



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ANTONIO FABIO DA SILVA LIMA

**PEGADAS DE ESCASSEZ HÍDRICA E CARBONO DAS CULTURAS DA BANANA
E GOIABA IRRIGADAS NO BAIXO JAGUARIBE - CEARÁ**

FORTALEZA

2023

ANTONIO FABIO DA SILVA LIMA

PEGADAS DE ESCASSEZ HÍDRICA E CARBONO DAS CULTURAS DA BANANA E
GOIABA IRRIGADAS NO BAIXO JAGUARIBE - CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva

Coorientadora: Prof. Dra. Viviane da Silva Barros

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L696p Lima, Antonio Fabio da Silva.
Pegadas de escassez hídrica e carbono das culturas da banana e goiaba irrigadas no Baixo Jaguaribe - Ceará / Antonio Fabio da Silva Lima. – 2023.
136 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva.
Coorientação: Profa. Dra. Viviane da Silva Barros.
1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Emissão de gases. 3. Eficiência do uso da água. 4. Mudanças climáticas. I. Título.

CDD 630

ANTONIO FABIO DA SILVA LIMA

PEGADAS DE ESCASSEZ HÍDRICA E CARBONO DAS CULTURAS DA BANANA E
GOIABA IRRIGADAS NO BAIXO JAGUARIBE - CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Viviane da Silva Barros (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Dr. Rubens Sonsol Gondim
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

A Deus.

Aos meus familiares, mãe Maria Helena, pai Antônio e irmã Fabiana por todo apoio.

Dedico.

AGRADECIMENTO

À Deus e à Virgem Maria por todo amparo durante esses anos e por me permitir chegar até aqui.

Aos meus familiares (Maria Helena, Antônio e Fabiana) por tudo que fizeram para que eu chegasse onde estou hoje. Sem essa base familiar, eu não conseguiria atingir esse objetivo. Em especial à minha mãe, que abriu mão de muita coisa para que eu pudesse realizar meus sonhos. Ela é o principal motivo de eu estar aqui. Amo vocês e saibam que essa conquista também vos pertence.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio institucional e financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio que me permitiu realizar este sonho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva e minha coorientadora Prof. Dra. Viviane da Silva Barros, obrigado pela confiança, apoio e empatia não só no desenvolvimento da pesquisa, mas em outros problemas extra-acadêmicos que passei durante a pesquisa. Sem vocês, não seria possível a realização deste trabalho.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) por todo o apoio e disponibilidade de sua infraestrutura durante o desenvolvimento da pesquisa

Aos Pesquisadores participantes da banca examinadora, Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo, Dr. Rubens Sonsol Gondim e Dr. Raimundo Nonato Távora Costa pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões neste trabalho.

Aos colegas discentes e também ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia agrícola, pelas reflexões, críticas, sugestões recebidas e todo o ensinamento passado durante esses dois anos de mestrado. Não poderia deixar de agradecer também aos dois orientadores que tive comigo durante a graduação, do corpo docente da UNILAB, sendo: Lucas Nunes da Luz e Susana Churka Blum, sem vocês eu não estaria aqui.

Aos meus amigos pessoais, de graduação e de pós-graduação, em especial a Rute Maria Rocha Ribeiro, Andreza Silva Barbosa, José Marcelo da Silva Guilherme, José Gutemberg Cavalcante, Murilo de Sousa Almeida, José Thomas Machado de Sousa e Jonnathan Richeds da Silva Sales.

Por fim, a todos que me ajudaram e auxiliaram de forma direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado e eu conseguisse alcançar esse objetivo, obrigado a todos.

“Seja forte e corajoso! Não fique desanimado, nem tenha medo, porque eu, o SENHOR, seu Deus, estarei com você” Josué 1:9

RESUMO

A Organização das Nações Unidas desenvolveu 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) como um apelo global para acabar com a pobreza e proteger o meio ambiente. O setor agropecuário necessita de grande atenção nessa temática devido, principalmente, às suas emissões de gases de efeito estufa. Frutíferas como a bananeira e a goiabeira são importantes em países de clima tropical. Porém, não existem estudos voltados para pegada de carbono e de escassez hídrica dessas frutíferas, a fim de tornar essa produção mais sustentável no Nordeste brasileiro. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é calcular a pegada de escassez hídrica e a pegada de carbono das culturas bananeira e goiabeira irrigadas e indicar o potencial de mitigação dessas pegadas. Para realização deste trabalho foi utilizada a metodologia da avaliação do ciclo de vida, realizando as análises de pegada de escassez hídrica segundo a ISO 14046 e pegada de carbono que seguirá as recomendações da ISO 14067. A unidade funcional do estudo é de 1 quilograma da banana e da goiaba *in natura*. A fronteira do sistema adotado foi do berço ao portão. Os resultados apontam maior impacto na pegada de carbono para as propriedades estudadas quando comparado com o inventário de referência, variando entre 0,24-0,84 e 0,23-0,68 kg CO₂ eq/kg de banana e goiaba respectivamente. A pegada de escassez hídrica também foi superior nas propriedades, mostrando a necessidade de manejo da irrigação dos produtores. Além disso, a pegada de escassez hídrica futura (2025-2055) aumentou em média 24,9% para banana e 23,47% para a goiaba. A carência de uma assistência técnica qualificada e contínua para dar suporte à condução dos cultivos e no manejo da irrigação é um forte determinante nos elevados valores das pegadas de carbono e da escassez hídrica das propriedades.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; emissões de gases; eficiência do uso da água; mudanças climáticas.

ABSTRACT

The United Nations has developed 17 Sustainable Development Goals (SDGs) as a global call to end poverty and protect the environment. The agricultural sector requires significant attention in this context, primarily due to its greenhouse gas emissions. Fruits such as banana and guava are important in tropical climate countries. However, there are no studies focused on the carbon and water scarcity footprints of these fruits to make production more sustainable in the Brazilian Northeast. In light of this, the objective of this work is to calculate the water scarcity footprint and carbon footprint of irrigated banana and guava crops and indicate the potential for mitigating these footprints. The life cycle assessment methodology was used for this work, conducting water scarcity footprint analyses according to ISO 14046 and carbon footprint analysis following the recommendations of ISO 14067. The functional unit of the study is 1 kilogram of fresh banana and guava. The system boundary adopted was from cradle to gate. The results indicate a higher impact on the carbon footprint for the studied properties compared to the reference inventory, ranging from 0.24-0.84 and 0.23-0.68 kg CO₂ eq kg⁻¹ for banana and guava, respectively. The water scarcity footprint was also higher in the properties, highlighting the need for irrigation management by producers. Additionally, the future water scarcity footprint (2025-2055) increased on average by 24.9% for banana and 23.47% for guava. The lack of qualified and continuous technical assistance to support crop management and irrigation management is a significant factor in the high values of carbon and water scarcity footprints in the properties.

Keywords: life cycle assessment; gas emissions; water use efficiency; climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estágios do ciclo de vida de um produto.....	25
Figura 2 –	Etapas da avaliação do ciclo de vida que serão aplicadas no projeto.....	27
Figura 3 –	Mapa de localização da região estudada.....	54
Figura 4 –	Fronteiras do sistema de produção estudadas.....	55
Figura 5 –	Pegada de carbono para 1 quilograma de banana (A) e de goiaba (B) por propriedade comparado com o inventário de referência.....	68
Figura 6 –	Contribuições dos processos realizados na produção de 1 quilograma da banana nas mudanças climáticas de referência - R (A) e das propriedades estudadas - P1 (B), P2 (C) e P3(D).....	71
Figura 7 –	Contribuições dos processos realizados na produção de 1 quilograma da banana nas mudanças climáticas dos produtores estudados - P4 (A), P5 (B), P6 (C) e P7 (D).....	72
Figura 8 –	Contribuições dos processos realizados na produção de 1 quilograma da goiaba nas mudanças climáticas de referência - R (A) e das propriedades estudadas - P1 (B), P2 (C), P3(D), P4 (E) e P5 (F).....	74
Figura 9 –	Comparação das lâminas de água aplicadas nas propriedades de bananeira (A) e de goiabeira (B) estudadas, necessidade hídrica real (NHR) e a do inventário de referência (R).....	77
Figura 10 –	Comparação no impacto da pegada de escassez hídrica da bananeira entre os produtores estudados, a necessidade hídrica real (NHR) e a média do inventário de referência (R).....	78
Figura 11 –	Comparação no impacto da pegada de escassez hídrica da goiabeira entre as propriedades estudadas, à necessidade hídrica real (NHR) e a média do inventário de referência (R)	78

Figura 12 –	Impacto da pegada de escassez hídrica das propriedades e inventário de referência para as culturas de banana (A e B) e goiaba (C e D) de acordo com cada mês do ano.....	81
Figura 13 –	Contribuições dos processos produtivos da bananeira na pegada de escassez hídrica, tanto no inventário de referência (A) como das propriedades estudadas (B, C e D)	83
Figura 14 –	Contribuições dos processos produtivos da bananeira na pegada de escassez hídrica das propriedades estudadas (A, B, C e D)	84
Figura 15 –	Contribuições dos processos produtivos da goiabeira na pegada de escassez hídrica, tanto no inventário de referência (A) como das propriedades estudadas (B, C, D, E e F)	85
Figura 16 –	Regressão para validação dos dados de base climática do modelo CCSM4.....	86
Figura 17 –	Comparação da ETo e PPE futura estimada pelo modelo CCSM4 para dois cenários do IPCC.....	87
Figura 18 –	Comparação da demanda hídrica entre os cenários do modelo CCSM4.....	88
Figura 19 –	Comparação entre os cenários do modelo CCSM4 no impacto da pegada de escassez hídrica das culturas.....	89
Figura 20 –	Comparação entre os cenários de pegada de carbono.....	94
Figura 21 –	Comparação entre os cenários de pegada de escassez hídrica.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro resumo dos trabalhos com pegada de carbono citados neste tópico (4.4.2)	33
Tabela 2 – Quadro resumo dos trabalhos com pegada de escassez hídrica citados neste tópico (4.4.6)	38
Tabela 3 – Fases do ciclo produtivo da bananeira.....	47
Tabela 4 – Fases do ciclo produtivo da goiabeira.....	52
Tabela 5 – Caracterização das propriedades avaliadas e do inventário de referência (média da Região do Baixo Jaguaribe)	56
Tabela 6 – Dados de coeficiente da cultura (K_c) e coeficiente de redução (K_r) utilizados.....	59
Tabela 7 – Fator de caracterização usado para cálculos de escassez hídrica.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AWARE	<i>Available Water Remaining</i>
CEASA	Centrais Estaduais de Abastecimento
CEAGESP	Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CMIP	Projeção de Intercomparação de Modelos Acoplados
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
eq	Equivalente
ET _c	Evapotranspiração da Cultura
ET _o	Evapotranspiração de Referência
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FC	Fator de Caracterização
Funceme	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GEE	Gases do Efeito Estufa
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ILCD	Sistema Internacional de Dados de Ciclo de Vida de Referência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
ISO	Organização Internacional de Normalização
kg	Quilograma
km	Quilômetro
l	Litros

m	Metros
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbicos
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MRI	<i>Midwest Research Institute</i>
MUT	Mudança do Uso da Terra
N ₂ O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PC	Pegada de Carbono
PH	Pegada Hídrica
pH	Potencial Hidrogeniônico
pl	Planta
PPE	Precipitação Efetiva
RCP	Rota de Concentração Representativa
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
SEEG	Sistema de Estimativas Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
t	Toneladas
tkm	Toneladas por Quilômetro Rodado
Uni	Unidade
WFLDB	Banco de Dados Mundial de Alimentos para Avaliação do Ciclo de Vida

