) para o cultivo no rio Crocodile, na África do Sul, onde a Pegada Hídrica oscilou entre 85 e 100 m³/t. Essa diferença sugere que, mesmo localizada em uma região tropical, a Zona da Mata apresenta características ambientais e agronômicas que resultam em um maior consumo hídrico na produção dessa cultura. Diferenças no uso de irrigação, eficiência do sistema de drenagem e capacidade de retenção hídrica dos solos influenciam diretamente a Pegada Hídrica, neste caso, mesmo com condições climatológicas similares.

Ademais, a Zona da Mata pernambucana também apresenotu valores consideravelmente superiores aos reportados por Jorrat et al. (2018) para a província de Tucumán, na Argentina, onde a Pegada Hídrica da cultura foi estimada em aproximadamente 125 m³/t. Essa diferença é notável, considerando que Tucumán apresenta um clima subtropical, enquanto a Zona da Mata está inserida em uma região de clima tropical, onde, teoricamente, a disponibilidade hídrica seria mais favorável à produção agrícola com menor consumo de água.

A Pegada Hídrica Azul estimada para a produção de cana-de-açúcar na região do Agreste de Pernambuco variou entre 250 e 310 m³/t, valores significativamente inferiores aos reportados por Yuguda et al. (2020) para a província de Savannah, na Nigéria, onde a Pegada Hídrica Azul da cultura foi de aproximadamente 877 m³/t. Neste localidade, também ocorre clima é de , localizada em uma região de clima semiárido, apresenta baixos índices pluviométricos e elevada taxa de evapotranspiração A diferença observada entre os dois contextos pode ser atribuída a fatores climáticos, edafológicos e às práticas de manejo hídrico adotadas nas respectivas regiões.

Além das diferenças climáticas, o manejo da irrigação e a eficiência no uso da água são fatores determinantes na variação da Pegada Hídrica Azul entre as regiões. Em Savannah, a predominância de técnicas menos eficientes de irrigação pode aumentar as perdas hídricas por evaporação e percolação profunda, elevando a Pegada Hídrica Azul da cana-de-açúcar. Já no Agreste pernambucano, o emprego de sistemas de irrigação mais eficientes, como a irrigação localizada, pode contribuir para um menor consumo de água de origem superficial e subterrânea.

Na região de Lalgudi, localizada em uma área irrigada de clima semiárido, com precipitação média anual de 877,0 mm, Ramachandran et al. (2022) estimaram uma Pegada Hídrica Total média anual de 307 m³/ton no período de 1995 a 2017. O Agreste pernambucano também apresenta características de semi-aridez, embora com uma variabilidade pluviométrica mais acentuada em comparação à região indiana. A similaridade entre os valores de Pegada Hídrica nessas regiões pode ser atribuída, em parte, ao regime hídrico disponível e às práticas de manejo adotadas. Em Lalgudi, a média de 307 m³/ton foi obtida ao longo de mais de duas décadas, refletindo a influência das variações climáticas e das estratégias de irrigação aplicadas. No Agreste de Pernambuco, os valores variaram entre 250 e 310 m³/ton ao longo de um período de dez anos, em diferentes bacias hidrográficas, o que sugere que fatores como métodos de irrigação e características do solo podem impactar significativamente a eficiência no uso da água.

Resultados mais satifatórios foram identificados no estudo de Jahani et al. (2017), conduzido na província de Khuzestan, no sudoeste do Irã, uma região árida e semiárida. Nesse trabalho, a Pegada Hídrica Total para a produção de cana-de-açúcar foi estimada em 250 m³/ton, um valor relativamente baixo em comparação a outras pesquisas. Essa redução está associada, principalmente, ao aumento da produtividade da cultura, decorrente da melhoria das condições do solo, além da otimização do fluxo hídrico nas fazendas, onde o controle da irrigação é altamente eficiente.

Dessa forma, observa-se que, mesmo em regiões com características climáticas semelhantes, a adoção de práticas de controle no manejo do solo e da água pode reduzir a Pegada Hídrica Total em pelo menos 20%. A incorporação dessas diretrizes possibilita uma análise mais precisa da Pegada Hídrica em cada bacia, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais eficazes e adaptadas às especificidades locais. Assim, a gestão hídrica deve equilibrar o uso racional da água em áreas de maior escassez com a preservação dos mananciais em regiões de maior disponibilidade, assegurando a sustentabilidade dos recursos hídricos.

5.2 Análise Estatística

Na bacia do rio Capibaribe, os resultados da ANOVA, exposto nas Tabelas 9 e 10, evidenciam diferenças na influência dos fatores climatológicos sobre as componentes da Pegada Hídrica entre as regiões do Agreste e da Zona da Mata. De maneira geral, a precipitação apresentou valores de p estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$) em ambas

as regiões, refletindo sua forte influência no consumo de água verde e, consequentemente, na Pegada Hídrica verde. Esse resultado era esperado, uma vez que a disponibilidade hídrica natural está diretamente relacionada ao regime de chuvas, especialmente em regiões com alta dependência da precipitação para a manutenção da umidade do solo.

A evapotranspiração potencial e a umidade relativa do ar também demonstraram influência significativa sobre as componentes da Pegada Hídrica em ambas as regiões, embora com efeitos mais acentuados na Zona da Mata. Essa diferença pode estar associada às características climáticas e fisiográficas dessa região, onde a maior umidade e cobertura vegetal podem amplificar os efeitos desses fatores na dinâmica do balanço hídrico. No Agreste, onde a aridez é mais pronunciada, a influência da evapotranspiração pode ser mais limitada pela menor disponibilidade hídrica.

Por outro lado, a velocidade do vento e a insolação apresentaram valores de p menos expressivos em algumas análises, indicando uma influência menos significativa ou dependente de interações com outros fatores. Entretanto, na Zona da Mata, a insolação demonstrou associação relevante com a Pegada Hídrica azul e total, sugerindo que o aumento da radiação solar pode intensificar a demanda por irrigação e, consequentemente, o consumo de água azul. Este fato reforça a importância do microclima e das práticas de manejo na determinação da Pegada Hídrica nas diferentes regiões da bacia.

Tabela 9 – Resultados de p para a bacia do rio Capibaribe, região de Agreste ($p \leq 0.05$)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	5,26E-07	0,0003	0,0214	0,0180	0,1809
Evapotranspiração potencial (mm)	0,1258	0,0096	0,3487	0,0815	0,1933
Temperatura Média (ºC)	0,1083	0,1537	0,3290	0,1690	0,3342
Umidade relativa do ar (%)	0,1731	0,0316	0,6846	0,0276	0,0533
Insolação anual (h)	0,2088	0,0482	0,6960	0,0477	0,0814
Velocidade média do vento (m/s)	0,8694	0,7201	0,6995	0,5919	0,5041

Tabela 10 – Resultados de p para a bacia do rio Capibaribe, região de Zona da Mata e Litoral ($p \leq 0.05$)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,0056	0,0036	0,1234	0,0009	0,0092
Evapotranspiração potencial (mm)	0,0023	0,0001	0,0125	0,0004	0,1116
Temperatura Média (ºC)	0,1940	0,1186	0,2342	0,1767	0,4966

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Umidade relativa do ar (%)	0,4369	0,2649	0,7642	0,1745	0,0608
Insolação anual (h)	0,0290	0,0315	0,0660	0,0341	0,3241
Velocidade média do vento (m/s)	0,4566	0,2329	0,4001	0,2949	0,5258

Os resultados da ANOVA para a bacia do rio Ipojuca são revelados na Tabelas 11 e 12. No Agreste, a precipitação teve impacto significativo na demanda hídrica verde (p = 6,75E-09) e azul (p = 0,0001), assim como na Pegada Hídrica verde (p = 1,25E-05) e azul (p = 0,0006), reforçando a dependência hídrica da região em relação ao regime de chuvas. Ademais, a umidade relativa do ar e a insolação influenciaram a Pegada Hídrica azul e total (p entre 0,0242 e 0,0419), indicando que esses fatores afetam diretamente a demanda por irrigação. Em contrapartida, a evapotranspiração potencial, a temperatura média e a velocidade do vento não apresentaram impacto significativo, sugerindo um menor controle sobre o consumo hídrico.

Na Zona da Mata, a precipitação manteve influência significativa sobre a demanda hídrica verde (p = 0,0099) e azul (p = 0,0141), bem como sobre a Pegada Hídrica azul (p = 0,0160). No entanto, a evapotranspiração potencial foi um fator determinante para praticamente todas as componentes da Pegada Hídrica (p < 0,05), possivelmente devido à maior umidade e disponibilidade hídrica na região. A umidade relativa do ar também apresentou influência relevante sobre a demanda hídrica e a Pegada Hídrica azul e total, evidenciando sua relação com a necessidade de irrigação. Já a temperatura média e a velocidade do vento tiveram impacto pouco expressivo, sugerindo menor relevância na regulação do consumo hídrico na região.

Tabela 11 – Resultados de p para a bacia do rio Ipojuca, região de Agreste (p ≤ 0.05)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	6,75E-09	0,0001	1,25E-05	0,0006	0,2214
Evapotranspiração potencial (mm)	0,4422	0,0873	0,4305	0,1986	0,2409
Temperatura Média (ºC)	0,5273	0,4550	0,4447	0,5634	0,8901
Umidade relativa do ar (%)	0,2200	0,0419	0,3081	0,0301	0,0242
Insolação anual (h)	0,1449	0,0256	0,2072	0,0248	0,0424
Velocidade média do vento (m/s)	0,5845	0,9646	0,6514	0,6605	0,8182

Tabela 12 – Resultados de p para a bacia do rio Ipojuca, região de Zona da Mata e Litoral ($p \leq 0.05$)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,0099	0,0141	0,0676	0,0160	0,1391
Evapotranspiração potencial (mm)	0,0011	3,90E-05	0,0138	0,0001	0,0346
Temperatura Média (ºC)	0,1676	0,1031	0,2477	0,1298	0,2938
Umidade relativa do ar (%)	0,0074	0,0160	0,1329	0,0120	0,0471
Insolação anual (h)	0,0639	0,0571	0,0074	0,0897	0,9686
Velocidade média do vento (m/s)	0,1519	0,0831	0,2575	0,0923	0,1864

Nas Tabelas 13 e 14, são exposto os resultados da ANOVA para a bacia do rio Sirinhaém para as regiões do Agreste e da Zona da Mata. No Agreste, a precipitação exerceu influência significativa sobre a demanda hídrica verde ($p = 0,0014$) e azul ($p = 0,0021$), além da Pegada Hídrica verde ($p = 0,0047$) e azul ($p = 0,0284$), reforçando sua importância na disponibilidade hídrica da região. A evapotranspiração potencial também se destacou, afetando a demanda hídrica azul ($p = 0,0003$) e a Pegada Hídrica azul ($p = 0,0004$). A insolação teve impacto significativo sobre várias componentes da Pegada Hídrica ($p \leq 0,0441$), evidenciando sua relação com a demanda evaporativa. Contudo, a temperatura média e a velocidade do vento apresentaram pouca influência, com exceção da velocidade do vento, que impactou a Pegada Hídrica total ($p = 0,0007$).

Na Zona da Mata da bacia do rio Sirinhaém, os fatores climáticos tiveram menor influência sobre a Pegada Hídrica em comparação ao Agreste. A evapotranspiração potencial foi a variável mais relevante, afetando a demanda hídrica azul ($p = 0,0292$) e a Pegada Hídrica azul ($p = 0,0203$), além da Pegada Hídrica total ($p = 0,0113$), sugerindo que esse fator desempenha um papel importante na regulação do consumo hídrico na região. A umidade relativa do ar também influenciou a demanda hídrica azul ($p = 0,0292$) e a Pegada Hídrica azul ($p = 0,0249$), reforçando a interação entre a umidade atmosférica e a necessidade de irrigação. A precipitação e a insolação apresentaram menor impacto estatístico, enquanto a temperatura média e a velocidade do vento não demonstraram influência significativa sobre os indicadores avaliados.

Tabela 13 – Resultados de p para a bacia do rio Sirinhaém, região de Agreste ($p \leq 0.05$)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,0014	0,0021	0,0047	0,0284	0,7656
Evapotranspiração potencial (mm)	0,0107	0,0003	0,0869	0,0004	0,1003

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Temperatura Média (ºC)	0,3297	0,5202	0,2012	0,8413	0,4289
Umidade relativa do ar (%)	0,1434	0,0430	0,1734	0,1005	0,5156
Insolação anual (h)	0,0073	0,0065	0,0441	0,0154	0,4032
Velocidade média do vento (m/s)	0,9245	0,5222	0,3656	0,1024	0,0007

Tabela 14 – Resultados de p para a bacia do rio Sirinhaém, região de Zona da Mata ($p \leq 0.05$)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,0498	0,1006	0,0779	0,1388	0,9935
Evapotranspiração potencial (mm)	0,3168	0,0292	0,8565	0,0203	0,0113
Temperatura Média (ºC)	0,4879	0,8637	0,3657	0,9206	0,3842
Umidade relativa do ar (%)	0,0831	0,0292	0,3747	0,0249	0,2327
Insolação anual (h)	0,1790	0,0666	0,3370	0,1238	0,5414
Velocidade média do vento (m/s)	0,9289	0,4844	0,6312	0,4424	0,2298

No que tange a bacia hidrográfica do rio Una, os resultados da ANOVA são mostrados nas Tabelas 15 e 16. Na região do Agreste, a precipitação foi o fator climático mais influente, impactando significativamente a demanda hídrica verde (p = 7,51E-08) e azul (p = 0,0003), além da Pegada Hídrica verde (p = 0,0027). A insolação também apresentou influência estatisticamente significativa sobre a demanda hídrica azul (p = 0,0019) e a Pegada Hídrica azul (p = 0,0498), indicando que a radiação solar contribui para o aumento da evapotranspiração e, consequentemente, para a necessidade de irrigação. A evapotranspiração potencial teve um impacto moderado sobre a demanda hídrica azul (p = 0,0150), enquanto a temperatura média influenciou a Pegada Hídrica azul (p = 0,0118). Em contrapartida, a umidade relativa do ar e a velocidade média do vento não apresentaram influência estatisticamente significativa sobre os indicadores analisados.