LISTA DE SÍMBOLOS

USD ou US\$	Dólar Americano
° C	Grau Celsius
%	Porcentagem
R\$	Real (Moeda Brasileira)
>	Maior
<	Menor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	HIPOTESES.....	20
3	OBJETIVO	21
3.1	Objetivo geral.....	21
3.2	Objetivo específicos	21
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1	Influência da agricultura nas mudanças climáticas.....	21
4.2	Uso dos Recursos Hídricos na agricultura.....	23
4.3	Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	25
4.3.1	<i>Linha do tempo para estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV).....</i>	26
4.3.2	<i>Etapas de análise do ACV.....</i>	27
4.4	Pegadas de carbono e hídrica como indicador de sustentabilidade.....	31
4.4.1	<i>Pegada de carbono.....</i>	31
4.4.2	<i>Estudos de pegada de carbono.....</i>	32
4.4.3	<i>Pegada hídrica.....</i>	34
4.4.4	<i>Pegada de Escassez Hídrica segundo ISO 14046.....</i>	36
4.4.5	<i>Estudos de Pegada de Escassez hídrica na agricultura.....</i>	37
4.4.6	<i>Previsões futuras e benefícios para pegada de escassez hídrica.....</i>	39
4.5	Fruticultura.....	40
4.6	A cultura da banana.....	42
4.6.1	<i>Aspectos gerais.....</i>	42
4.6.2	<i>Importância econômica.....</i>	43
4.6.3	<i>Condições edafoclimáticas.....</i>	44
4.6.4	<i>Produção da cultura.....</i>	46
4.7	A cultura da goiaba.....	47
4.7.1	<i>Aspectos gerais.....</i>	47
4.7.2	<i>Importância econômica.....</i>	48
4.7.3	<i>Condições edafoclimáticas.....</i>	49
4.7.4	<i>Produção da cultura.....</i>	51

5	MATERIAL E MÉTODOS.....	52
5.1	Localização e caracterização da região de estudo.....	52
5.2	Avaliação do ciclo de vida.....	54
5.2.1	<i>Análise do inventário do ciclo de vida.....</i>	54
5.2.1.1	<i>Escopo.....</i>	54
5.2.1.2	<i>Coleta de dado.....</i>	56
5.2.1.3	<i>Estimativas de Emissões.....</i>	57
5.2.1.4	<i>Necessidade hídrica das culturas.....</i>	58
5.2.1.5	<i>Necessidade hídrica futura (2025-2050).....</i>	59
5.2.1.6	<i>Comparações das lâminas de água.....</i>	61
5.2.1.7	<i>Transporte (tkm).....</i>	62
5.3	Avaliação dos impactos ambientais.....	62
5.3.1	<i>Pegada Carbono.....</i>	62
5.3.2	<i>Pegada de Escassez Hídrica.....</i>	62
5.3.2.1	<i>Pegada de escassez hídrica futura.....</i>	64
5.4	Análise de incerteza.....	65
5.5	Análise de sensibilidade.....	65
5.6	Interpretação dos resultados.....	66
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
6.1	Inventários de entrada e de saída do sistema de produção das culturas da bananeira e de goiabeira.....	66
6.2	Pegada de carbono.....	68
6.3	Pegada de escassez hídrica.....	76
6.3.1	<i>Pegada de escassez hídrica da região.....</i>	76
6.3.2	<i>Pegada de escassez hídrica futura.....</i>	86
6.3.3	<i>Comparação entre as pegadas de escassez hídrica atual (tópico 6.3.1) e futura (tópico 6.3.2)</i>	89
6.4	Análise de incerteza.....	91
6.5	Análise de sensibilidade.....	91
6.5.1	<i>Pegada de carbono.....</i>	91
6.5.2	<i>Pegada de escassez hídrica.....</i>	93
7	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS	96

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO.....	115
APÊNDICE B – INVENTÁRIOS.....	117
APÊNDICE C – ANÁLISE DE INCERTEZA.....	122
ANEXO A - FÓRMULA E FATORES UTILIZADOS.....	126
ANEXO B - INVENTÁRIOS ECOINVENT BANANA E GOIABA.....	133

1 INTRODUÇÃO

As condições climáticas do mundo têm prejudicado setores economicamente importantes. Com isso, a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015a) desenvolveu 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), como um apelo global para acabar com a pobreza e proteger o meio ambiente, onde 193 países que integram às Nações Unidas se comprometeram a alcançá-los até o ano de 2030.

O último relatório divulgado pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2018 *apud* Fu *et al.*, 2019) mostra que é um desafio alcançar todos esses objetivos, tendo em vista que restam apenas sete anos, dificultando a realização do plano de ação (Fu *et al.*, 2019). Sendo assim, é essencial um trabalho conjunto com instituições de pesquisa, para garantir que os objetivos sejam atingidos. A ODS 13, ligada diretamente a este estudo, trata da ação contra as mudanças do clima, com designo em tomar medidas contra as mudanças climáticas e seus impactos, e uma das principais instituições que corroboram com pesquisas voltadas para estas temáticas é o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Segundo o relatório divulgado pelo IPCC (2021a), o mundo está com elevado nível de emissões de gases do efeito estufa (GEE). Mesmo diante de todos os esforços das Nações Unidas, por intermédio dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), em 2019 o dióxido de carbono (CO₂) atmosférico foi o maior observado dentro de 2 milhões de anos e as concentrações de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) as maiores dentro de 800.000 anos.

Uma alternativa para instigar os setores de produção a reduzir a pegada de carbono, surgiu por meio do protocolo de Quioto, tido hoje como crédito de carbono (Hartl, 2019). O financiamento de carbono é um caminho economicamente viável para reduzir as emissões de GEE nos meios de produção, auxiliando nos objetivos de desenvolvimento sustentável e, além disso, obter lucros no que antes era gratuito (Xu; Solangi; Wang, 2023). A redução da pegada de carbono é fundamental para atenuar os efeitos do aumento da temperatura devido, principalmente, às mudanças climáticas.

Segundo o IPCC (2021a) a temperatura vem crescendo de forma linear devido a liberação desses GEE, que influenciam no aquecimento global e, conseqüentemente, ocasionam situações climáticas extremas, como o calor, precipitações intensas e/ou secas. Segundo Agência Nacional de Águas (2016) o principal ponto que fará a população notar os malefícios das mudanças climáticas será a escassez dos recursos hídricos.

Atualmente, mais de 2 bilhões de pessoas no mundo, distribuídas por diversas regiões, convivem com a escassez de recursos hídricos. É relevante destacar que esse estresse

hídrico ocorre em estações específicas do ano, afetando pelo menos 4 bilhões de pessoas durante pelo menos um mês (ONU, 2021).

Segundo o relatório da Organização da Nações Unidas (2021), globalmente os reservatórios de água apresentam redução no armazenamento, tendo uma queda significativa na disponibilidade de água doce. Além disso, grande parte da água na superfície tem se perdido em decorrência do aumento da temperatura. Em contrapartida a esses dados, o consumo de água teve uma aumentou seis vezes dentro dos últimos 100 anos.

As mudanças climáticas, em conjunto com a escassez hídrica, têm preocupado diversas regiões do globo. No Brasil, existem duas leis voltadas para essas temáticas. A primeira, Lei 12187/2009 (Brasil, 2009), trata da política nacional sobre a mudança climática, surgindo de uma parceria entre o país e as Nações Unidas com o objetivo de mitigar as emissões de GEE. Já a segunda, conhecida como Lei 9433/1997 ou Lei das Águas, é direcionada a gestão dos recursos hídricos do país (Brasil, 1997).

Mesmo diante dos esforços realizados pelo Brasil, os dados publicados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico mostram que o país tem reduzido as precipitações desde o ano de 2016, resultando em limitações drásticas nas vazões em diversas localidades. O estado crítico de seca ocorreu 50 anos antes do previsto, reduzindo as recargas dos reservatórios e acarretando problemas significativos no setor agrícola (ANA, 2021). Esse cenário é preocupante, pois dificulta as perspectivas futuras das lavouras, especialmente para a fruticultura, que possui um grande potencial no país.

O Brasil está entre os principais produtores de frutas tropicais, contando atualmente com 2 milhões de hectares plantados e uma produção de 690.364 toneladas, ficando atrás de China e Índia com produções de 4.203.342 toneladas e 6.207.044 toneladas, respectivamente (FAO, 2020b; IBGE, 2020).

No Brasil, destaca-se a banana, por ser a segunda fruta mais produzida nacionalmente, com uma área colhida de 456.992 hectares e um total de 6,8 milhões de toneladas colhidas. Outra espécie importante no território nacional é a goiaba, tendo uma área destinada à colheita de 22.025 hectares e produção em toneladas de 566.293, rendendo assim em média 25.842 quilogramas por hectare (IBGE, 2020).

A produção de banana (*Musa* spp.) na região Nordeste atinge 2.287.762 toneladas, com um rendimento de 12,6 t ha⁻¹. No Estado do Ceará, especificamente, a área cultivada abrange 35.690 hectares, resultando numa produção de 431.017 toneladas de banana e um rendimento de 12,1 t ha⁻¹ (IBGE, 2020).

A goiaba (*Psidium guajava*) na região Nordeste tem uma produção de 284.503 toneladas, com um rendimento de 27 t ha⁻¹. Essa cultura tem apresentado elevado crescimento dentro do Estado do Ceará, com grande potencial de expansão. Em 2015, a quantidade produzida era de 14.005 toneladas. Essa produção apresentou um crescimento linear e sua produção aumentou para 21.272 toneladas em 2020, amplificando uma percentagem de 51,88% na sua produção em cinco anos. Esse aumento significativo elevou o rendimento médio de 9,7 t ha⁻¹ para 15,6 t ha⁻¹, destacando assim o potencial de produção desta fruta no território em questão (IBGE, 2020).

A utilização de pacotes tecnológicos, como fertilizantes inorgânicos, é muito comum nessas regiões, visando manter elevadas produtividades. Contudo, é importante ressaltar que esses pacotes contribuem significativamente para a pegada de carbono. Exemplos disso incluem a ureia, o calcário, os adubos fosfatados, entre outros, que resultam na emissão de CO₂ e N₂O (Hanafiah *et al.*, 2022; IPCC, 2021). Isso evidencia a importância da realização de estudos direcionados a melhoria da sustentabilidade desses pomares. A bananeira e a goiabeira são importantes para o Brasil e região Nordeste devido, principalmente, ao clima tropical. No entanto, é incomum encontrar estudos inclinados a reduzir a pegada de carbono e pegada de escassez hídrica das culturas. Isso ressalta a necessidade de tornar a produção dessas frutíferas mais sustentável, especialmente no Nordeste brasileiro.

As metodologias que regem estudos com objetivo de mitigar as emissões de GEE e, consequentemente, reduzir a pegada de carbono/mudanças climáticas e escassez hídrica, são apresentadas pela Organização Internacional de Normatização (*International Standard Organization* – ISO). Nesse contexto, a ISO estabelece métodos e procedimentos para guiar pesquisas nessa temática. Dessa forma, é possível apresentar um passo a passo para o processo avaliativo, com base no ciclo de vida de cada produto. Isso permite, no final, uma avaliação dos impactos e, possibilitando a identificação de qual etapa da produção precisa ser revista para melhorar a sustentabilidade do processo produtivo (ISO, 2006a, 2006b, 2013, 2014).

2 HIPÓTESES

- A utilização do método de avaliação do ciclo de vida - ACV e Available Water Remaining - AWARE permitirão identificar os pontos críticos e onde se deve melhorar a gestão dos recursos hídricos no ciclo de vida desses produtos;

- O inventário de insumos utilizados no ciclo de vida da bananeira e goiabeira e a estimativa da pegada de carbono dessas áreas, com base na norma ISO 14067, evidenciará as etapas produtivas que merecem atenção quanto às mudanças climáticas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

- Calcular a pegada de escassez hídrica e a pegada de carbono das culturas da bananeira e da goiabeira irrigadas e indicar o potencial de mitigação dessas pegadas.

3.2 Objetivos Específicos

- Elaborar inventários para as culturas em estudo;
- Determinar a pegada de carbono de duas culturas, bananeira e da goiabeira, para a situação climática atual na Sub-bacia do Baixo Jaguaribe;
- Avaliar a pegada de carbono e pegada de escassez hídrica da área de estudo e comparar com as pegadas de carbono e hídrica para microrregião do Baixo Jaguaribe, estimadas em função do inventário de referência.
- Determinar a pegada de escassez hídrica das culturas da bananeira e da goiabeira, para a situação climática futura (2025-2055) e comparar com a pegada de escassez hídrica para a situação climática atual e com a área de estudo na Sub-bacia do Baixo Jaguaribe.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Influência da agricultura nas mudanças climáticas

A agricultura é uma atividade que tem apresentado crescimento linear, sendo fundamental no desenvolvimento econômico e social dos países. Porém, essa prática tem gerado discussões no mundo todo, pois o surgimento de novas tecnologias com alta demanda de combustível, como máquinas de preparo do solo, de aplicação de agroquímicos e até mesmo sistemas de irrigação, tem facilitado manejos e operações de campo. Mas essa ascensão tem

ocasionado um excesso na emissão de gases do efeito estufa, excedendo assim as barreiras ambientais que não deveriam ser extrapoladas (Oliveira; Bertolini, 2022).

Para o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) nos últimos anos, tem sido um desafio para o mundo reduzir essa emissão de gases do efeito estufa. Países como China e Índia lideram o ranking mundial e, logo depois, vem o Brasil (SEEG, 2018). O setor agropecuário no Brasil apresentou aumento de aproximadamente 2,3% em suas emissões de GEE entre os anos de 2015-2016. Esse aumento pode ser diretamente relacionado ao crescimento linear da produção de carne bovina durante o mesmo período, destacando a influência direta dessa atividade nas emissões e nas mudanças climáticas (MCTI, 2020).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (2018), em 2016 o setor agropecuário foi responsável por grande parte das emissões brutas (25%) e das emissões líquidas (30%) dos gases de efeito estufa (GEE) gerados no Brasil, sendo assim, causador da liberação direta de 499,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e).

No ano de 2020 (ano pandêmico) o globo reduziu a emissão de gases brutos totais. Porém, o Brasil foi em contramão e continuou apresentando altas na liberação desses gases, emitindo assim cerca de 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, uma elevação linear quando comparada com 2019, que era de 1,97 bilhão de toneladas. As emissões de 2020 são em função de todos os setores, porém a mudança de uso da terra teve contribuição de 46% e o setor agropecuário de 27% (SEEG, 2021).

O setor agropecuário tem áreas com maior emissão de gases, representando 33,6% do total brasileiro. Entre as subáreas, tem-se a categoria animal com grande influência, onde o processo digestivo influencia 19% das emissões nacionais. Além dessa etapa, o manejo a ser adotado diante dos dejetos animais tem grande contribuição, liberando metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), uma representatividade de 4,1% das emissões do país (MCTI, 2020).

A queima de resíduos vegetais tem mostrado grande contribuição nas mudanças climáticas com base na sua liberação de GEE. "Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2020), a porcentagem de emissões atinge 1,1%, apresentando um aumento linear desde 2015. Os dois principais gases lançados na atmosfera por essa prática são o CH₄ e N₂O. É importante ressaltar que a quantidade e o tipo de gás liberado dependem da biomassa queimada, sendo que o CO₂ é liberado em proporções pequenas, o que não é considerado relevante para essa categoria. Este último é reabsorvido durante a fotossíntese no próximo ciclo.

Outras atividades agrícolas, como a mudança do uso da terra, também podem influenciar com a redução da biodiversidade através do desmatamento. Essa mudança abrupta para áreas com cultivo de monocultura prejudicam as características físicas e químicas do solo, além de reduzir o sequestro do carbono, gerando maior liberação de CO₂ para a atmosfera (Miller; Spoolman, 2012). Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2020) essa categoria influenciou em 95% das emissões no setor, aumentando em 27,1% quando comparado ao ano de 2015.

Os solos agrícolas são frequentemente mencionados quando se trata de gases do efeito estufa, contribuindo com 36%, o que representa um aumento de 4% em relação aos valores de 2015. Esse aumento pode ser explicado pela utilização crescente de técnicas agrícolas, impulsionada pelo aumento populacional. Dentre essas técnicas, destacam-se o uso de adubos sintéticos e orgânicos, que são incorporados ao solo durante o ciclo vegetativo. Um elemento crucial nessa discussão é o nitrogênio, que libera NH₃ e NO_x por lixiviação ou volatilização (MCTI, 2020).

Essas emissões têm gerado mudanças no clima em diversas regiões do globo e isso pode levar a danos nas lavouras, segundo Cintra, de Melo e de Menezes (2020). Esse cenário que vem sendo formado pode prejudicar de forma direta as produções, tendo em vista que o CO₂ liberado ocasiona mudanças de temperatura e precipitação, fatores estes que regulam o desempenho vegetal.

Com base nisso, é possível adotar diversas metodologias na agricultura com o intuito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A aplicação de agroquímicos exerce uma influência direta nas mudanças climáticas; portanto, os agricultores podem buscar na literatura maneiras de diminuir essa aplicação sem comprometer sua produção. Segundo Nobre e Oliveira (2018), existem várias técnicas que visam mitigar as emissões, como a redução do desmatamento, o reflorestamento e a gestão dos resíduos do processo produtivo. Atualmente, há uma discussão intensa sobre a agricultura de baixo carbono, que envolve a adoção de sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta, plantio direto, uso de leguminosas para fixação biológica de nitrogênio, entre outras práticas. Essas abordagens representam soluções para aumentar o sequestro de carbono e melhorar a ciclagem dos nutrientes e o ciclo da água.

4.2 Uso dos Recursos Hídricos na agricultura

A escassez dos recursos hídricos tem se tornado uma inquietação para todos os pesquisadores do mundo. Isso porque, diante do crescimento populacional, a demanda por água

tem aumentado de forma linear. Essa escassez hídrica é definida como o uso indiscriminado desse recurso, o que significa que ocorre quando a utilização da água chega perto ou até mesmo ultrapassa, muitas vezes, o consumo natural. Deste modo, se ultrapassa a capacidade suportada por determinado corpo hídrico, impedindo assim a reestruturação dessa bacia hidrográfica (Andrade *et al.* 2020).

A falta de manejo correto nos sistemas de irrigação é comum para muitos agricultores, resultando no uso desregrado dos recursos hídricos. Por conseguinte, esses fatores culminam na aplicação acentuada da água, mais até do que o necessário nas lavouras. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (2021) em regiões com baixa oferta de água, que é o caso da nossa região semiárida, o uso desse recurso tem que ser controlado, com objetivo de evitar situações futuras de escassez hídrica.

A amplificação da demanda de água doce para o consumo humano e para a irrigação é uma problemática que o mundo vem enfrentando atualmente (Perry, 2007). A agricultura, sendo um dos maiores consumidores globais de água doce, possui um grande impacto na disponibilidade de água existente. Em 2011, a pegada hídrica global (PH) da produção agrícola foi de 7.404 bilhões de metros cúbicos por ano. (Mekonnen; Hoekstra, 2012). Para regiões como a América do Sul, essa demanda deve ser elevada em 50% até 2050. Já na Ásia, o aumento será de 30%. No continente europeu, a elevação deve variar de acordo com os cenários apresentados (Burek *et al.*, 2016).

O aumento populacional gerou a necessidade de expandir a produtividade das lavouras. Com isso, houve uma intensificação nas áreas agrícolas, que propiciou uma expansão da agricultura irrigada, uso de variedades melhoradas e insumos agroquímicos. No entanto, é provável que o aumento da produtividade das safras não continue indefinidamente (Mekonnen; Gerbens-Leenes, 2020), fato este que põe em risco a segurança alimentar e nutricional das nações, que visando mitigar esses impactos podem excluir futuramente os produtos agrícolas com maiores pegadas hídricas de sua dieta. Exemplos de produções que demandam grande quantidade de água são: os arrozais cerca de 21% do total de água consumida para as plantações, o trigo compreende 12%, o milho compreende 9% e os grãos de cacau representam cerca de 1% (Martínez-Ángel *et al.*, 2015). A maior parte (76%) dos fluxos virtuais de água entre os países está relacionada ao comércio internacional de safras e produtos agrícolas derivados. (Hoekstra; Mekonnen, 2012).