Na Zona da Mata, a precipitação manteve sua influência sobre a demanda hídrica verde (p = 0,0067) e azul (p = 0,0148), além da Pegada Hídrica azul (p = 0,0439). A evapotranspiração potencial foi um fator determinante para a Pegada Hídrica azul (p = 0,0009) e a demanda hídrica azul (p = 0,0019), reforçando seu papel na regulação da necessidade hídrica das culturas. A umidade relativa do ar também teve impacto significativo sobre a demanda hídrica azul (p = 0,0167) e a Pegada Hídrica azul (p =

0,0312), sugerindo que a disponibilidade atmosférica de umidade influencia a necessidade de irrigação. A velocidade média do vento apresentou influência marginal sobre a Pegada Hídrica azul (p = 0,0491), enquanto a temperatura média e a insolação não demonstraram impacto estatisticamente relevante sobre os indicadores avaliados.

Tabela 15 – Resultados de p para a bacia do rio Una, região de Agreste (p ≤ 0.05)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	7,51E-08	0,0003	0,0027	0,1007	0,9346
Evapotranspiração potencial (mm)	0,2169	0,0150	0,3038	0,2788	0,7081
Temperatura Média (ºC)	0,1630	0,3033	0,8268	0,0118	0,0604
Umidade relativa do ar (%)	0,9188	0,3106	0,7825	0,9437	0,9314
Insolação anual (h)	0,0117	0,0019	0,0892	0,0498	0,4922
Velocidade média do vento (m/s)	0,7368	0,3925	0,3263	0,5671	0,3001

Tabela 16 – Resultados de p para a bacia do rio Una, região de Zona da Mata (p ≤ 0.05)

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,0067	0,0148	0,0788	0,0439	0,9400
Evapotranspiração potencial (mm)	0,0166	0,0019	0,3570	0,0009	0,1769
Temperatura Média (ºC)	0,8578	0,8364	0,9570	0,8591	0,9160
Umidade relativa do ar (%)	0,0110	0,0167	0,0599	0,0312	0,9429
Insolação anual (h)	0,4252	0,2855	0,9451	0,2316	0,3341
Velocidade média do vento (m/s)	0,1182	0,0360	0,3881	0,0491	0,4495

Ademais, a análise de correlação consiste na ferramenta que desempenha um papel fundamental na identificação das interações entre os fatores climáticos e os componentes da Pegada Hídrica, permitindo compreender como variáveis atmosféricas influenciam a demanda e o uso da água nas bacias estudadas. Nesse contexto, foram avaliadas as relações entre precipitação, evapotranspiração potencial, temperatura média, umidade relativa do ar, insolação anual e velocidade média do vento com os diferentes indicadores da Pegada Hídrica, incluindo a demanda hídrica verde e azul por hectare.

Os resultados apresentados nas Tabelas 17 e 18, permite compreender as relações entre as componentes da pegada hídrica e os fatores climáticos nas regiões do Agreste e da Zona da Mata na bacia do rio Capibaribe. Essas correlações evidenciam como as

variáveis climáticas influenciam a demanda hídrica e a eficiência no uso da água para a produção agrícola, destacando diferenças significativas entre as duas regiões.

Tabela 17 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, região de Agreste

Variável	**Demanda hídrica verde (m^3/ha)**	**Demanda hídrica azul (m^3/ha)**	**P verde (m3/ton)**	**P azul (m3/ton)**	**P total (m3/ton)**
Precipitação (mm)	0,98	-0,90	0,71	-0,72	-0,46
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,52	0,77	-0,33	0,58	0,45
Temperatura Média (ºC)	-0,54	0,49	-0,34	0,47	0,34
Umidade relativa do ar (%)	0,47	-0,68	0,15	-0,69	-0,63
Insolação anual (h)	-0,44	0,64	-0,14	0,64	0,58
Velocidade média do vento (m/s)	0,06	0,13	-0,14	-0,19	-0,24

Tabela 18 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, região de Zona da Mata

Variável	**Demanda hídrica verde (m^3/ha)**	**Demanda hídrica azul (m^3/ha)**	**P verde (m3/ton)**	**P azul (m3/ton)**	**P total (m3/ton)**
Precipitação (mm)	0,80	-0,82	0,52	-0,87	-0,77
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,84	0,93	-0,75	0,90	0,53
Temperatura Média (ºC)	-0,45	0,53	-0,41	0,46	0,24
Umidade relativa do ar (%)	0,28	-0,39	0,11	-0,47	-0,61
Insolação anual (h)	-0,68	0,68	-0,60	0,67	0,35
Velocidade média do vento (m/s)	-0,27	0,42	-0,30	0,37	0,23

Na região do Agreste (Tabela 17), a precipitação apresenta forte correlação positiva com a demanda hídrica verde (0,98), indicando que o volume de chuva é o principal fator para o uso da água armazenada no solo. A correlação negativa com a demanda hídrica azul (-0,90) e a pegada hídrica azul por tonelada (Pazul, -0,72) sugere menor necessidade de irrigação em anos mais chuvosos. A pegada hídrica verde por tonelada (Pverde) exibe correlação positiva (0,71), enquanto a pegada hídrica total (PHtotal) apresenta correlação negativa moderada (-0,46), evidenciando menor dependência de água adicional em períodos úmidos. A evapotranspiração potencial mostra correlação negativa com a demanda hídrica verde (-0,52) e positiva com a demanda hídrica azul (0,77), indicando maior necessidade de irrigação em condições de

evapotranspiração elevada. Esse padrão se repete na Pverde (-0,33) e na Pazul (0,58), destacando a relevância desse fator para a gestão hídrica. A temperatura média e a insolação anual apresentam correlações positivas com a demanda hídrica azul e a Pazul, reforçando que condições mais quentes e ensolaradas aumentam a necessidade de irrigação. A umidade relativa do ar exibe correlação negativa com a demanda hídrica azul (-0,68) e a Pazul (-0,69), sugerindo que ambientes mais úmidos reduzem a dependência de água adicional. A velocidade média do vento não apresenta correlações significativas, indicando baixa influência na dinâmica hídrica.

Na Zona da Mata (Tabela 18), a precipitação mantém forte correlação positiva com a demanda hídrica verde (0,80) e negativa com a demanda hídrica azul (-0,82), padrão semelhante ao do Agreste. A Pverde apresenta correlação positiva (0,52), enquanto a Pazul exibe correlação negativa (-0,87). A correlação negativa entre precipitação e PHtotal (-0,77) é mais intensa do que no Agreste, evidenciando maior dependência das chuvas para a eficiência hídrica. A evapotranspiração potencial mostra correlação negativa com a demanda hídrica verde (-0,84) e positiva com a demanda hídrica azul (0,93), indicando aumento da necessidade de irrigação em condições de maior evapotranspiração. A Pverde (-0,75) e a Pazul (0,90) reforçam a relevância dessa variável na gestão hídrica. A temperatura média e a insolação anual apresentam correlações positivas com a demanda hídrica azul e a Pazul, embora com menor intensidade em comparação ao Agreste. A umidade relativa do ar exibe correlação negativa com a Pazul (-0,47) e a PHtotal (-0,61), indicando que ambientes mais úmidos reduzem a dependência de irrigação. A velocidade média do vento, assim como no Agreste, não apresenta correlação significativa, sugerindo influência limitada sobre a dinâmica hídrica.

Na bacia do rio Ipojuca (Tabelas 19 e 20), no Agreste, a precipitação exibe correlação extremamente forte e positiva com a demanda hídrica verde (0,99), reforçando a influência da chuva no uso da água no solo. A Pverde apresenta correlação positiva (0,96), enquanto a demanda hídrica azul (-0,94) e a Pazul (-0,89) mostram correlações negativas, evidenciando redução significativa da necessidade de irrigação em anos chuvosos. A PHtotal, com correlação negativa moderada (-0,42), sugere menor dependência de água adicional em períodos de maior pluviosidade.

Tabela 19 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, região de Agreste

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,99	-0,94	0,96	-0,89	-0,42
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,27	0,57	-0,28	0,44	0,41
Temperatura Média (ºC)	-0,23	0,27	-0,27	0,21	0,05
Umidade relativa do ar (%)	0,43	-0,65	0,36	-0,68	-0,70
Insolação anual (h)	-0,50	0,70	-0,44	0,70	0,65
Velocidade média do vento (m/s)	0,20	-0,02	0,16	-0,16	-0,08

Tabela 20 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, região de Zona da Mata

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,77	-0,74	0,60	-0,73	-0,50
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,87	0,94	-0,74	0,94	0,67
Temperatura Média (ºC)	-0,47	0,55	-0,40	0,51	0,37
Umidade relativa do ar (%)	0,78	-0,73	0,51	-0,75	-0,64
Insolação anual (h)	-0,60	0,62	-0,78	0,56	0,01
Velocidade média do vento (m/s)	-0,49	0,57	-0,40	0,56	0,46

A evapotranspiração potencial apresenta correlação moderada com a demanda hídrica azul (0,57) e a Pazul (0,44), indicando que taxas mais elevadas aumentam a necessidade de irrigação. Em contraste, a correlação com a demanda hídrica verde e a Pverde é fraca e negativa (-0,27 e -0,28), sugerindo menor influência sobre o uso da água da chuva. A temperatura média e a insolação anual possuem correlações fracas com a demanda hídrica azul e a Pazul, evidenciando que condições mais quentes e ensolaradas intensificam a dependência de irrigação. Já a umidade relativa do ar apresenta correlação negativa moderada com a demanda hídrica azul (-0,65) e a Pazul (-0,68), indicando que ambientes mais úmidos reduzem a necessidade de irrigação. A velocidade média do vento não demonstra correlação significativa, sugerindo influência limitada na dinâmica hídrica da região.

Na Zona da Mata, a precipitação mantém correlação positiva forte com a demanda hídrica verde (0,77) e negativa com a demanda hídrica azul (-0,74), demonstrando a dependência das chuvas para a eficiência hídrica. A evapotranspiração potencial exibe correlação negativa forte com a demanda hídrica verde (-0,87) e positiva muito forte com

a demanda hídrica azul (0,94), indicando que taxas elevadas aumentam significativamente a necessidade de irrigação. A umidade relativa do ar possui correlação positiva forte com a demanda hídrica verde (0,78) e negativa moderada com a demanda hídrica azul (-0,73) e a Pazul (-0,75), reforçando a redução da dependência de irrigação em ambientes mais úmidos. A velocidade média do vento apresenta correlação moderada com a demanda hídrica verde (-0,49) e a demanda hídrica azul (0,57), sugerindo um impacto limitado na dinâmica hídrica da região.

Na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, os coefiencites de correçação obtidos são expostos na Tabela 21 e 22. No Agreste (Tabela 21), a precipitação possui correlação positiva forte com a demanda hídrica verde (0,86) e a Pverde (0,81), evidenciando seu papel no armazenamento de água no solo. Sua relação negativa com a demanda hídrica azul (-0,84) e a Pazul (-0,69) indica menor necessidade de irrigação em anos chuvosos. A correlação fraca entre precipitação e PHtotal (-0,11) sugere que outros fatores influenciam a eficiência hídrica total da região.

Tabela 21– Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, região de Agreste

Variável	**Demanda hídrica verde (m^3/ha)**	**Demanda hídrica azul (m^3/ha)**	**P verde (m3/ton)**	**P azul (m3/ton)**	**P total (m3/ton)**
Precipitação (mm)	0,86	-0,84	0,81	-0,69	-0,11
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,76	0,90	-0,57	0,90	0,55
Temperatura Média (ºC)	-0,34	0,23	-0,44	0,07	-0,28
Umidade relativa do ar (%)	0,50	-0,65	0,47	-0,55	-0,23
Insolação anual (h)	-0,78	0,79	-0,64	0,74	0,30
Velocidade média do vento (m/s)	-0,03	0,23	0,32	0,55	0,88

Tabela 22 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, região de Zona da Mata

Variável	**Demanda hídrica verde (m^3/ha)**	**Demanda hídrica azul (m^3/ha)**	**P verde (m3/ton)**	**P azul (m3/ton)**	**P total (m3/ton)**
Precipitação (mm)	0,63	-0,55	0,58	-0,50	0,00
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,35	0,68	0,07	0,71	0,76
Temperatura Média (ºC)	0,25	0,06	0,32	0,04	0,31
Umidade relativa do ar (%)	0,57	-0,68	0,32	-0,70	-0,42
Insolação anual (h)	-0,46	0,60	-0,34	0,52	0,22

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Velocidade média do vento (m/s)	0,03	0,25	0,17	0,27	0,42

A evapotranspiração potencial apresenta correlação negativa moderada com a demanda hídrica verde (-0,76) e positiva forte com a demanda hídrica azul (0,90) e a Pazul (0,90), evidenciando que taxas elevadas aumentam a dependência de irrigação. A temperatura média exibe correlações fracas com os componentes da pegada hídrica, sugerindo influência limitada. A umidade relativa do ar correlaciona-se moderadamente com a demanda hídrica verde (0,50) e negativamente com a demanda hídrica azul (-0,65), indicando que ambientes úmidos reduzem a necessidade de irrigação. Já a insolação anual apresenta correlação negativa moderada com a demanda hídrica verde (-0,78) e positiva com a demanda hídrica azul (0,79), reforçando a maior dependência de irrigação em períodos ensolarados. A velocidade do vento não exibe correlações significativas, exceto com a PHtotal (0,88), sugerindo influência indireta.

Na Zona da Mata (Tabela 22), as correlações seguem padrões semelhantes, mas com intensidades reduzidas. A precipitação mantém correlação positiva moderada com a demanda hídrica verde (0,63) e negativa com a demanda hídrica azul (-0,55), além de padrões semelhantes para a Pverde (0,58) e a Pazul (-0,50). A correlação nula entre precipitação e PHtotal (0,00) sugere menor influência da chuva na eficiência hídrica total. A evapotranspiração potencial apresenta correlação negativa fraca com a demanda hídrica verde (-0,35) e positiva moderada com a demanda hídrica azul (0,68), refletindo maior necessidade de irrigação com taxas mais altas, o que se repete na Pazul (0,71) e na PHtotal (0,76).

A temperatura média e a insolação anual exibem correlações fracas com os componentes da pegada hídrica, indicando influência reduzida. A umidade relativa do ar correlaciona-se positivamente com a demanda hídrica verde (0,57) e negativamente com a demanda hídrica azul (-0,68), reforçando que ambientes úmidos diminuem a dependência de irrigação. A velocidade do vento apresenta correlações fracas com a demanda hídrica azul (0,25) e a PHtotal (0,42), sugerindo impacto limitado.

Na bacia do rio Una, os coeficientes de correlação de Pearson estão expostos nas Tabelas 23 e 24. No Agreste (Tabela 23), a precipitação exibe correlação positiva extremamente forte com a demanda hídrica verde (0,99) e moderada com a Pverde (0,83), evidenciando sua importância para o armazenamento de água no solo. Em contrapartida,

apresenta correlação negativa forte com a demanda hídrica azul (-0,91) e moderada com a Pazul (-0,55), indicando menor necessidade de irrigação em anos chuvosos. A relação praticamente nula entre precipitação e PHtotal (-0,03) sugere que a eficiência hídrica total é influenciada por outros fatores além da chuva.

Tabela 23 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Una, região de Agreste

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,99	-0,91	0,83	-0,55	-0,03
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,43	0,74	-0,36	0,38	0,14
Temperatura Média (ºC)	-0,48	0,36	-0,08	0,75	0,61
Umidade relativa do ar (%)	0,04	-0,36	0,10	-0,03	0,03
Insolação anual (h)	-0,75	0,85	-0,56	0,63	0,25
Velocidade média do vento (m/s)	-0,12	0,30	-0,35	-0,21	-0,36

Tabela 24 – Análise de correlação das variáveis climatológicas na bacia hidrográfica do rio Una, região de Zona Mata

Variável	Demanda hídrica verde (m^3/ha)	Demanda hídrica azul (m^3/ha)	P verde (m3/ton)	P azul (m3/ton)	P total (m3/ton)
Precipitação (mm)	0,79	-0,74	0,58	-0,65	-0,03
Evapotranspiração potencial (mm)	-0,73	0,85	-0,33	0,87	0,46
Temperatura Média (ºC)	-0,07	0,08	-0,02	0,06	0,04
Umidade relativa do ar (%)	0,76	-0,73	0,61	-0,68	-0,03
Insolação anual (h)	-0,28	0,38	-0,03	0,42	0,34
Velocidade média do vento (m/s)	-0,53	0,66	-0,31	0,63	0,27

A evapotranspiração apresenta correlação negativa moderada com a demanda hídrica verde (-0,43) e positiva forte com a demanda hídrica azul (0,74), indicando maior dependência de irrigação em taxas elevadas. Esse padrão também ocorre na Pazul (0,38), mas de forma menos intensa. A temperatura média exibe correlação positiva moderada com a Pazul (0,75) e a PHtotal (0,61), sugerindo que o aumento térmico eleva a demanda hídrica na produção agrícola. Já a umidade relativa do ar não apresenta correlações significativas, indicando influência limitada.

A insolação anual correlaciona-se negativamente com a demanda hídrica verde (-0,75) e positivamente com a demanda hídrica azul (0,85), evidenciando que maior

radiação solar intensifica a necessidade de irrigação. A velocidade média do vento não demonstra correlações expressivas, exceto uma fraca correlação negativa com a PHtotal (-0,36), sugerindo impacto reduzido na dinâmica hídrica.

Na Zona da Mata (Tabela 23), os padrões observados no Agreste se mantêm, mas com menor intensidade. A precipitação tem correlação positiva moderada com a demanda hídrica verde (0,79) e negativa com a demanda hídrica azul (-0,74), além de associações com a Pverde (0,58) e a Pazul (-0,65). A correlação praticamente nula entre precipitação e PHtotal (-0,03) indica baixa influência das chuvas na eficiência hídrica total.

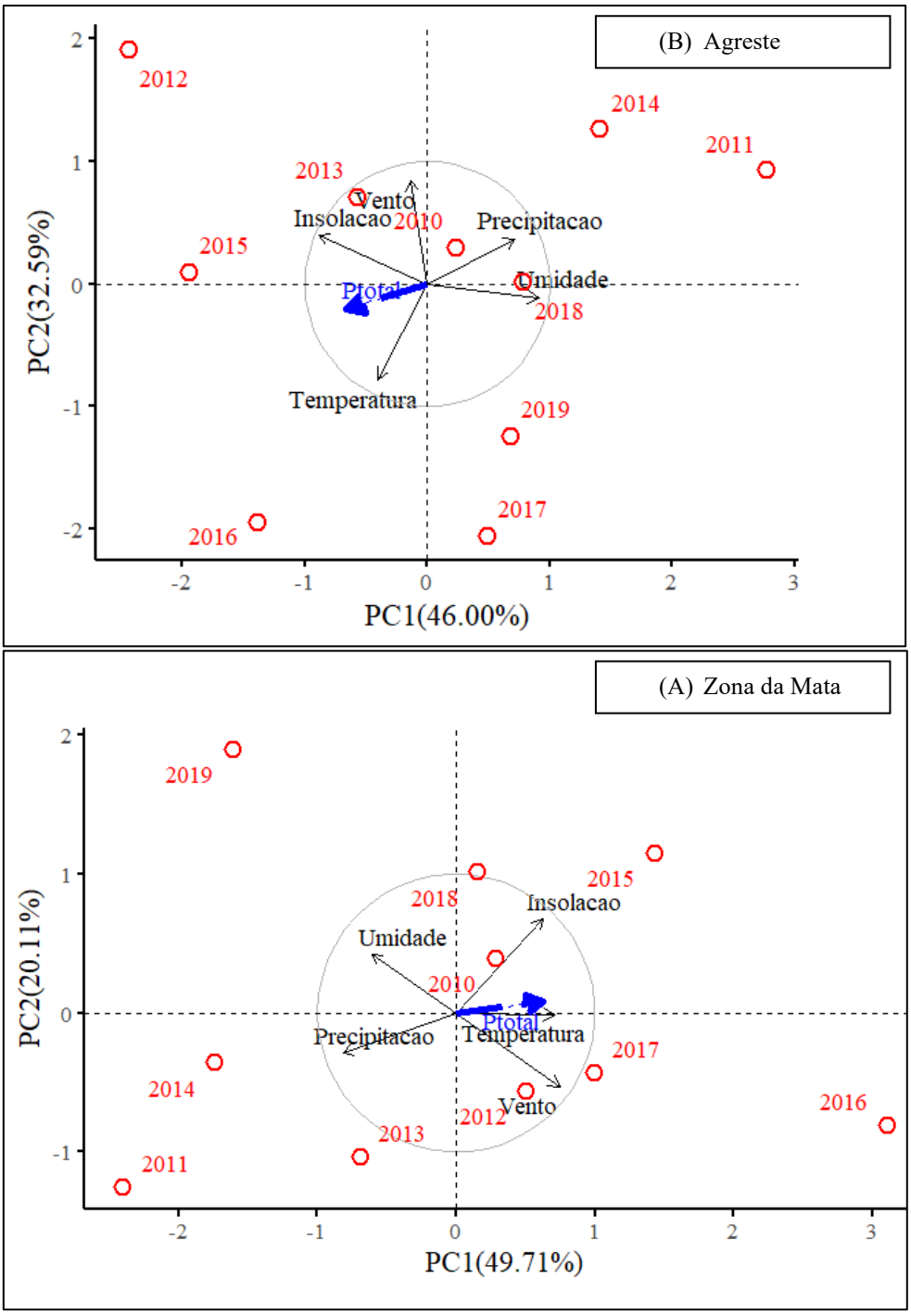
A evapotranspiração mantém correlação negativa moderada com a demanda hídrica verde (-0,73) e positiva forte com a demanda hídrica azul (0,85), reforçando que taxas elevadas ampliam a necessidade de irrigação, o que se reflete na Pazul (0,87) e na PHtotal (0,46). A temperatura média não apresenta correlações relevantes, sugerindo influência reduzida. A umidade relativa do ar correlaciona-se positivamente com a demanda hídrica verde (0,76) e negativamente com a demanda hídrica azul (-0,73), indicando que maior umidade reduz a necessidade de irrigação. Ademais, a insolação anual tem correlação fraca com a demanda hídrica azul (0,38) e a PHtotal (0,34), sugerindo influência moderada. Já a velocidade média do vento exibe correlações positivas moderadas com a demanda hídrica azul (0,66) e a PHtotal (0,27), indicando impacto limitado na dinâmica hídrica.

Na região do Agreste (Tabela 24), as correlações entre fatores climáticos e demanda hídrica evidenciam uma forte dependência da Pegada Hídrica Azul (PHazul), especialmente em anos de baixa precipitação. A evapotranspiração potencial e a insolação anual apresentam correlação positiva com a demanda hídrica azul, indicando que condições climáticas mais quentes e ensolaradas intensificam a necessidade de irrigação. Embora a precipitação esteja positivamente correlacionada com a Pegada Hídrica Verde (PHverde), seu impacto na redução da PHazul em períodos secos é limitado, o que ressalta a necessidade de sistemas de irrigação mais eficientes para garantir a sustentabilidade hídrica da produção agrícola.

A última análise estatística realizada consiste na Análise de Componentes Principais (PCA). A PCA da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, é apresentada na Figura 13, onde se demonstra a variabilidade dos fatores climáticos que influenciam a bacia do rio Capibaribe nas regiões do Agreste (B) e da Zona da Mata (A). No Agreste, o primeiro componente principal (PC1), que explica 46% da variância, é fortemente influenciado pela precipitação e umidade relativa do ar, enquanto a insolação e a velocidade do vento

apresentam maior contribuição no segundo componente principal (PC2), que explica 32,59% da variância. Observa-se que os anos se distribuem de forma dispersa, indicando variabilidade temporal nas condições climáticas. Já na Zona da Mata, o PC1 explica 49,71% da variância e está associado à temperatura e ao vento, enquanto o PC2, que responde por 20,11%, está relacionado principalmente à umidade e precipitação. A disposição dos anos sugere que diferentes variáveis climáticas foram predominantes em diferentes períodos, influenciando a dinâmica hidrológica da bacia.

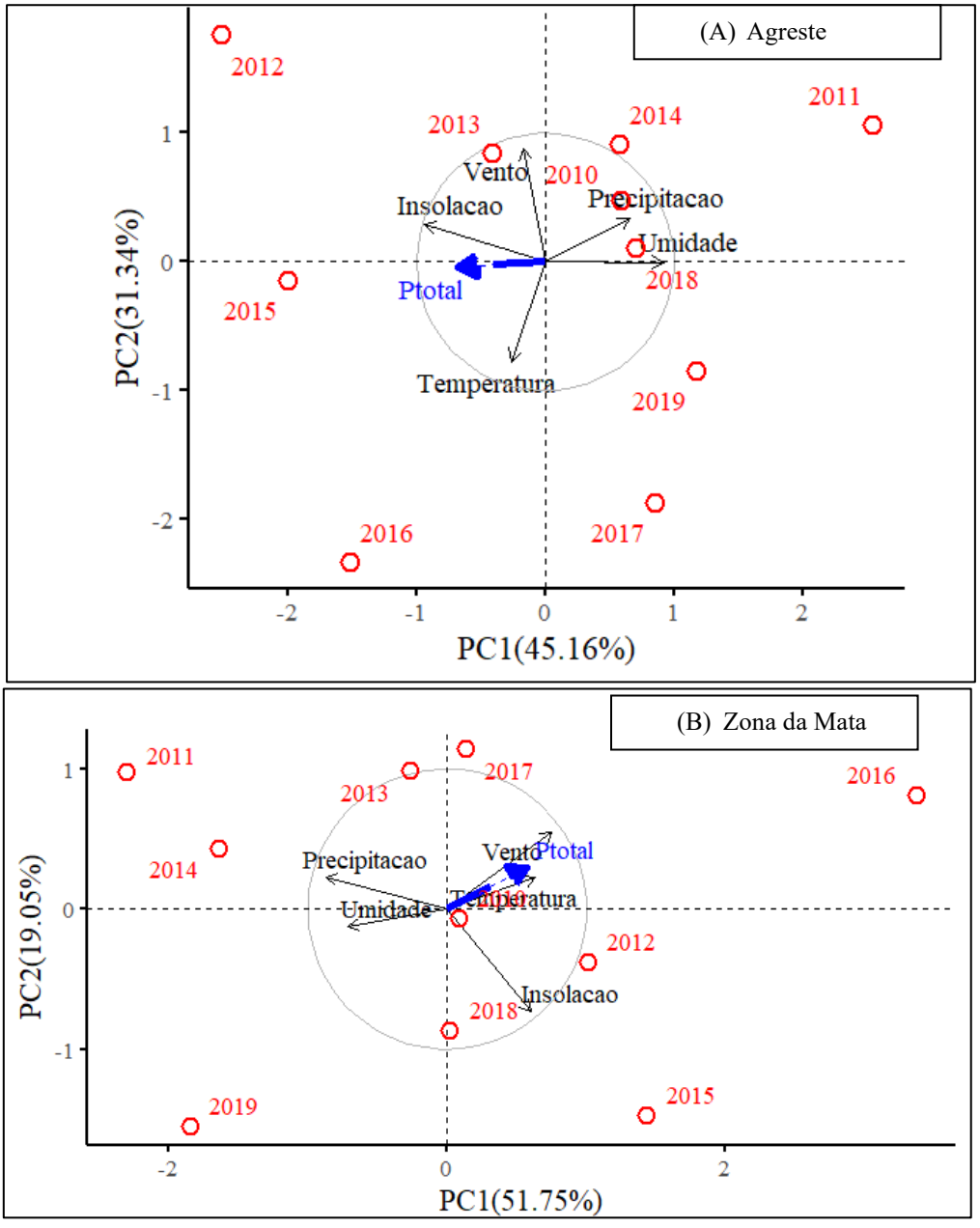
Figura 13 – Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Capibaribe, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata



Em relação a bacia do rio Ipojuca, a PCA é revelada na Figura 14, em ambas as regiões. No Agreste, o primeiro componente principal (PC1), que explica 45,16% da variância, é dominado pela precipitação e umidade relativa do ar, enquanto a insolação e a velocidade do vento apresentam maior contribuição no segundo componente principal (PC2), que explica 31,34% da variância. A distribuição dos anos indica variações climáticas ao longo do período analisado. Na Zona da Mata, o PC1, que representa 51,75% da variância, está fortemente associado à temperatura e à velocidade do vento,

enquanto o PC2, com 19,05% da variância, é influenciado pela umidade e precipitação. A dispersão dos anos sugere diferentes padrões climáticos entre as regiões, refletindo diferenças nas condições hidrometeorológicas e seus impactos sobre a dinâmica da bacia.