Diante da iminente escassez hídrica que muitas regiões globais enfrentarão, espera-se um aumento de até 22% na pegada hídrica até 2090, devido às mudanças climáticas e ao uso da terra. Esse aumento é especialmente notável na água azul, utilizada na irrigação, com um

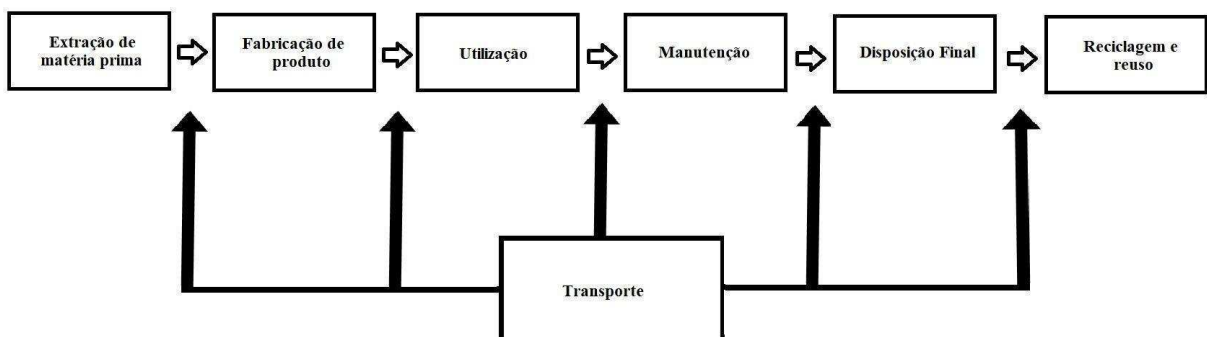
acréscimo de 70% conforme indicado por Huang *et al.* (2019). Diante desse cenário, torna-se relevante a avaliação da pegada de escassez hídrica na produção agrícola, dada a sua significativa contribuição na quantificação e promoção da sustentabilidade no uso desse recurso. No início os estudos de pegada hídrica eram relacionados apenas ao consumo de água. Hoje, é perceptível a necessidade de se estudar também a disponibilidade desse recurso na área em questão (Boulay *et al.*, 2015).

4.3 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) surge como uma ferramenta que pode auxiliar na investigação de pontos críticos durante a produção de um produto ou até mesmo de um processo, durante as etapas do ciclo de vida (Figura 1). Esta técnica surge com o intuito de estimar os impactos ambientais gerados na cadeia produtiva do produto, sendo necessário ter como base a realização de um inventário, com a intenção de avaliar todos os insumos que entram e saem naquela operação (Blanco *et al.*, 2017; Monte; Araújo; Figueirêdo, 2022).

Essa metodologia é amplamente aceita no Brasil e no mundo, pois se mostrou bastante eficiente em externar as possíveis implicações ambientais de determinado processo. Além disso, possibilita comparações entre sistemas produtivos e suas sustentabilidades. Geralmente, ela é usada para gerar categorias de impacto, como pegada de escassez hídrica e aquecimento global, proporcionando uma visão geral das causas e efeitos que essas problemáticas podem causar (Bare *et al.*, 2000).

Figura 1 - Estágios do ciclo de vida de um produto



Fonte: Adaptado de Sampaio (2019).

4.3.1 Linha do tempo para estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV)

Com o passar dos anos, debates sobre as condições ambientais do mundo foram se tornando comuns, assim como as discussões sobre quais produtos teriam maior potencial de impacto. No decorrer do tempo, percebeu-se que a maioria dos problemas gerados industrialmente não decorria da utilização dos produtos, mas sim da cadeia de produção desses itens. Isso abrange desde a fabricação até o transporte e disposição desse material. Nesse contexto, pode-se perceber a necessidade de avaliar o ciclo de vida de cada produto, surgindo assim a avaliação do ciclo de vida (ACV). Essa abordagem combina todas as entradas e saídas, juntamente com seus possíveis impactos (Guinée *et al.*, 2011).

Segundo Chehebe (1997), o primeiro estudo a ser realizado ocorreu no final da década de 1960, sendo realizado pela *Midwest Research Institute* (MRI). Nele, foram avaliados recursos, emissões e fluxos de resíduos de embalagens de refrigerantes, com foco em avaliar qual a mais sustentável para a empresa Coca-Cola. Este padrão de estudo ficou conhecido como modelo de análise ambiental e de recursos (*Resource and Environmental Profile Analysis - REPA*). Com o tempo, o mesmo passou por adaptações e melhorias, dando origem assim à ACV.

Nas décadas de 1970-1990, começaram a ser realizados muitos estudos voltados para a avaliação do ciclo de vida, mas segundo Guinée *et al.* (2011) era notória a falta de conhecimento científico para aplicação da metodologia. Diversos trabalhos foram surgindo e cada um deles apresentava diferentes métodos de avaliação. Porém, a falta de padronização tornava difícil a comparação, pois estudos com os mesmos objetos apresentavam-se com resultados bastante diferentes, fazendo com que surgissem dúvidas sobre qual a metodologia certa a ser adotada pelos pesquisadores.

Com base nisso, em 1990-2000 algumas empresas começaram a trabalhar em documentos que padronizassem estudos de avaliação do ciclo de vida. Com o objetivo de melhorar os métodos e procedimentos adotados nos trabalhos desta temática, foram elaborados alguns guias e *handbooks*. Somente em 1997, foi publicada a ISO 14040, intitulada “ACV: Princípios e enquadramento”, com o objetivo de orientar os caminhos a serem seguidos (Chehebe, 1997).

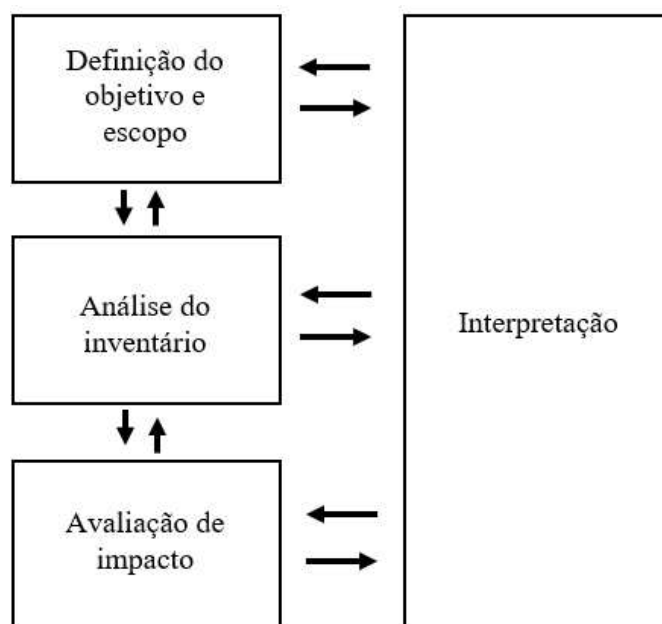
Entre 2000 e 2010 surgiram mais três normas, sendo elas: ISO 14041 – definição do objetivo, escopo e análise de inventário, ISO 14042 – avaliação de impacto do ciclo de vida (2004) e ISO 14043 - interpretação do ciclo de vida (2005). Após essa etapa, se viu a

necessidade de reestruturar para apenas duas normas, sendo estas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentadas como: ISO 14040 – Princípios e estrutura (2006a) e a ISO 14044 - Requisitos e orientações (2006b). Essa normatização gerada pela ISO proporcionou um dos principais benefícios para os trabalhos, que é o quadro metodológico. Esse quadro delinea os caminhos e etapas a serem seguidos nos trabalhos de ACV (ISO, 2006a, 2006b).

4.3.2 Etapas de análise do ACV

A avaliação do ciclo de vida considera diversas etapas durante a elaboração de produto e/ou processo necessário para chegar a um produto, podendo abranger até processos após a colheita, como transporte, distribuição, entre outros. Porém, durante a realização deste estudo é necessário o cumprimento de algumas etapas (Figura 2), a saber: 1º definição do objetivo e escopo, 2º análise do inventário, 3º avaliação de impacto e 4º interpretação dos resultados, conforme expressas na figura 02, denominada quadro metodológico. Vale ressaltar que a falta da avaliação do impacto dentro dos estudos caracteriza o processo como um estudo de inventário do ciclo de vida (ISO, 2006a).

Figura 2 - Etapas da avaliação do ciclo de vida que serão aplicadas no projeto



Fonte: ISO (2006a).

- *Definição do objetivo e do escopo*

A definição do objetivo e do escopo são estabelecidos a partir da designação das fronteiras (temporal e espacial). Ou seja, qual o período que será analisado e qual a extensão da sua área geográfica (exemplo: mais de um Estado ou dentro de apenas um Estado), sua abrangência e profundidade (Silva; Silva, 2015). De acordo com ABNT NBR ISO 14040: 2014, é preciso responder algumas perguntas, como:

- ✓ Qual a sua pretensão?
- ✓ Qual a razão de realizar este estudo e sua importância?
- ✓ Para quem seu estudo vai ser direcionado?
- ✓ Será feita uma avaliação comparativa? Os dados serão divulgados ao público?

Segundo a ABNT NBR ISO 14040 (2014), é importante que seu escopo possua alguns elementos. Entre eles, temos: especificação do produto, funções (motivo pelo qual se adquire), a unidade funcional (que quantifica a função, caso vá trabalhar com produção, vai ser em kg do produto, t, L...) e fluxo de referência (o que é preciso para produzir a sua unidade funcional), fronteiras do sistema (berço ao portão ou berço ao túmulo), categorias de impacto (escassez hídrica, aquecimento global...), a metodologia de avaliação de impacto e qualidade dos dados.

Vale ressaltar que o escopo mostra toda a programação a ser seguida dentro da avaliação do ciclo de vida. Por isso, ele pode sofrer alterações no decorrer do estudo, variando de acordo com as necessidades e barreiras encontradas pelo pesquisador durante a pesquisa e as análises.

- *Análise do inventário*

Para realização desta etapa é necessário um levantamento da quantidade de todas as entradas e saídas ao longo do ciclo de vida de um produto, (matéria prima, insumos, energia, água, emissão de gases do efeito estufa, seja para o solo, ar ou água, bem como os produtos e coprodutos gerados), sendo essa uma das etapas mais importantes do ACV. Sendo assim, deve-se assegurar a qualidade dos seus dados levantados (Barros, 2015).

Segundo Braga (2018), os dados dentro de cada fronteira devem ser classificados da seguinte forma:

- ✓ Entrada de energia, matéria prima, insumos auxiliares e outros insumos físicos;
- ✓ Saídas de Produtos, coprodutos e resíduos;
- ✓ Saídas de emissão de gases para atmosfera (Solo, água e ar);
- ✓ Outros aspectos ambientais, caso necessário.

Ao realizar a coleta de dados primários e secundários, é necessário adotar um modelo para realização dos cálculos de estimativa de emissões para o solo, água e ar. Deste modo, é possível ver a confiabilidade dos seus dados. Por fim, o pesquisador deve avaliar cada resultado dentro de cada caso de forma separada, levando em consideração a unidade funcional e fluxo de referência do estudo. Caso ocorra o caso de produtos diferentes serem gerados por meio do mesmo processo, se faz necessária a distribuição da carga ambiental, chamada de alocação de fluxos (ISO, 2006a).

- *Avaliação do impacto (AICV)*

Esta etapa é geralmente dividida em duas partes, sendo elas obrigatórias e não obrigatórias. Dentro das fases que são realizadas obrigatoriamente, temos: categorias de impacto (por exemplo, mudança climática - variando de acordo com o objetivo e escopo), classificação (que estabelece a relação entre os dados do inventário e as categorias de impacto) e a caracterização (a aplicação de modelos que expressam a causa e o efeito de cada categoria analisada) (ISO, 2006a).

Essa caracterização irá variar de acordo com a metodologia que se decidiu adotar, podendo ir até a etapa intermediária, denominada transporte e acumulação das substâncias, conhecida como *midpoint*. Em casos de estudos mais aprofundados, a caracterização pode alcançar os métodos finais, chamados de *endpoint*, revelando os problemas causados por esses processos e/ou produtos na saúde humana, nos recursos naturais e na qualidade do ecossistema (Ugaya, 2013).

Dentre os elementos não obrigatórios, incluem-se a normalização, onde os resultados do estudo são comparados às médias de dados para um país e/ou região, com o intuito de verificar inconsistências; o agrupamento desses dados, no qual as categorias são agregadas em grupos com níveis de impacto (baixo, médio ou alto), sendo o ranking montado de acordo

com as escolhas do autor. Outro elemento é a ponderação, que atribui uma nota para cada categoria de acordo com o impacto. Por fim, se tem a análise da qualidade de dados, que possui o objetivo de verificar as diferenças significativas do estudo e observar se o inventário condiz com os resultados. Caso necessário, é importante revisar o inventário (ISO, 2006a).

No final de todas essas etapas se tem o perfil ambiental do produto e/ou processo em questão, sendo este normalizado de acordo com as fronteiras do trabalho, sempre deixando esses dados em unidades únicas, possibilitando assim uma agregação entre os resultados obtidos (Sampaio, 2019).

- *Interpretação dos resultados*

A fase de interpretação é de fundamental importância, pois é onde se dará o “*feedback*” em função dos resultados alcançados, permitindo observar se esses resultados correspondem aos objetivos almejados. Nesse contexto, é crucial evidenciar as limitações, especialmente aquelas que podem tornar os objetivos inalcançáveis, e indicar recomendações. A fase de interpretação pode ser dividida em três partes: 1 - identificar as questões ambientais relevantes com base nos resultados obtidos, 2 - avaliar a integridade, sensibilidade e a consistência do estudo e 3 – conclusões e limitações do estudo, além de possíveis recomendações (ISO, 2006b).

- ✓ Identificação - identificação e estruturação da informação; critérios de alocação; modelos e fatores de caracterização e indicadores de categoria; identificação das escolhas de valor usadas no estudo e o papel e as responsabilidades das diferentes partes interessadas; e a significância de categorias de dados, categorias de impacto e processos elementares incluídos no processo (Braga, 2018);
- ✓ Avaliação de integridade – requer uma apresentação e análise compreensível dos dados, visando tornar compreensíveis as partes interessadas. Nesse contexto, o pesquisador aumenta a confiabilidade dos dados em questão (Sampaio, 2019);
- ✓ Conclusões – após colher e avaliar todos os dados, é necessário apresentar de forma resumida todas as informações mais relevantes do trabalho (Campos, 2012).

Como citado, os resultados vão ser de acordo com o objetivo e escopo de cada trabalho. Ao final de todas as etapas do ciclo de vida, é possível obter resultados como a pegada

hídrica e pegada de carbono, que são de extrema importância para a caracterização da sustentabilidade dos produtos avaliados.

4.4 Pegadas de carbono e hídrica como indicador de sustentabilidade

A sustentabilidade é geralmente dividida em três categorias: econômica, social e ambiental, sendo essa última relacionada ao equilíbrio e os meios de produção. Com o aumento da população, esses meios de produção têm crescido bastante, assim como as indústrias, com grandes operações e consumos de água, energia e combustíveis fósseis. Isso tem ocasionado no aumento da liberação de GEE e, com isso, muitos países têm buscado quantificar e reduzir essa problemática (Souza Junior; Caselli; Soares, 2020). Segundo Boff (2016), sustentabilidade é toda e qualquer intervenção realizada com o objetivo de conservar os recursos do planeta, sejam eles, energéticos, formacionais, físicos ou químicos, desde que sejam fundamentais para manutenção da vida na terra. Em outras palavras, busca-se satisfazer as carências dos seres humanos, mas sem prejudicar a disponibilidade deles no futuro.

Dentro do contexto dos recursos naturais limitados da Terra e da capacidade de assimilação, a atual pegada ambiental da humanidade não é sustentável (Hoekstra; Wiedmann, 2014). As pegadas ecológica, hídrica e de carbono demonstram que a humanidade está vivendo, atualmente, além da capacidade da Terra (Galli *et al.*, 2012).

4.4.1 Pegada de carbono

A pegada de carbono foi padronizada segundo a ISO 14067 e pode ser estimada considerando o ciclo de vida do produto. Essa abordagem representa uma das formas de quantificar as emissões de gases de efeito estufa e avaliar seus impactos ambientais. Essa quantificação pode abranger diferentes fases, como fabricação, produção agrícola, transporte, armazenamento de produtos ou descarte de resíduos, proporcionando uma visão abrangente da quantidade total liberada de CO₂-eq.

A norma ISO 14067 apresenta os princípios, requisitos e diretrizes que devem ser seguidas durante um estudo de pegada de carbono, fundamentando-se nas normas ISO 14040 e ISO 14044, que padronizam os estudos de avaliação do ciclo de vida de processo e produto ou serviço.

O termo “pegada de carbono”, como citado anteriormente, refere-se ao impacto negativo gerado pela emissão de gases. Para calcular essa pegada, é necessário somar todas essas saídas, especialmente na categoria de mudanças climáticas, onde os seus valores são sempre expressos em CO₂ equivalente. Isso ocorre porque o dióxido de carbono, principal gás de efeito estufa, tem potencial de aquecimento global (PAG) 1, se tornando assim a referência para os demais gases, como o metano e o óxido nitroso (ISO, 2013; IPCC, 2007).

Alguns pontos devem ser observados e seguidos durante o estudo. Estes incluem a escolha de uma unidade funcional, as fronteiras do sistema, quais os mecanismos de avaliação e a contribuição que cada processo do sistema terá nessa categoria de impacto. Caso seja considerado necessário pelo pesquisador, uma análise de sensibilidade das emissões de gases do efeito estufa é importante. Vale destacar que a utilização da ISO 14067 também abrange a contabilização da absorção de carbono, mudança do uso da terra, mudança de carbono no solo, características essas que não são levadas em consideração em outras metodologias (ISO, 2013; Fenner *et al.*, 2018).

Segundo Amorim (2013), essa avaliação de impactos dá uma visão geral dos pontos críticos dentro do ciclo de um produto, podendo ser usada como indicador da sustentabilidade daquele ambiente. Além disso, os resultados podem mostrar onde são os pontos críticos da cadeia produtiva e onde melhorar.

4.4.2 Estudos de pegada de carbono

No Equador, foi realizado um trabalho por Roibás, Elbehri e Hospido (2016), onde foi verificada a pegada de carbono na cultura da banana em duas fazendas, com resultado de 1,25 t CO₂-eq/t de banana. Segundo os pesquisadores, os procedimentos que mais geraram impactos foram a plantação, consumo e transporte marítimo. Quando os pesquisadores avaliaram as fazendas separadamente (convencional e orgânica), notou-se que a convencional (0,31 t CO₂-eq/t de banana) contribuiu de forma mais significativa na emissão dos GEE do que a orgânica (0,25 t CO₂-eq/t de banana). Segundo os autores, isso ocorreu graças aos adubos orgânicos, que reduziram o uso de fertilizantes minerais, gerando conseqüentemente uma emissão de nitrogênio em menor quantidade.

Outro trabalho sobre a cultura da banana no sudeste brasileiro é o de Coltro e Karaski (2019), onde se trabalha com a variedade Prata e Cavendish. Os autores relatam que a banana prata teve impacto de 0,21 kg CO₂-eq/kg, enquanto a Cavendish apresentou um impacto

de 23 kg CO₂-eq/kg, com maior contribuição dos impactos na produção de campo, fertilizantes, embalagens e o consumo de energia.

Hernandes *et al.* (2022) trabalhou com a pegada de carbono da cultura do cacau no Brasil, especificamente no Estado do Pará. Os autores relataram impacto de 10,46 kg CO₂-eq / kg de Cacau, porém também perceberam que o descarte das cascas poderia ser alterado para uso em compostagem. Sendo assim, este material poderia ser utilizado futuramente como adubo, fazendo com que a emissão fosse contida em 2,59 kg CO₂-eq / kg de Cacau, resultando na redução de aproximadamente 75% da pegada de carbono. Esse benefício ocorre porque a utilização de uma compostagem reduz a liberação de metano e diminui a aplicação de insumos como fertilizantes.

Em um estudo no Vale do São Francisco com a cultura do melão, abordando dois sistemas de cultivo (convencional e conservacionista), Santos *et al.* (2018) avaliou a emissão de gases para o solo, ar e água. Os resultados indicaram que o sistema conservacionista reduziu os impactos ambientais em todas as categorias. Observando apenas as mudanças climáticas, a produção convencional emitiu cerca de 754,11 kg CO₂ eq por t de melão, enquanto a produção conservacionista com leguminosas registrou 515,09 kg CO₂ eq por t melão.

Ao pesquisar a cultura da manga no semiárido brasileiro, Carneiro *et al.* (2019) notou que a pegada de carbono variava em torno de 0,18 kg de CO₂ eq/kg de manga embalada. As maiores contribuições dos impactos originavam-se da produção de fertilizantes, da energia demandada no bombeamento de água para o sistema de irrigação, da produção de campo e do consumo de combustível em operações agrícolas.

Outro trabalho com frutas tropicais no semiárido brasileiro é o de Sampaio *et al.* (2021). Nele, os autores trabalharam com o coco, cultura de grande importância econômica, em quatro estados da região Nordeste: Alagoas, Bahia, Ceará e Sergipe. Nessas regiões, a pegada de carbono variou entre 0,116-0,363 kg de CO₂ eq/kg de coco.