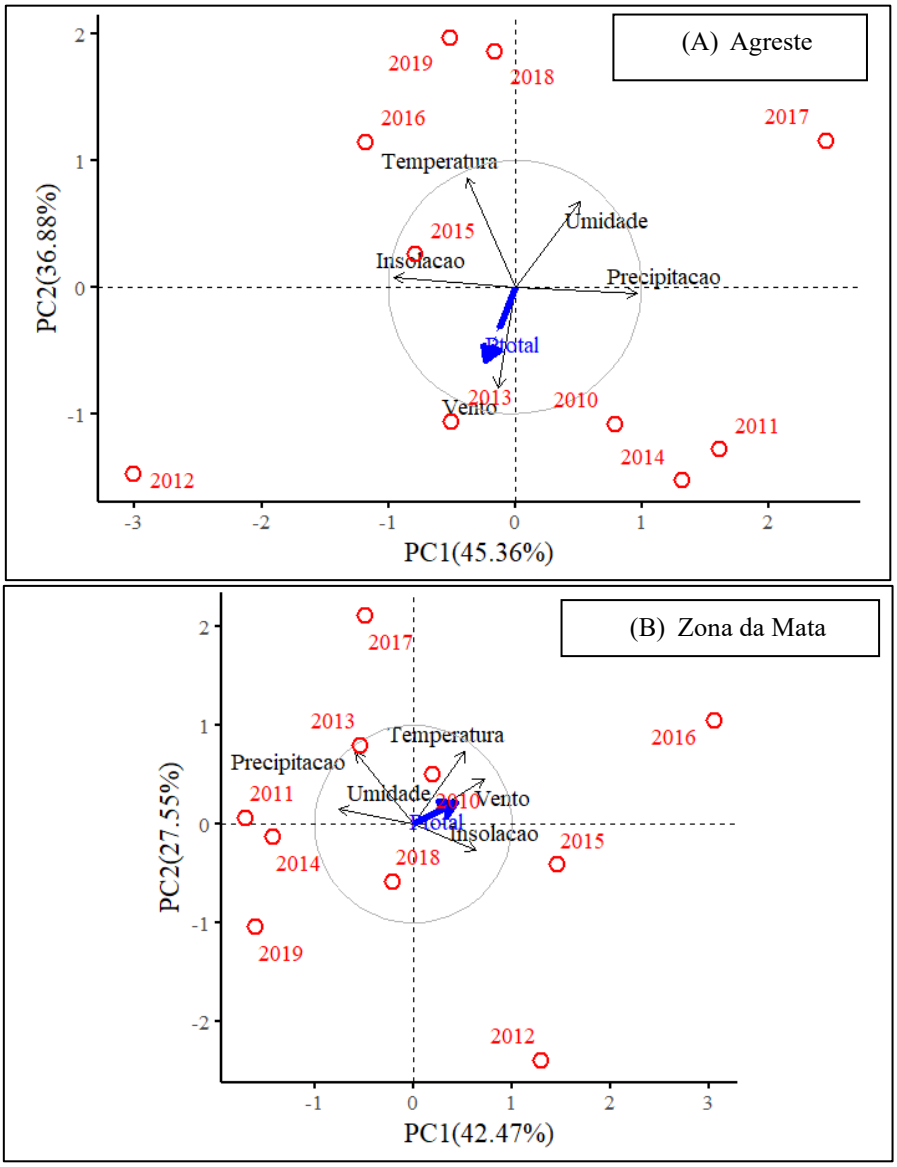
Figura 14 – Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Ipojuca, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata



Na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, a PCA é exposta na Figura 15. No Agreste, o primeiro componente principal (PC1), responsável por 45,36% da variância, é influenciado principalmente pela precipitação e umidade, enquanto o segundo componente principal (PC2), que explica 36,88%, está mais associado à temperatura e insolação. A dispersão temporal indica mudanças nos padrões climáticos ao longo dos

anos analisados. Na Zona da Mata, o PC1 explica 42,47% da variância e reflete maior influência da temperatura e velocidade do vento, enquanto o PC2, com 27,55%, está relacionado à precipitação e umidade. A distribuição dos anos reforça a variabilidade climática entre as regiões, destacando as diferenças hidrometeorológicas que impactam a dinâmica da bacia.

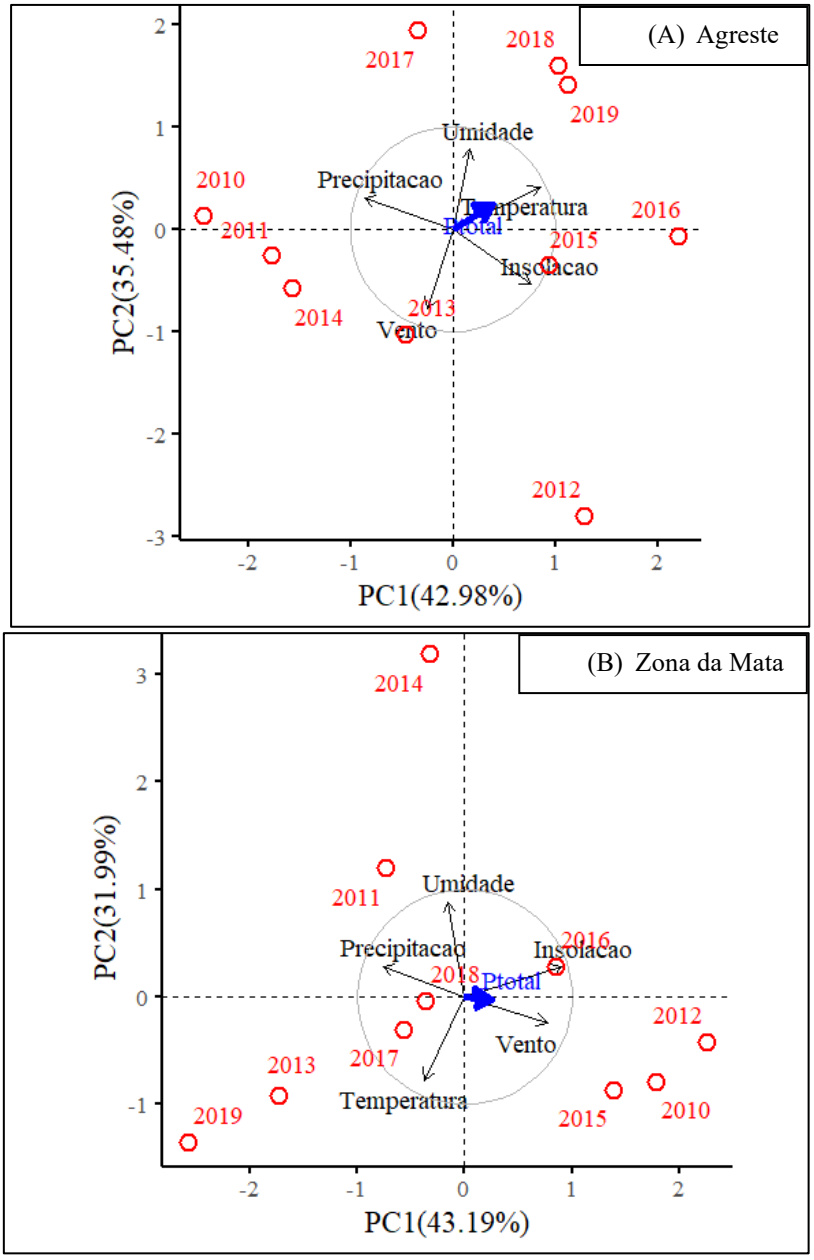
Figura 15 – Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Sirinhaém, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata



No que tange a bacia hidrográfica no rio Uma, a Figura 16 apresenta a Análise de Componentes Principais (PCA) considerando as regiões do Agreste (A) e da Zona da Mata (B). No Agreste, o primeiro componente principal (PC1), responsável por 42,98% da variância, é influenciado principalmente pela temperatura, insolação e precipitação, enquanto o segundo componente principal (PC2), que explica 35,48%, está mais

associado à umidade e velocidade do vento. Na Zona da Mata, o PC1 explica 43,19% da variância e reflete a influência da insolação, temperatura e vento, enquanto o PC2, com 31,99%, está relacionado à precipitação e umidade.

Figura 16 – Análise de Componentes Principais para a bacia do rio Una, sendo (A) Agreste e (B) Zona da Mata



A dispersão dos anos nas duas regiões evidencia variações climáticas ao longo do período analisado, ressaltando diferenças na dinâmica atmosférica entre os ambientes do Agreste e da Zona da Mata nas bacias hidrográficas em estudo. Essas variações são particularmente relevantes para o manejo dos recursos hídricos, especialmente no que se

refere à irrigação, uma vez que alterações na precipitação, umidade e temperatura afetam diretamente a disponibilidade de água para a agricultura. No Agreste, onde a escassez hídrica é mais acentuada, compreender esses padrões climáticos é essencial para otimizar o uso da água em sistemas de irrigação, reduzindo perdas e garantindo maior eficiência no suprimento hídrico para culturas agrícolas. Já na Zona da Mata, apesar de uma maior disponibilidade de precipitação, a variabilidade interanual pode impactar a regularidade do fornecimento de água para a agricultura, exigindo estratégias de manejo que considerem períodos de menor disponibilidade hídrica.

Assim, os efeitos dos fatores climáticos sobre a necessidade de irrigação são evidenciados no estudo de Li et al. (2017), realizado no Planalto de Loess do Norte de Shaanxi, na China. Os autores identificaram um aumento da aridez na região, com destaque para a evapotranspiração potencial (ET_0), que se mostrou altamente sensível à umidade relativa, temperatura máxima diária e velocidade do vento. A temperatura máxima foi apontada como o fator de maior contribuição para a ET_0, impactando diretamente a demanda hídrica para irrigação. Essa realidade também se verifica nas bacias hidrográficas do Agreste pernambucano, onde a intensificação da irrigação se torna essencial para suprir a demanda hídrica das culturas e mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola.

A tomada de decisão dos agricultores em relação ao uso da irrigação também está diretamente influenciada pelos padrões climáticos, conforme demonstrado por Knapp e Huang (2017). Os autores analisaram a influência de variações climáticas de curto e longo prazo sobre as práticas de manejo da água, concluindo que os agricultores tendem a aumentar o uso de aspersores após um ano de seca, mas apresentam comportamento oposto diante de uma tendência prolongada de seca ao longo de três décadas. Esses achados indicam que a gestão hídrica na agricultura não se baseia exclusivamente em eventos climáticos recentes, mas reflete adaptações a mudanças de longo prazo. Dessa forma, estudos que considerem múltiplas escalas temporais são essenciais para compreender melhor a relação entre clima e agricultura.

A relação entre fatores climáticos e vegetação agrícola também foi abordada no estudo de Sun et al. (2024), que evidenciou a influência da precipitação e da evapotranspiração potencial no desenvolvimento da vegetação em áreas cultivadas da China. Os resultados demonstraram que a correlação entre a cobertura vegetal e a evapotranspiração potencial foi mais significativa do que entre a cobertura vegetal e a precipitação. Além disso, a pesquisa revelou que as áreas de maior rendimento agrícola

estão concentradas na porção oriental do país, onde há maior demanda por irrigação. Isso reforça a importância de estratégias eficientes de manejo hídrico para garantir a produtividade agrícola.

Diante desse cenário, medidas para mitigar os impactos da elevada evapotranspiração e das altas temperaturas são fundamentais. A irrigação localizada, como o gotejamento, destaca-se como uma alternativa eficiente ao fornecer água diretamente às raízes das plantas, minimizando perdas por evaporação e escoamento superficial (Yang et al,. 2023). Ademais, a captação e o armazenamento de água da chuva por meio de reservatórios e barragens também podem complementar as estratégias de irrigação, reduzindo a dependência de fontes hídricas superficiais e subterrâneas (Frimpong et al., 2023). Essas estruturas permitem o acúmulo de volumes significativos de água durante períodos chuvosos, garantindo disponibilidade hídrica para uso agrícola em épocas de estiagem. No entanto, sua implementação deve considerar aspectos ambientais, sociais e técnicos, de modo a minimizar impactos negativos e otimizar a eficiência no abastecimento e na irrigação (Pande et al., 2023).