Tabela 1 - Quadro resumo dos trabalhos com pegada de carbono citados neste tópico (4.4.2)

Estudo	Citação	Fronteira	UF	Metodologia de avaliação
Banana no Equador	Roibás, Elbehri, Hospido (2016)	Berço ao túmulo	1 t	PAS 2050
Banana (Prata e Cavendish) no Brasil, Minas Gerais e São Paulo	Coltro & Karaski (2019)	Berço ao portão	1 ha e 1 kg	CML 2001
Cacau no Brasil, Pará	Hernandes <i>et al.</i> (2022)	Colheita, fermentação e secagem	1 kg	GHG... (2016)
Melão no Brasil	Santos <i>et al.</i> (2018)	Berço ao portão	1 kg	ReCiPE: 2008
Manga no Brasil	Carneiro <i>et al.</i> (2019)	Berço ao portão	1 kg	IPCC, 2007
Coco no Brasil, Nordeste	Sampaio <i>et al.</i> (2021)	Berço ao portão	1 t	IPCC, 2007

UF: Unidade funcional; t: tonelada; kg: quilograma.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Pegada hídrica

A pegada hídrica é capaz de monitorar o impacto humano sobre o meio ambiente, e avaliar a sustentabilidade do uso da água. No que diz respeito à pegada de escassez hídrica, a sustentabilidade dessa pegada depende de fatores climáticos e hídricos de uma região (Silva *et al.*, 2013). Além disso, está relacionada ao tamanho e às características de espaço temporais da pegada da humanidade em relação à capacidade de carga da Terra e/ou Região (Hoekstra; Wiedmann, 2014).

Uma localidade com grande fluxo de água tem uma pegada hídrica diferente de um local que sofre constantemente com a escassez hídrica. O uso de água doce na localidade com maior fluxo terá uma maior sustentabilidade e menor impacto local em comparação a uma zona semiárida. O aumento inevitável da demanda por água para cultivar alimentos, abastecer indústrias e sustentar populações urbanas e rurais levou a uma crescente escassez de água doce em muitas partes do mundo (Hoekstra *et al.*, 2012). Com o aumento da escassez de água, há um interesse crescente em melhorar a produtividade da água da colheita, com o objetivo de atender ao crescimento da demanda global de alimentos com recursos limitados de água doce (Mekonnen; Hoekstra, 2014).

Geralmente, na agricultura a premissa é maximizar a produtividade da terra (ton ha⁻¹), visando beneficiar a problemática do aproveitamento máximo do uso da terra e a redução da

abertura de novas áreas para produção agrícola. No entanto, esse pensamento torna-se insustentável quando o enfoque é o uso da água doce para irrigação. Em situações em que a escassez de água é maior do que a escassez de terra, torna-se crucial maximizar a produtividade da água (Hoekstra; Chapagain; Aladaya, 2011).

Pela primeira vez, três tipos de pegadas hídricas, cada uma com seus respectivos nomes, foram apresentados em 2008 por Hoekstra e Chapagain (Hoekstra, 2017). Antes disso, essas pegadas eram agrupadas como pegada hídrica azul, dado que o foco inicial era apenas no uso consuntivo da água. O primeiro artigo a avaliar separadamente a pegada hídrica verde e azul de uma cultura foi elaborado por Chapagain *et al.* (2006). O cálculo da pegada hídrica total leva em consideração três tipos: pegada hídrica azul (PH azul), pegada hídrica verde (PH verde) e pegada hídrica cinza (PH cinza) (Almeida, 2019; Manke *et al.*, 2021).

- *Pegada hídrica azul:*

A pegada hídrica azul está constituída pelas águas superficiais (rios, córregos, reservatórios artificiais, lagos e geleiras) e subterrâneas (aquíferos), que são consumidas ou incorporadas no processo de produção de um bem (Hoekstra *et al.*, 2011). Chapagain e Tickner (2012) destacam ainda que, a PH azul mensura a quantidade de água disponível em certo período que é consumida, ou seja, que não retorna imediatamente para seu ponto de captação.

Esse tipo de pegada inclui também a água azul captada de uma bacia hidrográfica que é lançada para outra bacia ou no mar, ou seja, água azul que não retorna para a bacia da qual foi retirada (Hoekstra *et al.*, 2011). As perdas ocorrem quando a água evapora, retorna para outra área de captação ou para o mar ou é incorporada a um produto (Naranjo-Merino; Ortíz-Rodríguez; Villamizar, 2017).

O cálculo da PH azul leva em consideração a soma de três fatores, que são a água azul evaporada, mais a água azul incorporada e a perda no fluxo de retorno. Em sua avaliação as diferentes fontes de água são distinguidas, como a divisão entre água superficial, água subterrânea renovável e água subterrânea fóssil.

- *Pegada hídrica verde:*

Pegada hídrica verde é o indicador do volume de água verde caracterizada pela precipitação no continente que não escoar ou repõe os aquíferos, mas é armazenada temporariamente sobre o solo ou vegetação, sendo consumida durante o processo de produção

de bens e serviços (Hoekstra *et al.*, 2011). Esse tipo de pegada representa a água proveniente da chuva, que não é retirada nem armazenada pelos mananciais, mas sim armazenada temporariamente na superfície no solo úmido ou vegetação (Hoekstra, 2009).

A água verde é importante para o desenvolvimento das culturas. Na ausência de água verde para manutenção da agricultura, a água azul passa a ser utilizada juntamente à agricultura irrigada. O cálculo da pegada hídrica verde é particularmente relevante para produtos baseados em culturas agrícolas, devido à evapotranspiração (Silva *et al.*, 2013).

- *Pegada hídrica cinza:*

A pegada hídrica cinza é um indicador da poluição da água, definida como o volume de água necessária para absorver os poluentes gerados durante o processo de produção, de tal forma que a água continue dentro dos padrões naturais e ambientais de qualidade, ou seja, de forma que os poluentes se tornem inofensivos (Hoekstra *et al.*, 2011).

Ela é calculada dividindo-se a carga de poluentes pela diferença entre a máxima concentração aceitável para aquele poluente específico e sua concentração natural naquele corpo de água que assimila o poluente (Maracajá *et al.*, 2013).

4.4.5 Pegada de Escassez Hídrica segundo ISO 14046

A Pegada Hídrica segundo a ISO 14046 (ISO, 2014) é definida pela quantificação dos impactos ambientais relacionados ao uso da água. Além de contabilizar o volume de água, é possível escolher algumas categorias de impacto. Exemplos de categorias que podem ser analisadas incluem eutrofização, ecotoxicidade e escassez hídrica, dentre outras. Com base nisso, é possível verificar o perfil da pegada hídrica e sua cadeia de causa e efeito do uso da água (Kounina *et al.*, 2013). Quando o estudo é realizado visando apenas a quantidade de água, esse trata de uma avaliação de pegada de escassez hídrica (ISO, 2016).

Segundo a ISO 14046, é necessário seguir algumas etapas para atingir bons resultados. Fundamentada nas ISO 14040 e 14044, que tratam da avaliação do ciclo de vida, essa categoria de impacto requer quatro etapas, conforme ilustrado na figura 2 (tópico 4.3.2). É necessário determinar a fronteira do sistema, unidade funcional, fluxo de referência, bem como estabelecer uma cobertura temporal e geográfica. Isso demanda uma coleta de dados minuciosa e a adoção de procedimentos para quantificar as entradas e saídas, montando assim um

inventário completo dos insumos e informações sobre o volume de água captado, de onde essa água veio e para qual uso foi destinada (ISO, 2014).

Visando contabilizar essa pegada de escassez hídrica, foi criada a metodologia AWARE, que indica a quantidade de água que ficará em determinada bacia após atender as necessidades humanas e o ecossistema aquático. Esse método tem como premissa que quanto maior a quantidade de água retirada de uma determinada área geográfica, maior é a probabilidade de outro usuário ser privado deste recurso, ou seja, maior chance de ocorrer escassez hídrica (Boulay *et al.*, 2018).

Primeiro calcula-se a disponibilidade menos a demanda (ecossistema humano e aquático). Logo depois, a metodologia permite realizar a normalização dos cálculos através da disponibilidade pelo fator de caracterização (FC). Esse fator representa o potencial de privação de água em m^3 equivalente, com um valor mundial médio de $0,0136 m^3 / m^2$ mês. Posteriormente, esse valor é invertido, sendo limitado a um intervalo de 0,1 à 100, onde por exemplo o 1 representa a média mundial e o valor 10 representa uma região com 10 vezes menos água disponível que o valor mundial (Boulay *et al.*, 2018).

Esses fatores de caracterização mundial (mensal e anual), estimados e usados nos cálculos acabam mascarando um pouco a privação dos recursos hídricos em determinadas regiões, tornando necessário o cálculo desse FC em cada região do globo, para que assim os resultados de pegada de escassez hídrica fiquem mais representativos. No caso do Brasil, essa regionalização foi realizada por Andrade *et al.* (2019). O estudo utilizou dados da base da Agência Nacional de Água (ANA) para regionalizar os fatores de caracterização de escassez hídrica no modelo AWARE em todo o território nacional.

4.4.6 Estudos de Pegada de Escassez hídrica na agricultura

Alguns trabalhos buscam verificar a pegada de escassez hídrica de um produto e/ou processo. A exemplo disto, temos Sampaio *et al.* (2018), que trabalhou com água de coco verde nas principais regiões produtoras do Nordeste. Ao fazer uma avaliação do ciclo de vida do mesmo e verificar a disponibilidade de água em relação à demanda, foi percebido que no Ceará essa produção tinha um impacto de 2,34 a $17,77 m^3$ eq/L, em Sergipe 1,82 a $2,93 m^3$ eq/L e na Bahia 0,96 a $2,75 m^3$ eq/L, sendo a etapa de irrigação responsável pelo maior impacto. Deste modo, foi possível notar que o Estado do Ceará precisa melhorar sua sustentabilidade na produção de água de coco, em especial na eficiência dos sistemas de irrigação.

Outro resultado importante foi o encontrado por Monte *et al.* (2022) ao trabalhar com a cultura do cajueiro e avaliar o perfil da pegada hídrica da castanha em processamento nas minifábricas no estado do Ceará. No estudo, foi percebida uma variação da pegada de escassez hídrica entre 5,05 e 6,27 m³ nas minifábricas de alto e médio rendimento e médio, respectivamente. Segundo o autor, é perceptível que a maior contribuição do impacto vem da utilização de embalagens do tipo polietileno. Ao elaborar os cenários, os autores concluíram que é possível reduzir em 45,7% - 49,1% esses impactos caso mude a embalagem para vidro.

Vázquez-Rowe *et al.* (2017), ao verificar os possíveis impactos gerados aos recursos hídricos peruanos trazidos pelo cultivo de uva, constatou um impacto de 3,93m³/m³. De acordo com os autores, 10,3% de tal impacto é atribuído ao sistema de irrigação. Dado que, em vista que em épocas mais quentes do ano, especialmente no verão, é necessário elevar a lâmina de água usada nas produções para assim compensar a água evaporada, conclui-se que é necessário melhorar a eficiência do uso da água pelo sistema de irrigação. Isso se torna crucial para melhorar a sustentabilidade da produção no Peru.

Carneiro *et al.* (2019), quando trabalhou com a pegada de escassez hídrica da cultura da manga no semiárido brasileiro, percebeu que maior parte da demanda hídrica durante os processos produtivos se originava da irrigação. Em especial nas fases de estabelecimento da cultura, onde era necessária uma disponibilidade de 22.926 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, somente a produção agrícola demandou cerca de 98% do total dos recursos hídricos usados. Segundo o autor, um possível reuso da água poderia amenizar essa problemática, mesmo que em pequena proporção.

Ferrero *et al.* (2022) realizou uma pesquisa voltada para pegada hídrica do cultivo de limão na Argentina. Após todos os cálculos e estimativas, o autor apontou uma pegada de escassez hídrica de 102 m³ eq t⁻¹. Segundo o autor, este valor não é tão elevado, porém a região deve tomar cuidados em relação a pegada de escassez hídrica, visto que o local já sofre com a falta de água em alguns períodos do ano. Por este motivo, se faz necessária uma melhor regulação da quantidade de água aplicada pela irrigação nos períodos de seca.

Tabela 2 - Quadro resumo dos trabalhos com pegada de escassez hídrica citados neste tópico (4.4.6)

Estudo	Citação	Fronteira	UF	Metodologia de avaliação
Coco no Brasil, Nordeste**	Sampaio <i>et al.</i> (2018)	Berço ao portão	1 L	AWARE
Castanha do caju no Brasil, Ceará**	Monte <i>et al.</i> (2022)	Berço ao portão	1 kg	AWARE
Uva no Peru*	Vázquez-Rowe <i>et al.</i> (2017)	Berço ao portão	1 kg	AWARE
Manga no Brasil**	Carneiro <i>et al.</i> (2019)	Berço ao portão	1 kg	AWARE
Limão na Argentina*	Ferrero <i>et al.</i> (2022)	Berço ao portão	1 t	AWARE

** : Dados de necessidade hídrica obtidos com entrevistas no campo; * : Dados de necessidade hídrica obtidos por meio de cálculos (Situação ideal); UF: Unidade funcional; L: Litros; t: tonelada; kg: quilograma.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.7 Previsões futuras e benefícios para pegada de escassez hídrica

As mudanças climáticas podem alterar de forma significativa o comportamento de variáveis como temperatura e precipitação, levando a diversos problemas ambientais e colocando em risco a segurança alimentar e a economia dos países. Essa questão tem gerado preocupação nos cientistas do mundo todo, levando a uma reflexão constante sobre a situação climática futura do planeta. Tendo esse ponto em vista, diversos modelos de circulação global foram elaborados com a intenção de estimar as possíveis condições climáticas (Sha; Wang, 2019; Stevens *et al.*, 2013).

Os modelos têm surgido com objetivo de realizar estimativas cada vez mais eficazes na simulação dos cenários climáticos futuros. Esses modelos podem representar uma solução para a elaboração de políticas voltadas a reduzir os possíveis impactos que as mudanças climáticas podem causar. O 5º relatório (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) traz uma metodologia conhecida como Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado Fase 5 (CMIP5), que é baseado no modelo de circulação global, sendo um dos mais usados para realização dessas estimativas (Chen *et al.*, 2020; Gondim *et al.*, 2018).

O Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado Fase 5 (CMIP5) é composto por 40 modelos diferentes, podendo ser escolhido o que mais se adequa à situação do estudo. Além disso, é possível realizar essa estimativa com base em diferentes cenários em que o mundo

pode se encontrar no futuro, denominados Vias de Concentração Representativas (RCP). Essas perspectivas são classificadas como RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. No geral, esses cenários são baseados nas emissões de gases e radiação até final deste século (2100). O primeiro, RCP2.6, representa baixas emissões e radiação em torno de $2,6 \text{ w m}^{-2}$; os RCP4.5 e RCP6.0 indicam média emissão e a radiação de $4,5$ e $6,0 \text{ w m}^{-2}$ respectivamente, enquanto o RCP8.5 representa a alta emissão com $8,5 \text{ w m}^{-2}$ (Chen *et al.*, 2020; Xue-Zheng *et al.*, 2021; Wenyu; Kashagan; Lanhai, 2022).

Segundo o IPCC (2021) e Gondim *et al.* (2018), a tendência é que a temperatura do planeta aumente no decorrer dos anos. Devido às mudanças climáticas, conseqüentemente teremos um aumento da evapotranspiração de referência e na demanda hídrica do setor agropecuário, mostrando assim a importância de estudos voltados para essa temática e os impactos na pegada de escassez hídrica futura das culturas agrícolas, para que assim, seja possível a elaboração de plano de ação.

Diversos trabalhos em diferentes regiões do globo e com diversas culturas já têm apresentado uma tendência para esse aumento da necessidade hídrica. Song *et al.* (2019), ao trabalhar no Noroeste da China, concluiu que a demanda de água para irrigação do algodão, milho e trigo deve aumentar até 2100. Javadinejad *et al.* (2019), ao estudar as condições climáticas do Irã, concluiu que o aumento da temperatura futura irá ocasionar em uma elevação na demanda por água na agricultura, podendo ter grande impacto nesse setor. Dias *et al.* (2021), ao projetar como estará a produtividade da cana-de-açúcar no Brasil de 2040-2069 ao final do século (2070-2099), apontou um possível aumento da demanda hídrica que, se não houver atenção, pode resultar em déficit hídrico da cultura.

4.5 Fruticultura

A fruticultura apresenta elevada importância devido a sua grande aceitação no mercado global. Ultimamente, tem crescido de forma expressiva a procura por produtos vegetais, e as frutas, além de se enquadrarem no perfil alimentar de maior parte da população, ainda apresentam benefícios à saúde humana. Segundo o Banco de Dados Estatísticos Corporativos da Organização para Agricultura e Alimentação (FAO, 2020a) a área colhida em 2018 foi de 5.028.349 ha e a produção total foi de 36.967.877 toneladas ano⁻¹. Quando comparado com o ano de 2020, que teve 5.107.033 ha e 38.125.680 toneladas ano⁻¹, pode-se notar a evolução na produção de frutas (1,56% na área plantada e 3,13% em toneladas do produto).

Dentre os continentes produtores de frutas frescas, temos a Ásia, com representação de 70,3%, o que corresponde a cerca de 19,6 milhões de toneladas ano⁻¹. Logo depois, vem a África com 16,6%, o que equivale a 4,6 milhões de toneladas ano⁻¹. Em terceiro lugar, aparece a América com 8,2%, contribuindo com 2,3 milhões de toneladas ano⁻¹. Em relação às frutas tropicais, se tem a Ásia em primeiro lugar com 86,2% (16,4 milhões de toneladas ano⁻¹) e, em segundo, a América, que tem grande potencial nessas espécies tropicais, com 9,5% (1,8 milhões de toneladas ano⁻¹) (FAO, 2020a).

No Brasil essa produção tem ganhado ainda mais espaço ainda. No ano de 2018, a produção foi de 604.271 toneladas ano⁻¹. Passando para 2020, essa produção cresceu para 690.364 toneladas ano⁻¹, tendo um aumento de 14,3% na faixa de dois anos (FAO, 2020a). A produção nacional varia muito de acordo com o território. Esse fator acaba tornando o Brasil um país com grande comércio e diversidade de frutas. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária unidade de mandioca e fruticultura (2019), os principais destaques são: clima temperado - maçã, uva, pêssigo, caqui, figo, pera e marmelo; clima tropical - banana, abacaxi, coco-da baía, melancia, mamão, manga, maracujá, melão, goiaba e abacate; e clima subtropical - laranja, limão e tangerina.

Avaliando a produção nacional, o Brasil tem apresentado uma hegemonia no mercado internacional. Ao observar de forma separada, é possível notar que a contribuição de produção varia bastante. Cada macrorregião colabora com uma porcentagem da produção total nacional, sendo: Centro-Oeste (1,6%), Norte (8,76%) e Sul (12,1%). No país, duas dessas regiões possuem maior destaque e apresentam maior variedade de produção, sendo elas: Sudeste (55,78%) e Nordeste (21,77%) (IBGE, 2020).

A região Nordeste acompanhou o crescimento do Brasil na produção de frutíferas. Em 2018, a área colhida da região totalizou 565.483 ha e uma produção em toneladas de 7.339.208, representando 20,42% da produção nacional. Ao comparar esses dados com o ano de 2020, é possível observar um aumento da área colhida, que passou para 566.984 ha (cerca de mil quinhentos e um hectares a mais). Quanto à produção, ela cresceu para 7.884.133 toneladas, gerando um aumento de 7,43% (IBGE, 2020).

Dentro deste território, há grandes potências na produção de frutas. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), um dos principais polos públicos de produção de fruticultura está localizado no Estado da Bahia (36,67% da produção do Nordeste) com 2.891.550 toneladas. Em seguida, temos Pernambuco, respondendo por 23,59% da produção do Nordeste, totalizando o equivalente a 1.859.869 toneladas. Logo depois, temos o Ceará, se destacando com 16,49% da produção do Nordeste, chegando a 1.300.737 toneladas.

Segundo Ferreira *et al.* (2014), a fruticultura do Estado do Ceará é um dos setores que mais cresceram e que exibem maior taxa de sucesso, trazendo elevado impulso econômico para a região nos últimos anos. O território destina maior parte da sua produção para o consumo interno e doméstico, mas ainda assim, tem elevada taxa de exportação dessas mercadorias. As principais culturas irrigadas neste Estado semiárido são: banana, coco, goiaba, laranja, limão, manga, mamão, maracujá, uva, melão e melancia (Souza *et al.*, 2018; Ferreira; Vieira Filho, 2021).

Algumas microrregiões são de extrema relevância dentro do estado, com grandes áreas e elevadas produções. O território do Baixo Jaguaribe, por exemplo, tem 6.990 hectares colhidos, representando 7,4% das áreas do estado. A produção dessa microrregião é a segunda maior, com 12,97% do total, chegando a 168.782 toneladas. Desse total, temos uma grande representação na cultura da banana, pois a produção dessa fruta chega a 94.367 toneladas (56% do total do estado). Em quinto lugar vem a goiaba, com produção equivalente a cerca de 9.949 toneladas (6% do total do estado) (IBGE, 2020).

4.6 A cultura da banana

A bananeira, cientificamente conhecida como *Musa* spp., é classificada na botânica como monocotiledônea e pertence à família Musaceae, subfamília musoideae e gênero *Musa*. Seu centro de origem é a região Sudeste do continente da Ásia, embora alguns autores relatem a possibilidade de também ser originária das ilhas do Pacífico e da África (Rodrigues, 2020).