Na Zona da Mata, a Pegada Hídrica Verde (PHverde) predomina, com a precipitação desempenhando um papel central na disponibilidade hídrica do solo. Entretanto, a evapotranspiração mantém correlação positiva com a PHazul, evidenciando que, mesmo em regiões úmidas, há períodos em que a irrigação se torna necessária. A umidade relativa do ar exerce uma influência moderada na redução da demanda hídrica azul, sugerindo que ambientes mais úmidos contribuem para uma menor necessidade de irrigação.

Portanto, a implementação de sistemas de irrigação eficientes, adaptados às condições climáticas do Agreste e da Zona da Mata, é fundamental para reduzir a Pegada Hídrica Azul (PHazul) e promover o uso sustentável dos recursos hídricos. As Tabelas 25 e 26 apresentam um resumo das medidas de intervenção recomendadas com base nas correlações entre fatores climáticos e a Pegada Hídrica.

Tabela 25 – Resumo das possíveis intervenções na irrigação, para a área de Agreste, considerando as variáveis climatológicas mais influentes

Bacia hidrográfica	**Variáveis climáticas de maior correlação com a PH**	**Medidas de Intervenção**
Capibaribe		• Implementação de reservatórios artificiais para reter a água da chuva;

Bacia hidrográfica	Variáveis climáticas de maior correlação com a PH	Medidas de Intervenção
	Precipitação, Evapotranspiração, Umidade Relativa do Ar e Insolação	• Adoção de sistemas de irrigação por aspersão ajustáveis, visando reduzir os quantitativos gastos de água e manter a umidade local;
		• Uso de cobertura vegetal e práticas de conservação do solo para aumentar a retenção de umidade;
		• Instalação de sensores de umidade do solo para otimizar o uso da água.
Ipojuca	Precipitação, Evapotranspiração, Umidade Relativa do Ar e Insolação	• Expansão de sistemas de irrigação por gotejamento para cultivos específicos, como a cana-de-açúcar;
		• Construção de barragens e pequenos açudes para armazenamento de água da chuva;
		• Promoção de culturas adaptadas à seca e ao clima semiárido;
		• Uso de tecnologias de automação para monitoramento e controle da irrigação.
Sirinhaém	Precipitação, Evapotranspiração, Insolação e Umidade Relativa do Ar	• Implementação de sistemas de irrigação por microaspersão para cultivos sensíveis à umidade;
		• Adoção de práticas de manejo integrado de água e solo, como o plantio direto e a rotação de culturas;
		• Captação e armazenamento de água da chuva em cisternas e tanques;
		• Incentivo ao uso de variedades de culturas mais resistentes à seca.
Uma	Precipitação, Evapotranspiração, Insolação e Temperatura Média	• Introdução de sistemas de irrigação por gotejamento e sulcos para reduzir perdas de água;
		• Construção de reservatórios para armazenamento de água em períodos chuvosos;
		• Uso de coberturas mortas e práticas de conservação do solo para reduzir a evaporação;
		• Implementação de sistemas de monitoramento climático para prever períodos de seca e ajustar a irrigação.

Tabela 26 – Resumo das possíveis intervenções na irrigação, para a área de Zona da Mata/Litoral, considerando as variáveis climatológicas mais influentes

Bacia hidrográfica	Variáveis climáticas de maior correlação com a PH	Medidas de Intervenção
Capibaribe	Precipitação, Evapotranspiração e Insolação	• Adoção de sistemas de irrigação por microaspersão para cultivos que demandam umidade constante;
		• Implementação de práticas de conservação de solo, como o plantio direto e a cobertura vegetal;
		• Uso de técnicas de manejo integrado de água, como a fertirrigação;
		• Promoção de sistemas agroflorestais para aumentar a infiltração de água no solo.
Ipojuca	Precipitação, Evapotranspiração, Umidade Relativa do Ar e Insolação	• Expansão de sistemas de irrigação por sulcos em áreas com solos argilosos;
		• Uso de coberturas mortas e práticas de conservação do solo para reduzir a evaporação;
		• Implementação de sistemas de captação de água da chuva para uso complementar na irrigação;

Bacia hidrográfica	Variáveis climáticas de maior correlação com a PH	Medidas de Intervenção
		• Incentivo ao cultivo de espécies adaptadas ao clima úmido.
Sirinhaém	Precipitação, Evapotranspiração, Umidade Relativa do Ar e Insolação	• Adoção de sistemas de irrigação por aspersão de baixa pressão para cultivos extensivos;
		• Implementação de técnicas de manejo de água, como a rotação de culturas e o uso de cobertura vegetal;
		• Construção de pequenos reservatórios para armazenamento de água da chuva;
		• Promoção de práticas agrícolas sustentáveis, como a integração lavoura-pecuária-floresta.
Una	Precipitação, Evapotranspiração, Umidade Relativa do Ar e Insolação	• Introdução de sistemas de irrigação por gotejamento para cultivos de alto valor agregado;
		• Uso de técnicas de conservação de solo, como o terraceamento e a cobertura vegetal;
		• Implementação de sistemas de monitoramento de umidade do solo para otimizar a irrigação;
		• Promoção de culturas adaptadas ao clima úmido e à alta precipitação.

No Agreste, a escassez hídrica é mais crítica, e a precipitação e a evapotranspiração potencial são os fatores climáticos mais influentes na demanda hídrica. A adoção de sistemas de irrigação localizada, como o gotejamento, é recomendada por sua eficiência ao aplicar água diretamente nas raízes, minimizando perdas por evaporação e escoamento (Li et al., 2021). Assim, esse método pode ser adequado para cultivos de alta demanda hídrica, como a cana-de-açúcar, e reduz significativamente a PHazul em regiões de escassez.

Sistemas de aspersão de baixa pressão são indicados para áreas extensas, pois possibilitam ajustes que reduzem o consumo de energia e água, sendo úteis em terrenos irregulares, onde a distribuição uniforme é essencial (Zapata et al., 2018). Os solos arenosos do Agreste apresentam alta permeabilidade e baixa capacidade de retenção de água, tornando-se mais suscetíveis à perda de umidade por percolação e evaporação. Essas características demandam intervenções para melhorar a retenção de água e nutrientes, como a adoção de técnicas de aspersão de baixa pressão, conforme também é apontado por Al Al-Baaj e Lewis (2019) e Sanchez (2000).

A captação e o armazenamento de água da chuva, por meio de reservatórios e barragens, são medidas essenciais para garantir disponibilidade hídrica em períodos de estiagem (Liu et al., 2022). Essas estruturas reduzem a dependência de fontes superficiais e subterrâneas, promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos (Velasco-Muñoz et

al., 2019). Entretanto, sua implementação deve considerar aspectos ambientais, sociais e técnicos para minimizar impactos e otimizar a eficiência no abastecimento e na irrigação.

Na Zona da Mata, a Pegada Hídrica Verde (PHverde) é predominante, com a precipitação como principal fator na disponibilidade hídrica do solo. No entanto, a evapotranspiração potencial também influencia a PHazul, evidenciando a necessidade de irrigação em determinados períodos. A umidade relativa do ar exerce influência moderada, sugerindo que condições mais úmidas reduzem a necessidade de irrigação.

A irrigação por microaspersão é recomendada para essa região, pois proporciona distribuição uniforme da água e reduz perdas por evaporação, sendo eficaz para cultivos que exigem umidade constante, como frutíferas e hortaliças (Scudiero et al., 2024). A irrigação por sulcos (um sistema de irrigação por superfície), de acordo com Elshikha et al. (2023) também é uma alternativa viável em solos argilosos, com alta retenção de umidade. Esse método consiste na aplicação da água em sulcos ao lado das linhas de plantio, permitindo infiltração e umedecimento do solo (Kakhandaki et al., 2013). De baixo custo e fácil implementação, é indicado para cultivos extensivos, como a cana-de-açúcar.

Práticas de conservação do solo e da água são fundamentais para aumentar a retenção de umidade e reduzir a necessidade de irrigação (Lankford, 2023). Os solos argilosos predominantes na Zona da Mata possuem alta capacidade de retenção de água e nutrientes, mas são suscetíveis à compactação e redução da infiltração. Técnicas como plantio direto, rotação de culturas e cobertura vegetal são essenciais para preservar a umidade do solo e garantir a sustentabilidade agrícola (Parton e Pouyat, 2010). Essas práticas reduzem a demanda hídrica, melhoram a qualidade do solo e promovem a conservação dos recursos naturais.

Portanto, a implementação de sistemas de irrigação eficientes, aliada a práticas conservacionistas, é fundamental para reduzir a Pegada Hídrica e garantir a sustentabilidade da produção agrícola no Agreste e na Zona da Mata. No Agreste, a prioridade deve ser a captação e armazenamento de água, além da irrigação localizada, como gotejamento e aspersão de baixa pressão. Na Zona da Mata, a conservação da umidade do solo deve ser favorecida pela microaspersão, irrigação por sulcos e manejo sustentável. Essas estratégias, integradas a políticas públicas e capacitação técnica, fortalecem a resiliência hídrica e a sustentabilidade agrícola nas bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una.

5.3 Evolução do uso e ocupação do solo

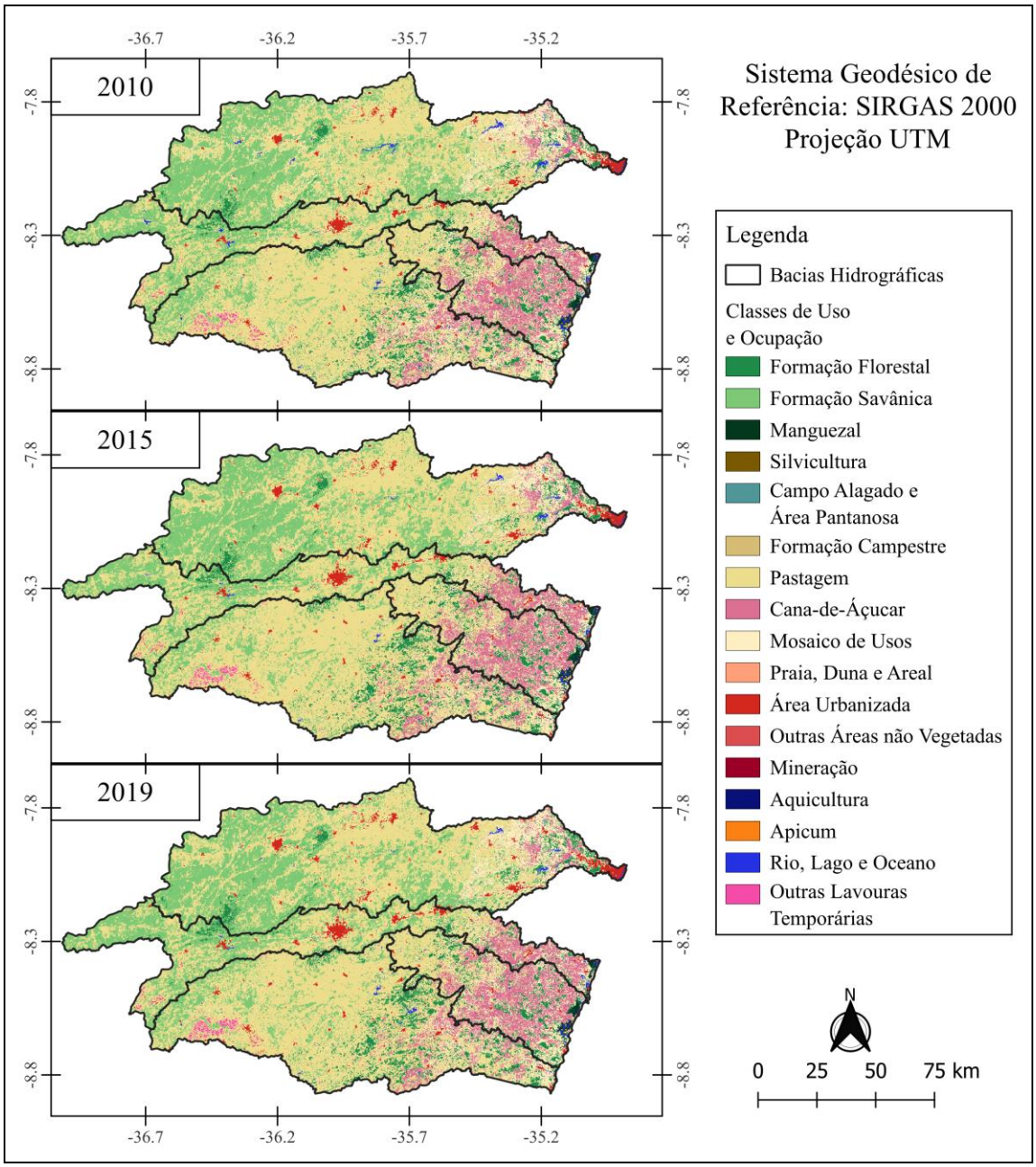
A evolução do uso e ocupação do solo nas bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, entre os anos de 2010 e 2019, é exposta na Figura 17. Em particular, a área dedicada ao cultivo de cana-de-açúcar apresenta padrões distintos em cada bacia, refletindo as particularidades socioeconômicas, climáticas e de gestão territorial de cada região.

A expansão urbana, embora presente em todas as bacias, é mais expressiva nas bacias do Capibaribe e do Ipojuca, refletindo o processo de urbanização e a pressão sobre as áreas rurais. A formação florestal e a formação savânica apresentaram aumentos modestos, sugerindo possíveis esforços de conservação ou a regeneração natural de áreas degradadas. No entanto, a preservação dessas áreas é fundamental para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, como a regulação do ciclo hidrológico e a conservação da biodiversidade. É válido ressaltar que as Tabelas contendo os valores das classes de uso e ocupação do solo, em cada bacia hidrográfica em estudo, são apresentados nos Apêndices.

Na bacia do rio Capibaribe, percebe-se que a área destinada à cana-de-açúcar se manteve relativamente estável ao longo da década, variando de 151,39 km² em 2010 para 146,00 km² em 2019. Essa pequena redução (-3,6%) pode estar associada a mudanças nas práticas agrícolas, à expansão urbana ou à conversão de áreas para outros usos, como pastagens e mosaicos de agricultura e pastagem.

Apesar da estabilidade relativa, a cana-de-açúcar representa uma parcela significativa do uso do solo na bacia, competindo com outras atividades, como a pastagem, que ocupa a maior área (3.210,35 km² em 2019). A formação savânica e as áreas de pastagem dominam a paisagem, enquanto a formação florestal apresentou um ligeiro aumento, possivelmente devido a esforços de recuperação ambiental ou à regeneração natural de áreas degradadas.

Figura 17 – Evolução do uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas em estudo, entre 2010 e 2019



Na bacia do rio Ipojuca, a área de cana-de-açúcar também apresentou estabilidade, com uma redução marginal de 299,06 km² em 2010 para 292,04 km² em 2019 (-2,3%). Essa bacia destaca-se por uma maior expressividade da cana-de-açúcar em comparação com outras culturas, refletindo a importância histórica dessa atividade na região. A pastagem, no entanto, continua a ser a principal forma de uso do solo, embora tenha apresentado uma redução significativa ao longo da década, passando de 1.451,75 km² em 2010 para 1.381,21 km² em 2019. A formação florestal e a formação savânica também tiveram aumentos modestos, sugerindo uma tendência de recuperação de áreas naturais ou de menor pressão antrópica em determinadas áreas.

Em relação a bacia do rio Sirinhaém, o local destaca-se por concentrar a maior área de cana-de-açúcar entre as bacias analisadas, com 786,25 km² em 2010 e 761,08 km² em 2019, representando uma redução de 3,2%. Essa bacia é fortemente influenciada pela atividade sucroalcooleira, que compete diretamente com a pastagem, que também apresentou uma redução significativa, de 558,30 km² em 2010 para 570,32 km² em 2019. A formação florestal e o manguezal mostraram pequenos aumentos, indicando possíveis esforços de conservação ou a regeneração natural de áreas degradadas. A expansão urbana, embora presente, é menos expressiva do que em outras bacias, refletindo o caráter mais rural da região.

Ademais, na bacia do rio Una, a área de cana-de-açúcar apresentou uma redução mais acentuada, passando de 409,34 km² em 2010 para 356,05 km² em 2019 (-13,0%). Essa redução pode estar associada a mudanças nas práticas agrícolas, à conversão de áreas para pastagens ou à expansão de outras atividades econômicas. A pastagem é a forma dominante de uso do solo na bacia, com 3.814,63 km² em 2019, embora tenha apresentado uma ligeira redução ao longo da década. A formação florestal e a formação savânica tiveram aumentos modestos, sugerindo uma tendência de recuperação ambiental ou de menor pressão antrópica em determinadas áreas. A expansão urbana, embora presente, é menos expressiva do que em outras bacias, refletindo o caráter mais rural da região.

A expansão da cana-de-açúcar tem sido amplamente debatida devido aos seus impactos ambientais e sociais. No sul da África, por exemplo, a conversão de áreas de vegetação nativa de baixo consumo hídrico para o cultivo de cana-de-açúcar resultou em um aumento expressivo da demanda por irrigação, afetando o fluxo do rio Kafue, na Zâmbia (German et al., 2020). No Brasil, a expansão desse cultivo em bacias hidrográficas como a do Paranaíba tem sido associada a ganhos na sustentabilidade da produção de etanol, embora persistam preocupações quanto à disponibilidade hídrica (Scarpare et al., 2016).

Na Colômbia, o avanço da cana-de-açúcar tem sido acompanhado por um processo de industrialização agrícola e concentração fundiária, excluindo pequenos proprietários e comunidades rurais das decisões territoriais e impactando suas economias tradicionais e patrimônios culturais (Vélez-Torres et al., 2019). Similarmente, em São Paulo, a substituição de áreas de pastagem e cultivos alimentares pelo plantio de cana gerou preocupações quanto ao aumento dos preços da terra e dos alimentos (Caldarelli et al., 2018).

Nas bacias hidrográficas de Pernambuco, a cana-de-açúcar continua a representar uma parcela significativa do uso do solo, mas observa-se uma tendência de redução em determinadas áreas, como na bacia do rio Una. Esse declínio possivelmente está associado a fatores econômicos, como a volatilidade dos preços do açúcar e do etanol, além de mudanças nas políticas agrícolas e ambientais. Em contrapartida, a pastagem mantém-se como o principal uso do solo, refletindo a importância da pecuária na região. Essa dinâmica destaca a necessidade de monitoramento contínuo das mudanças no uso da terra e de políticas que equilibrem a sustentabilidade ambiental com a viabilidade econômica da produção agrícola.

Deste modo, a cana-de-açúcar, embora importante economicamente, deve ser integrada a estratégias de gestão territorial que considerem a conservação ambiental e a diversificação das atividades econômicas, em conjunto com a adequação de práticas de irrigação. Portanto, a expansão urbana e a conversão de áreas naturais para pastagens e agricultura destacam a necessidade de planejamento territorial e de iniciativas que promovam a recuperação de áreas degradadas e a conservação dos ecossistemas naturais e hídricos.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para a Pegada Hídrica (PH) nas bacias hidrográficas analisadas revelaram diferenças substanciais entre as regiões do Agreste e da Zona da Mata, refletindo variações nas condições hídricas e na dependência de irrigação. Na região do Agreste, a média da PH total apresentou valores significativamente mais elevados, variando entre 329,60 m³/ton na bacia do rio Sirinhaém e 377,15 m³/ton na bacia do rio Uma, com destaque para a Pegada Hídrica Azul (PHazul), associada à irrigação, como a principal responsável por essa alta demanda hídrica. Em contraste, na Zona da Mata, as médias da PH total apresentaram uma redução de 20% a 30%, variando entre 239,85 m³/ton e 248,15 m³/ton, em virtude da maior contribuição da precipitação pluvial, representada pela Pegada Hídrica Verde (PHverde), predominante nas regiões de clima mais úmido.

A análise de correlação evidenciou que a precipitação e a evapotranspiração potencial são os fatores climáticos mais determinantes na dinâmica hídrica dessas regiões. No Agreste, a dependência acentuada da precipitação e a sensibilidade à evapotranspiração destacam a necessidade urgente de estratégias para otimizar o uso da água, sobretudo em anos de escassez hídrica. Na Zona da Mata, embora a influência da precipitação seja forte, em geral, a evapotranspiração consiste na variável climática que desempenha o papel mais relevante, o que sublinha a importância de um manejo adequado dos recursos hídricos.

Nesse contexto, recomenda-se que as intervenções relacionadas ao manejo do solo sejam adaptadas às características texturais e estruturais de cada região. No Agreste, onde os solos são predominantemente arenosos, o foco deve ser a melhoria da retenção de água e nutrientes, por meio da adição de matéria orgânica, cobertura vegetal e sistemas de irrigação eficientes. Já na Zona da Mata, com seus solos mais argilosos, as estratégias devem priorizar o manejo adequado da umidade, a descompactação do solo e a adoção de práticas conservacionistas, como a cobertura vegetal e os sistemas agroflorestais.

A cana-de-açúcar, embora desempenhe um papel crucial na economia regional, deve ser integrada a estratégias de gestão territorial que equilibrem a produção agrícola com a conservação ambiental e a diversificação das atividades econômicas. A evolução do uso e ocupação do solo indica que a expansão urbana, aliada à conversão de áreas naturais em pastagens e áreas agrícolas, exige um planejamento territorial rigoroso e

iniciativas que promovam a recuperação de áreas degradadas, além da preservação dos ecossistemas naturais.

Portanto, a implementação das medidas mencionadas, associadas a políticas públicas eficazes e programas de capacitação técnica, é fundamental para assegurar a sustentabilidade da produção agrícola e a conservação dos recursos hídricos nas bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. A integração de práticas de manejo sustentável do solo e da água não só contribuirá para a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas, mas também para a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais para o desenvolvimento regional.

REFERÊNCIAS

ADETORO, A. A.; ABRAHAM, S.; PARASKEVOPOULOS, A. L.; OWUSU-SEKYERE, E.; JORDAAN, H.; ORIMOLOYE, I. R. Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production: The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. **Groundwater for Sustainable Development**, volume 11, 2020, 100464, DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100464.

AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**, 18:91–93, 2018. https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001.

AL AL-BAAJ, A.A.; LEWIS, A. Variable Pulsed Irrigation Algorithm (VPIA) to Reduce Runoff Losses under a Low-Pressure Lateral Move Irrigation Machine. **Horticulturae**, volume *5*, n. 1, 10p., 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae5010010.

ALONSO, R.; MUÑOZ, F.; BOTTINI, R.; PICCOLI, P.; BERLI, F. Effects of Wind Exposure and Deficit Irrigation on Vegetative Growth, Yield Components and Berry Composition of Malbec and Cabernet Sauvignon. **Plants**, volume 13, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13101292.

AMARAL, F. C. S. **Sistema brasileiro de classificação de terras para irrigação: enfoque na Região Semi-Árida**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 218p. Convênio Embrapa Solos/CODEVASF.

ANDRADE, C. L. T.; BRITO, R. A. L. **Métodos de Irrigação e Quimigação**. Circular Técnica n. 86, Embrapa - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Bacias Hidrográficas**. Agência Pernambucana de Águas e Clima, Governo de Pernambuco, 2024a. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas>. Acesso em: jul. 2024.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico**. Agência Pernambucana de Águas e Clima, Governo de Pernambuco, 2024b. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: jul. 2024.

ARINGO, M. Q.; MARTINEZ, C. G.; MARTINEZ, O. G.; ELLA, V. B. Development of Low-cost Soil Moisture Monitoring System for Efficient Irrigation Water Management of Upland Crops. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 1038, 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/1038/1/012029.

BARBOSA, G. S.; MORAIS, I. R. D. Pequenas Cidades Inseridas no Domínio Canavieiro Nordestino: Características Socioeconômicas, Desafios e Possibilidades. **Geoingá**: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM) [online], volume 13, 2021. DOI: https://doi.org/10.4025/geoinga.v13i1.56382.

BARRETO, V. L. G. Irrigar para colonizar: a rivalidade anglo-francesa no Egito segundo Jean Brunhes. **Confins**, volume 56, 2022. DOI: https://doi.org/10.4000/confins.47499.

BELLEZONI, R. A.; SHARMA, D.; VILLELA, A. A.; PEREIRA JUNIOR, A. O. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. **Biomass and Bioenergy**, volume 115, p. 108-119, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.017.

BERBEL, J.; GUTIÉRREZ-MARTÍN, C.; EXPÓSITO, A. Impacts of irrigation efficiency improvement on water use, water consumption and response to water price at field level. **Agricultural Water Management**, volume 203, 2018, pages 423-429. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.026.

BORTOLINI, L.; MAUCIERI, C.; BORIN, M. A tool for the evaluation of irrigation water quality in the arid and semi-arid regions. **Agronomy** (Basel), vol. 8, no. 2, pp. 23-53, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/agronomy802002.

BRADEN, J. B.; FENG, X.; WON, D. Waste Sites and Property Values: A Metal Analysis. **Environmental Resources Economics**, 50(2), p.175-201, 2011.

BILGIN, A. An assessment of water quality in the Coruh Basin (Turkey) using multivariate statistical techniques. **Environmental Monitoring and Assessment**, volume 187, n.721, p.1-16, 2015.

CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, volume 76, p. 264-274, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.008.

CAO, X.; SHU, R.; REN, J.; WU, M.; HUANG, X.; GUO, X. Variation and driving mechanism analysis of water footprint efficiency in crop cultivation in China. **Science of The Total Environment**, volume 725, 2020, 138537. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138537.

CAPUTO, M. M.; BEAUCLAIR, E. G. F.; SILVA, M. DE A.; & PIEDADE, S. M. S. Resposta de genótipos de cana-de-açúcar à aplicação de indutores de maturação. **Bragantia**, 67(1), p. 15–23, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000100002.

CARDOZO, N.; BORDONAL, R.; SCALA, N. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production**, volume 204, No. 10, p. 861-871, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.004.

CARVALHO, D. F.; FARIA, R. A.; SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Q. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do Rio Verde Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p.172-176, 2000. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200007.

CASAGRANDE, S. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R. A. (Eds.). **Ecofisiologia de culturas extrativas. Canadeaçúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira**. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138p.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Water footprint of nations**. Volume 1: Main report. Value of Water Research Report Series, v. 1, n. 16, p. 1–80, 2004.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BURNQUIST, W. L.; CRESTE, S.; CIERO, L.; FERRO, J. A.; OLIVEIRA FIGUEIRA, A. V.; SOUSA FILGUEIRAS, T.; GROSSI-DE-SÁ, M. D.; GUZZO, E. C.; HOFFMANN, H. P.; ANDRADE LANDELL, M. G.; MACEDO, N.; MATSUOKA, S.; CASTRO REINACH, F.; ROMANO, E.; SILVA, W. J.; CASTRO SILVA FILHO, M.; CÉSAR ULIAN, E. Sugarcane (Saccharum X officinarum): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical plant biology**, 4(1), p. 62–89, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s12042-011-9068-3.

CONGREVES, K. A.; HAYES, A.; VERHALLEN, E. A.; VAN EERD, L. L. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 17-28, 2015. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012.

DE BOER, I. J. M.; HOVING, I. E.; VELLINGA, T. V.; VAN DE VEM, G. W. J.; LEFFELAAR, P. A.; GERBER, P. J. Assessing environmental impacts associated with freshwater consumption along the life cycle of animal products: the case of Dutch milk production in Noord-Brabant. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.18, n.1, p. 192-203, 2013. DOI: https://doi.org/10.1007/s11367-012-0446-3.

DHARANI, M.; SREENIVASULU, G. Land use and land cover change detection by using principal component analysis and morphological operations in remote sensing applications. **International Journal of Computers and Applications**, v. 43, n. 5, pp. 462-471, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/1206212X.2019.1578068.

DUTRA FILHO, J. A.; CALSA JÚNIOR, T.; SIMÕES NETO, D. E.; SOUTO, L. S.; LUNA, R. G.; SOUZA, A. S.; OLIVEIRA, O. H.; SILVA, F. A. C. Seleção de genótipos de cana-de-açúcar em três épocas de colheita. **Research, Society and Development**, vol. 9, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7187.

DUTRA FILHO, J.; GOMES-SILVA, F.; SOUTO, L.; SOUZA, A.; DE LUNA, R.; MOREIRA, G.; FILHO, M.; SILVA, M.; PORTO, A.; DE BRITO, C.; DA COSTA, M.; DE OLIVEIRA, O.; SILVA, A.; SILVA, F.; SANTOS, A.; JÚNIOR, T. Energy Cane x Sugarcane Microregion Interaction in the State of Pernambuco: Sugarcane for Production of Bioenergy and Renewable Fuels. **Agronomy**, 11, 1046, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11061046.

ELSHIKHA, D. E. M.; WANG, G.; WALLER, P. T.; HUNSAKER, D. J.; DIERIG, D.; THORP, K. R.; THOMPSON, A.; KATTERMAN, M. E.; HERRITT, M. T.; BAUTISTA, E.; RAY, D. T.; WALL, G. W. Guayule growth and yield responses to deficit irrigation

strategies in the U.S. desert. **Agricultural Water Management**, volume 277, 108093, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108093.

EMBRAPA. **Mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Pernambuco**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 2011.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/classificacao-de-solos#:~:text=Planossolos,taxon%C3%B4mica%20para%20o%20horizonte%20pl%C3%ADntico>. Acesso em: set. 2024.

EMBRAPA. **Fenologia**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 2022. Disponível em: < https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas/fenologia>. Acesso em: set. 2024.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: aspersores de tamanho médio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200002.

FERNANDES, S. J. O.; SANTANA, R.; SILVA, E.; SOUZA, C. Período de enraizamento de miniestacas de eucalipto provenientes de diferentes lâminas de irrigação em minijardim. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, 2018.

FERREIRA, V. M. **Irrigação e drenagem**. Floriano, PI: EDUFPI, 126 p.: il., 2011.

FOLEGATTI, M. V.; ROMAN, R. M. S.; COELHO, R. D.; FRIZZONE, J. A. **Gestão dos recursos hídricos e agricultura irrigada no Brasil.** *In*: BICUDO, C.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. (Org.). Águas do Brasil: Análises Estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica, p. 15-23, 2010.

FRANZLUEBBERS, A. J. **Soil organic carbon sequestration calculated from deph distribution**. USDA agriculture research service. 101, Direuse place, NCSV, Campus Box, Soil Science Society of American Journal, 2021.

FRIMPONG, F.; ASANTE, M. D.; PEPRAH, C. O.; AMANKWAA-YEBOAH, P.; DANQUAH, E. O. RIBEIRO, P. F.; AIDOO, A. K.; AGYEMAN, K.; ASANTE, M. O. O.; KETEKU, A.; BOTEY, H. M. Water-smart farming: review of strategies, technologies, and practices for sustainable agricultural water management in a changing climate in West Africa. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, volume 7, 2023. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1110179.

GALLI, A.; WIEDMANN, T.; ERCIN, E.; KNOBLAUCH, D.; EWING, B.; GILJUM, S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. **Ecological Indicators**, vol. 16, pp. 100-112, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.017.

GERMAN, L. A.; HEPINSTALL-CYMERMAN, J.; BIGGS, T.; PARKER, L.; SALINAS, M. The environmental effects of sugarcane expansion: A case study of changes in land and water use in southern Africa. **Applied Geography**, volume 121, 102240, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102240.

GOMES, H. P. **Sistemas de Irrigação**: Eficiência Energética. Editora da UFPB, João Pessoa, 2013. 281p.

GUPTA, R. P.; TIWARI, R. K.; SAINI, V.; SRIVASTAVA, N. A simplified approach for interpreting principal component images. **Advances in Remote Sensing**, v. 2, p. 111-119, 2013. https://doi.org/10.4236/ars.2013.22015.

GURGEL, A.; SOUTO, A., GUEDES, C.; GUEDES, G.; PEREIRA, J.; BEZERRA, V. Mirror without reflections: social and environmental conflicts and vulnerabilities in a sugarcane producing region. **Ciencia & saude coletiva**, volume 27, p. 1049-1060, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-81232022273.27502020.

HALLIWELL, D.; BARLOW, K.; NASH, D. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Soil Research**, volume 39, p. 1259-1267, 2001. DOI: https://doi.org/10.1071/SR00047.

HILL, R. W. **Consuptive use of irrigated crop in Utah**. Research report. Logan: Agricultural Experimental Station. 1994, p.121-126.

HOEKSTRA A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual**. Water Footprint Network, London; Washington, DC: Earthscan, 2011.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, 5(1), pp. 83-90, 2016. DOI: https://doi.org/10.18607/ES201653398.

HUA, M.; ZHOU, Y.; HAO, C.; YAN, Q. Analyzing the Drivers of Agricultural Irrigation Water Demand in Water-Scarce Areas: A Comparative Study of Two Regions with Different Levels of Irrigated Agricultural Development. **Sustainability**, 15(20), 14951. DOI: https://doi.org/10.3390/su152014951.

IBGE. Instituto Brasileira de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil. Disponível em: <sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: dez. 2024.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília – DF, 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: jul. 2024.

JAHANI, B.; SOLTANI MOHAMMADI, A.; NASSERI, A. A; VAN OEL, R. P.; SADEGHI LARI, A. Reduction of Sugarcane Water Footprint by Controlled Drainage, in Khuzestan, Iran. **Irrigation and Drainage**, volume 66, issue 5, p. 884–895, 2017. DOI: 10.1002/ird.2148.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6th Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 393p, 2007.

JORRAT, M. M.; ARAUJO, P. Z.; MELE, F. D. Sugarcane water footprint in the province of Tucumán, Argentina. Comparison between different management practices. **Journal of Cleaner Production**, volume 188, 2018, 521-529p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.242.

KAKHANDAKI, S. H.; PADMAKUMARI, O.; MADHUSUDHAN, M. S.; RAMAPPA K.T. Effect of drip and micro sprinkler irrigation on growth and yield of tomato (Lycopersicon esculentum Mill) crop under clay loam soil. **International Journal of Agricultural Engineering**, volume 5, No. 2, p. 169-171, 2012.

KINDLER, J. Modeling derived demand for irrigation water. **Agricultural Water Management**, volume 13, p. 403-410, 1988. DOI: https://doi.org/10.1016/0378-3774(88)90170-9.

KITTAS, C. Solar radiation of a greenhouse as a tool to its irrigation control. International **Journal of Energy Research**, 14, p. 881-892, 1990. DOI: https://doi.org/10.1002/ER.4440140810.

KNAPP, T.; HUANG, Q. Do climate factors matter for producers' irrigation practices decisions? **Journal of Hydrology**, volume 552, p. 81-91, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.037.

KUMAR, N.; SOW, S.; RANA, L.; KUMAR, V.; KUMAR, J.; PRAMANICK, B.; SINGH, A.; ALKERIDIS, L.; SAYED, S.; GABER, A.; & HOSSAIN, A. Productivity, water use efficiency and soil properties of sugarcane as influenced by trash mulching and irrigation regimes under different planting systems in sandy loam soils. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, volume 8, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1340551.

LANKFORD, B. A. Resolving the paradoxes of irrigation efficiency: Irrigated systems accounting analyses depletion-based water conservation for reallocation. **Agricultural Water Management**, volume 287, 108437, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108437.

LE ROUX, B.; VAN DER LAAN, M.; VAHRMEIJER, T.; BRISTOW, K. L.; ANNANDALE, J. G. Establishing and testing a catchment water footprint framework to inform sustainable irrigation water use for an aquifer under stress. **Science of The Total Environment**, volumes 599–600, pages 1119-1129, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.170.

LI, C.; WU, P. T.; LI, X. L.; ZHOU, T. W.; SUN, S. K.; WANG, Y. B.; LUAN, X. B.; YU, X. Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. **Science of The Total Environment**, volume 589, p. 165-172, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.122.

LI, Z.; ZONG, R.; WANG, T.; WANG, Z.; ZHANG, J. Adapting Root Distribution and Improving Water Use Efficiency via Drip Irrigation in a Jujube (*Zizyphus jujube* Mill.) Orchard after Long-Term Flood Irrigation. **Agriculture**, volume 11, 1184, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture11121184.

LI, M.; SUN, H.; LIU, D., SINGH, V.; FU, Q. Multi-scale modeling for irrigation water and cropland resources allocation considering uncertainties in water supply and demand. **Agricultural Water Management**, 246, 106687, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106687.

LIU, X.; ZHANG, L.; WU, P.; DENG, H. A new small-scale system of rainwater harvesting combined with irrigation for afforestation in mine area: Optimizing design and application. **Journal of Environmental Management**, volume 322, 116129, 2022, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116129.

LOSS, L.; DUARTE VIEIRA, H.; VIERA, G.; SOUZA, E. Projeto de aplicativo móvel capaz de fornecer informações para o manejo de irrigação do café conilon. **Irriga**, v. 24, n. 4, 2019. DOI: https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n4p874-889.

MACAN, N. P. F.; GOMES, T. M.; ROSSI, F.; TOMMASO, G. Desempenho da irrigação por gotejamento com o uso de efluente de laticínio tratado por processo biológico. **Irriga**, v. 22, n. 3, 2017.

MAPBIOMAS. **Visão geral da metodologia**. Brasil, 2024a. Disponível em: <https://mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia>. Acesso em: set. 2024.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Brasil, 2024b. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/codigos-de-legenda/>. Acesso em: set. 2024.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília: EMBRAPA.5 ed., 72p. 1996.

NEVES, H.; GASPAROTTO, L.; WOLF, W.; FOLEGATTI, M.; MARIN, F. Evapotranspiração da cana-de-açúcar mensurada em lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte. **Agrometeoros**, volume 31, e027046, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v31.e027046.

NOBREGA, J. S.; FIGUEIREDO, F.; NASCIMENTO, R.; BRUNO, R.; ALVES, E.; CAVALCANTE, L. Qualidade fisiológica de sementes de melão pepino sob salinidade crescente da água de irrigação. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 4, 2018.

OBIDZINSKI, K.; KUSTERS, K.; GNYCH, S. Taking the Bitter with the Sweet: Sugarcane's Return as a Driver of Tropical Deforestation. **Conservation Letters**, volume 8, 2015. DOI: ttps://doi.org/10.1111/conl.12172.

OLIVEIRA, L. P. M.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; ROCHA, R. L.; GOMES, H. B.; PEREIRA, M. P. S.; MONTEIRO, L. A.; SILVA, V. P. R. Impacto das Mudanças Climáticas na Produtividade da Cana de Açúcar em Maceió. **Revista Brasileira De**

Meteorologia, 35 (spe), p. 969–980, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-77863550107.

PANDE, C. B.; MOHARIR, K. N.; VARADE, A. **Water Conservation Structure as an Unconventional Method for Improving Sustainable Use of Irrigation Water for Soybean Crop Under Rainfed Climate Condition**. *In*: Pande, C. B.; MOHARIR, K. N.; SINGH, S. K.; PHAM, Q. B.; ELBELTAGI, A. (Eds). Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems. Springer Climate. Springer, Cham. 2023.

PARTON, W. J.; POUYAT, R. V. Ecological Dimensions of Biofuels: Conference and Workshop Report. **Bulletin of the Ecological Society of America**, volume 91, No. 2, p. 264 – 277, 2010. DOI: https://doi.org/10.1890/0012-9623-91.2.264.

PEREA, R.; POYATO, E.; DÍAZ, J. Attention is all water need: Multistep time series irrigation water demand forecasting in irrigation disctrics. **Comput. Electron. Agric.**, 218, 108723, 2024. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108723.

PEREIRA, L.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, vol. 57, p. 175-206, 2002. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00075-6.

PERH. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco**. Volume I: Diagnósticos. Governo de Pernambuco, Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Recife: Seinfra, 367p., 2022.

PFISTER, S.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Assessing the environmental impact of freshwater consumption in LCA. **Environmental Science & Technology**, v. 43, p. 4098-4104, 2009. DOI: https://doi.org/10.1021/es802423e.

PIMENTEL, L. **Hidrologia**: Engenharia e Meio Ambiente. 1. Ed. São Paulo: Gen, 2017.

QUINTEIRO, P.; RAFAEL, S.; VILLANUEVA-REY, P.; RIDOUTT, B.; LOPES, M.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. A characterization model to address the environmental impact of green water flows for water scarcity footprints. **Science of the Total Environment**, 626, 1210-1218, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.201.

RAMACHANDRAN, J.; LALITHA, R.; KANNAN, S. V.; SIVASUBRAMANIAN, K. Assessment of water footprint based on estimated crop evapotranspiration for paddy, sugarcane and banana under semi-arid climate. **Environment Conservation Journal**, 23(1&2), 302–308, 2022. DOI: https://doi.org/10.36953/ECJ.021805-2121.

RENCHER, A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. 2.ed. Nova York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

RIBEIRO, R. B.; FILGUEIRAS, R.; RAMOS, M.; ALMEIDA, L.; GENEROSO, T.; MONTEIRO, L. Variabilidade espaço-temporal da condição da vegetação na agricultura irrigada por meio de imagens sentinel-2ª. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 6, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n600648.

ROSSETO, R.; SANTIAGO, A. Agência Embrapa de Informações Tecnológicas. **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar**. Brasília, 2019.

SALCEDO, J. C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. Engenharia Agrícola, 31(6), p. 1226–1237, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000600020.

SAMUI, R. P.; KULKARNI, P. S.; KAMBLE, M. V.; VAIDYA, N. G. A critical evaluation of sugarcane yield variation as influenced by climatic parameters in Uttar Pradesh and Maharashtra states of India. **Times J Agric Vet Sci**, 2, p. 63-69, 2014.

SANCHEZ, C. A. Response of Lettuce to Water and Nitrogen on Sand and the Potential for Leaching of Nitrate-N. **HortScience**, 35(1), p. 73-77. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.1.73.

SCARPARE, F. V.; HERNANDES, T.; RUIZ-CORRÊA, S.; PICOLI, M.; SCANLON, B.; CHAGAS, M.; DUFT, D.; CARDOSO, T. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, volume 133, pages 1318-1327, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.074.

SCHOBER P. M. D.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, 126:1763–1768, 2018. https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864.

SCUDIERO, E.; CORWIN, D. L.; MARKLEY, P. T.; POURREZA, A.; ROUNSAVILLE, T.; BUGHICI, T.; SKAGGS, T. H. A system for concurrent on-the-go soil apparent electrical conductivity and gamma-ray sensing in micro-irrigated orchards. **Soil and Tillage Research**, volume 235, 105899, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105899.

SILVA, B. B. C.; GRZEBIELUCKAS, C.; SOCOLOSKI, A.; SANTOS, J. S. C.; RIBEIRO, M. A. Custo da pegada hídrica da produção de tomate: um estudo em Tangará da Serra – MT. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S. l.], v. 9, p. 395–407, 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e02020395-407.

SOUZA, P. H. N.; BASTOS, G. Q.; DUTRA FILHO, J. A. Interação cana-de-açúcar x épocas de colheita na Microrregião Centro de Pernambuco via modelos mistos. **Research, Society and Development**, volume 9, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7700.

STEVENS, J.; JONES, M. A.; LAWSON, T. Diverse Physiological and Physical Responses among Wild, Landrace and Elite Barley Varieties Point to Novel Breeding Opportunities. **Agronomy**, volume 11, page 921, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy11050921.

SUN, Y.; ZHONG, H.; CAI, H.; PENG, X. Explorando a resposta diversa da vegetação de terras agrícolas aos fatores climáticos e à irrigação na China. **Agronomy**, 14 (1), 188, 2024. https://doi.org/10.3390/agronomy14010188

TESSLER, M. H. Irrigação por gotejamento: histórico e evolução tecnológica. *In*: PAOLINELLI, M. H.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no brasil: técnica e cultura. Piracicaba: USP, cap. 3, p. 41-63, 2021.

TOKESHI, H. Doenças da cana-de-açúcar (híbridos de *Saccharum spp*). *In*: KIMATI, H.; AMORIM, L.; REZENDE, J.A.M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas. 4.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005. v.2, p.207-25.

VANHAM, D.; MEKONNEN, M. M. The scarcity-weighted water footprint provides unreliable water sustainability scoring. **The Science of the Total Environment**, vol. 756, pp. 143992, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143992.

VELASCO-MUÑOZ, J. F.; AZNAR-SÁNCHEZ, J. A.; BATLLES-DELAFUENTE, A.; FIDELIBUS, M. D. Rainwater Harvesting for Agricultural Irrigation: An Analysis of Global Research. **Water**, volume 11(7), 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w11071320.

VÉLEZ-TORRES, I.; VARELA, D.; COBO-MEDINA, V.; HURTADO, D. Beyond property: Rural politics and land-use change in the Colombian sugarcane landscape. **Journal of Agrarian Change**, volume19, No. 4, p. 690-710, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/joac.12332.

VERMA, R. R.; SRIVASTAVA, T. K.; SINGH, P. Climate change impacts on rainfall and temperature in sugarcane growing Upper Gangetic Plains of India. **Theoretical and Applied Climatology**, 135(1), p. 279-292, 2019.

VITORINO, F.; REQUEZA, G.; GOULART, M.; NOVAES, R.; XAVIER, D. S. R. Costa Rica e Guatemala: Um estudo comparativo sobre o café e a cana de açúcar. **Revista Do Encontro de Gestão e Tecnologia**, 2(2), e22236, 2025. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14768100.

XIONG, J.; LIANG, F.; YANG, X.; DU, T.; PACENKA, S.; STEENHUIS, T. S.; SIDDIQUE, K. H. M. Avaliação da pegada hídrica do cultivo verde e tradicional de culturas na região agrícola de Huang-Huai-Hai. **Agronomy**, 2022, vol. 12 (10), 2494. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12102494.

XU, Q.; FOX, G.; MCKENNEY, D.; PARKIN, G. A theoretical economic model of the demand for irrigation water. **Agricultural Water Management**, volume 225, 105763, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105763.

YANG, Q.; HUANG, X.; TANG, Q. Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations. **The Science of the Total Environment**, volume 705, 135984, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135984.

YANG, P.; WU, L.; CHENG, M.; FAN, J.; LI, S.; WANG, H.; QIAN, L. Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China. **Water**, 2023, voume 15, n. 9, 1733. DOI: https://doi.org/10.3390/w15091733.

YUGUDA, T. K.; LI, Y.; ZHANG, W.; YE, Q. Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: A case study of Savannah Sugar Irrigation District, Nigeria. **Science of The Total Environment**, volume 715, 136886, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136886.

ZAPATA, N.; ROBLES, O.; PLAYÁN, E.; PANIAGUA, P.; ROMANO, C.; SALVADOR, R.; MONTOYA, F. Low-pressure sprinkler irrigation in maize: Differences in water distribution above and below the crop canopy. **Agricultural Water Management**, volume 203, p. 353-365, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.025.

APENDICÊS

Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Capibaribe.

Classe de Uso e Ocupação	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
Formação Florestal	232,63	229,62	229,31	228,04	229,68	232,06	234,80	240,09	242,58	245,72
Formação Savânica	2796,61	2872,15	2976,49	2992,91	2962,15	2920,88	2870,13	2820,89	2780,45	2757,42
Manguezal	0,08	0,09	0,10	0,10	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
Silvicultura	0,10	0,10	0,12	0,27	0,32	0,32	0,31	0,43	0,46	0,52
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Formação Campestre	2,68	2,66	3,44	4,36	5,17	4,76	3,85	3,93	3,48	5,47
Pastagem	2986,52	2946,97	3072,55	3145,85	3192,04	3227,59	3261,02	3287,28	3263,17	3210,35
Cana-de-açúcar	**151,39**	**151,13**	**151,02**	**149,06**	**149,86**	**149,34**	**148,47**	**146,25**	**145,90**	**146,00**
Mosaico de Agricultura e Pastagem	1048,79	1012,78	780,73	698,39	679,49	683,43	696,63	710,00	756,78	819,83
Praia, Duna e Areal	0,05	0,04	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05	0,05
Área Urbanizada	158,12	162,96	170,74	175,68	180,37	185,38	189,95	196,94	209,62	217,56
Outras Áreas não vegetadas	8,82	8,00	7,75	6,25	8,02	8,06	8,30	8,74	9,85	11,48
Mineração	0,92	0,94	0,97	1,01	1,07	1,09	1,10	1,11	1,11	1,11
Aquicultura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apicum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rio, lago e oceano	57,11	56,26	50,32	41,68	35,53	30,85	29,18	28,00	30,31	28,25
Mosaico de Usos	0,10	0,19	0,31	0,28	0,09	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05

Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Ipojuca.

Classe de Uso e Ocupação	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
Formação Florestal	131,54	132,13	133,03	133,88	136,97	139,69	142,95	145,41	146,97	147,78
Formação Savânica	1199,66	1198,94	1182,88	1181,65	1165,75	1162,49	1165,29	1171,73	1231,75	1264,64
Manguezal	14,21	14,22	14,24	14,29	14,40	14,44	14,51	14,47	14,46	14,47
Silvicultura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Campo Alagado e Área Pantanosa	3,27	3,27	3,28	3,10	3,33	3,34	3,22	2,87	2,97	3,03
Formação Campestre	0,63	0,30	0,31	0,34	0,35	0,37	0,35	0,28	0,29	0,25
Pastagem	1451,75	1466,00	1540,81	1567,54	1582,90	1572,46	1555,50	1537,35	1449,79	1381,21
Cana-de-açúcar	**299,06**	**300,97**	**301,55**	**300,22**	**301,21**	**299,99**	**298,23**	**292,73**	**292,24**	**292,04**

Classe de Uso e Ocupação	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Mosaico de Agricultura e Pastagem	353,24	334,78	270,54	244,58	236,28	245,33	255,81	264,41	284,66	314,67
Praia, Duna e Areal	1,11	1,12	1,10	0,98	0,85	0,79	0,77	0,74	0,74	0,73
Área Urbanizada	95,17	98,57	104,86	108,12	113,98	116,79	119,18	123,07	128,70	133,42
Outras Áreas não vegetadas	5,70	5,12	4,79	5,20	5,67	5,46	4,88	4,43	4,46	4,50
Mineração	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Aquicultura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02
Apicum	0,20	0,17	0,14	0,08	0,07	0,06	0,07	0,06	0,05	0,04
Rio, lago e oceano	23,53	22,37	19,87	17,22	15,30	15,04	14,23	15,97	16,05	16,53
Mosaico de Usos	7,99	9,12	9,66	9,87	10,01	10,82	12,08	13,56	13,93	13,72

Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Sirinhaém.

Classe de Uso e Ocupação	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Formação Florestal	310,93	310,43	312,35	312,87	318,91	323,61	328,93	334,55	336,32	336,95
Formação Savânica	34,80	35,05	34,40	34,08	33,64	33,48	32,71	32,55	32,41	32,15
Manguezal	33,54	33,63	33,74	34,03	34,32	34,52	34,58	34,61	34,62	34,64
Silvicultura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Campo Alagado e Área Pantanosa	2,83	2,87	2,91	2,92	2,99	3,01	2,93	2,91	2,87	2,88
Formação Campestre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pastagem	558,30	586,51	648,34	658,73	643,49	618,05	603,58	599,53	585,88	570,32
Cana-de-açúcar	**786,25**	**789,47**	**790,88**	**785,42**	**785,58**	**782,19**	**776,55**	**762,77**	**761,48**	**761,08**
Mosaico de Agricultura e Pastagem	595,44	564,19	499,92	494,75	504,21	528,06	543,10	554,58	566,39	581,96
Praia, Duna e Areal	1,24	1,27	1,20	1,05	0,89	0,80	0,81	0,89	0,89	0,84
Área Urbanizada	19,22	19,83	20,78	21,82	22,26	22,69	23,30	23,65	24,46	24,90
Outras Áreas não vegetadas	0,48	0,46	0,39	0,32	0,26	0,27	0,33	0,34	0,36	0,39
Mineração	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aquicultura	1,01	1,02	1,02	1,01	1,02	1,01	1,01	0,96	0,94	1,03
Apicum	2,11	1,98	1,83	1,61	1,50	1,46	1,45	1,50	1,53	1,51
Rio, lago e oceano	23,13	22,54	21,49	20,64	20,19	20,11	19,97	20,38	21,10	20,60
Mosaico de Usos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Una.

Classe de Uso e Ocupação	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
Formação Florestal	516,52	521,95	531,38	533,25	546,36	552,75	564,22	572,82	580,73	583,96
Formação Savânica	843,39	837,32	812,92	797,54	783,94	768,08	758,64	761,95	807,55	828,24
Manguezal	2,85	2,88	2,91	2,90	2,94	2,96	2,95	2,94	2,93	2,92
Silvicultura	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,58	0,59	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63	0,62	0,58	0,58
Formação Campestre	0,21	0,09	0,21	0,29	0,26	0,25	0,14	0,12	0,16	0,23
Pastagem	3638,32	3680,62	3881,44	3965,41	3982,29	3981,99	3971,92	3958,48	3881,18	3814,63
Cana-de-açúcar	**409,34**	**410,11**	**408,66**	**390,60**	**382,92**	**377,50**	**370,08**	**357,70**	**356,24**	**356,05**
Mosaico de Agricultura e Pastagem	795,16	752,33	575,55	527,49	517,08	528,06	537,75	541,88	556,36	591,67
Praia, Duna e Areal	0,15	0,16	0,16	0,14	0,11	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Área Urbanizada	41,89	43,94	46,34	49,20	51,15	52,47	53,85	55,64	59,26	61,17
Outras Áreas não vegetadas	16,37	12,65	7,95	3,39	3,73	3,97	4,94	6,09	7,97	13,19
Mineração	0,31	0,32	0,31	0,31	0,32	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Aquicultura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apicum	0,30	0,27	0,20	0,12	0,11	0,08	0,08	0,08	0,19	0,21
Rio, lago e oceano	28,44	25,90	22,14	18,81	17,82	17,87	17,14	21,21	25,37	25,47
Mosaico de Usos	50,31	55,01	53,31	54,01	54,45	57,05	61,31	64,11	65,13	65,32