4.6.1 Aspectos gerais

A bananeira apresenta hábito de crescimento herbáceo com raiz, caule, folhas, flores, frutos e sementes. Essa planta possui caule geralmente macio ou maleável, sendo este curto e do tipo subterrâneo, chamado de caule do tipo rizoma. As raízes dessa espécie crescem de forma horizontal (20-30 cm) e tem uma profundidade de 50-70 cm. É característico das bananeiras possuírem um pseudocaule composto por uma bainha de folhas. Ao final desse pseudocaule, se tem folhas largas e compridas com nervura central (Ferreira *et al.*, 2016).

O ciclo produtivo da bananeira segue um modelo diferente das demais espécies. É constituído por touceiras formadas a partir de brotos e seu pomar vai “caminhando” ao passar das gerações de plantio de forma sucessiva. O manejo adotado no sistema produtivo da banana

é designado de “mãe-filho-neto”, sempre deixando três plantas por touceira, mas tomando cuidado com a densidade de plantio para que não prejudique a produtividade (Ferreira *et al.*, 2016).

As bananeiras possuem inflorescência de coloração roxa-avermelhada, que são emitidas no centro da copa. Os frutos se agrupam em um formato conhecido como “penca”, onde a quantidade de frutos vai variar de acordo com a espécie e condições na qual a planta está inserida. Assim como alguns frutos, a banana tem seu início marcado pela cor verde e, com o passar do tempo (processo de maturação), torna-se amarela (Oliveira, 2018).

Existem hoje diversas variedades de banana no mundo todo, segundo Asmar *et al.* (2013), totalizando mais de 700. Essas variedades podem ser escolhidas de acordo com a sua necessidade e características edafoclimáticas. No Brasil, essa cultura também é bastante difundida. Levando em consideração o consumo e preferência pelos consumidores, temos como principais variedades: a Prata, Prata-anã e Pacovan, correspondentes a 60% da produção nacional. Logo em seguida, temos as variedades Maçã, Mysore, Nanica, Nanicão, Grande Naine e Willians (Sousa, 2019).

4.6.2 Importância econômica

Dados apresentados pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (2022) mostram que, em 2021, a área total colhida de bananas em todo o mundo foi de 5.336.862 hectares, com produção total de 124.978.578,48 toneladas ano⁻¹. Em comparação, em 2020, a área colhida foi de 5.252.483 hectares, com produção de 121.397.847,51 toneladas ano⁻¹. Esses números indicam aumentos relevantes na bananicultura de um ano para o outro, representando cerca de 1,6% para a área total e 2,95% para a produção (FAO, 2022). Essa produção mundial deve aumentar mais de 1% entre 2019-2028. Estudos mostram que esse setor frutífero vai crescer rapidamente com o passar dos anos, merecendo maior atenção dos pesquisadores e políticos, principalmente em relação às mudanças climáticas, pois isso pode prejudicar a expansão (FAO, 2020b).

No ano de 2021, os preços foram bem variados, com alguns países se destacando na qualidade e, conseqüentemente, no preço dos produtos. Entre eles, temos: Iran, com 5204,7 USD por tonelada; Guyana, com 1537,2 USD por tonelada; Austrália, com 1427,3 USD por tonelada; Cabo Verde, com 1260 USD por tonelada; e Timor-Leste, com 1106,7 USD por

tonelada, entre outras regiões. Esses números evidenciam, especialmente, que os países de clima tropical têm grande potencial econômico para a banana (FAO, 2022).

O continente da América do Sul tem contribuído de forma positiva para esses resultados. Em 2020, o total de área colhida foi de 959.194 hectares e a produção foi de 18.509.850,32 toneladas ano⁻¹. Neste ano em questão, o Brasil teve um total de 455.004 hectares e 6.637.308 toneladas ano⁻¹ de produção (FAO, 2022).

Em 2021, é possível observar um aumento significativo nesses dados. O continente da América do Sul aumentou cerca de 1% na área colhida e 4,93% na produção, ficando com 967.913 hectares e 19.421.823,66 toneladas ano⁻¹. Quando se reduz essa fronteira e pensamos apenas no Brasil, a área teve uma queda de 0,39%, passando a ser de 453.273 hectares, representando 46,83% da área de produção da América do Sul no ano. Mas isso não causou danos à produção total, que aumentou em 2,62% e chegou a 6.811.374 toneladas ano⁻¹, simbolizando assim, 35,1% da produção total do continente no ano de 2021 (FAO, 2022). O preço geralmente varia de acordo com a estação do ano e da oferta/demanda disponível no mercado. No ano de 2020, o valor da tonelada de banana estava custando uma média de 252,5 USD (FAO, 2020c).

O Nordeste Brasileiro tem elevada importância para essa cultura dentro do país, com maior área de produção e área colhida, totalizando 181.128 hectares e 180.749 hectares respectivamente. Em relação à produção, essa região tem o segundo melhor resultado, com 2.287.762 toneladas. O Estado do Ceará exerce uma grande influência nesse cenário, contribuindo com cerca de 431.017 toneladas, o que representa 19% da produção do Nordeste, cooperando de maneira expressiva para esses resultados (IBGE, 2020).

Ao publicar dados de exportação para a cultura da banana em 2022, a Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados (ABRAFRUTAS, 2022b) mostrou que o ganho econômico do país foi de US\$ 37.328.547, com peso exportado de 84.365.088 quilograma. Ao considerar o dólar americano de R\$ 4,99, o valor total da exportação seria de R\$ 420.981.789. Torna-se evidente como essa produção pode gerar significativos ganhos econômicos. Ao compararmos com 2021, onde o valor era de US\$ 37.113.051, nota-se uma variação de 1% no valor bruto arrecadado da produção.

Quando se trata de exportação e ganho econômico, o Estado do Ceará é uma das referências para o país, destacando-se como um dos maiores exportadores de banana. No ano de 2021, o valor ganho foi de 37 milhões de dólar americano, com a exportação de cerca de 108,7 mil toneladas. Ao converter isso para o real brasileiro, considerando o dólar a R\$ 4,73,

esse valor é de R\$ 175.010.000. Esses números destacam a relevância econômica do estado no mercado internacional (ABRAFRUTAS, 2022a).

4.6.3 Condições edafoclimáticas

Com o objetivo de alcançar a máxima produtividade nos pomares de bananeira, é crucial proporcionar condições ideais para o seu desenvolvimento. Segundo Manica (1997), a temperatura indicada para se ter bons desempenhos varia de 21°C a 27°C. No entanto, a cultura apresenta valores de máxima e mínima para as raízes, inflorescência e frutos se desenvolverem sem anomalias fisiológicas, sendo essas faixas de 16 e 37°C. Temperaturas abaixo disso podem prolongar o ciclo produtivo em casos extremos até paralisar, enquanto temperaturas acima causam queima que, reduzindo a área fotossintética da folha.

A disponibilidade de água é fundamental para manutenção do sistema fisiológico e bioquímico das plantas. Essa necessidade varia bastante, pois depende do estágio fenológico em que a planta se encontra. Segundo Borges e Souza (2004), é necessário 1900 mm de água bem distribuídos durante todo o ano. Em regiões com chuvas mal distribuídas e irregulares, torna-se necessário o uso da irrigação, totalizando uma média de 158,33 mm mês⁻¹ e 5,3 mm dia⁻¹, com faixas mínima e máxima de 1800-2800 mm/ano. Uma baixa disponibilidade hídrica pode ocasionar no fechamento dos estômatos, reduzindo a fotossíntese e todos os processos fisiológicos fundamentais para uma boa produtividade. Em casos extremos, pode levar à morte das plantas. Por outro lado, quantidades elevadas de disponibilidade hídrica podem propiciar o desenvolvimento de doenças.

A umidade relativa do ar é crucial para o desenvolvimento saudável das folhas e a prolongada longevidade das mesmas. O autor relata que essa umidade deve estar em média de 80%. Outra variável ambiental importante é a luminosidade, uma vez que a bananeira demanda alta intensidade luminosa (2.000-10.000 horas de luz por ano). Mesmo que o comprimento do dia não afete negativamente o crescimento e a frutificação, regiões com baixa luminosidade podem resultar em um tempo mais prolongado para atingir o ponto de colheita em comparação com áreas mais ensolaradas (Ferreira *et al.*, 2016).

A altitude ideal para o crescimento dessa espécie vegetal é de 0-1000 metros acima do nível do mar. No entanto, é importante destacar que a mudança da mesma pode prolongar ou reduzir o ciclo da bananeira (Borges; Souza, 2004). Essa planta se adapta bem aos tipos de solo e suas características físicas e químicas. Em solos nutricionalmente pobres, é crucial

realizar adubações. Em ambientes com drenagem ineficiente, a implementação de um sistema de drenagem é necessária, uma vez que a cultura não suporta alagamento e seu pH ideal é de 6,5 (Lorena, 2015).

4.6.4 Produção da cultura

A produção de banana é composta por duas etapas: a produção de mudas e a produção de campo. A primeira fase é de suma importância para garantir o bom desempenho do pomar. Mudanças de qualidade fitossanitárias previnem problemas com pragas e doenças, como nematóides e a sigatoka. Além disso, uma execução cuidadosa dessa etapa assegura a homogeneidade do pomar e a qualidade dos frutos durante a colheita (EMBRAPA, 2014).

Segundo a Embrapa Mandioca e Fruticultura e a Embrapa Agroindústria Tropical (EMBRAPA, 2014) é necessário fazer um planejamento inicial, considerando fatores como a topografia do terreno, a eficiência do sistema de irrigação, qualidade da água, entre outros pontos a serem observados. Se os manejos a serem adotados forem com maquinários, é preciso espaçar mais as plantas para garantir o tráfego. O espaçamento também irá variar de acordo com a cultivar escolhida; por exemplo, 3m x 2m para Prata anã e BRS princesa, e 3m x 3m para Pacovan. Posteriormente, decide-se se será realizado o plantio por coveamento ou sulcamento, e as mudas produzidas anteriormente (com 45 a 60 dias) são transplantadas para o campo.

Em áreas com precipitações desuniformes e irregulares, torna-se essencial a implementação de um sistema de irrigação para garantir a adequada umidade do solo. A escolha do sistema de irrigação não influencia muito no desempenho da bananeira, pois a mesma não tem restrições quanto a esse fator. Tal escolha varia mais em relação ao local, clima, condições financeiras e tipo de solo. No entanto, os métodos de irrigação localizada destacam-se, sendo comuns na microaspersão uma vazão de 45L h^{-1} , isso para cada 4 plantas (Lopes, 2018; EMBRAPA, 2014). Segundo Miranda *et al.* (2012) na região do Baixo Jaguaribe, a cultura da bananeira recebe uma lâmina de 1.400 a 2.500 mm/ano, variando de acordo com cultivo e período do ano.

A adubação é realizada com base no que é absorvido e exportado para o fruto da bananeira. Segundo Araújo (2008), a marcha de extração dos nutrientes dessa cultura em ordem decrescente é: potássio (K) > nitrogênio (N) > cálcio (Ca) > magnésio (Mg) > enxofre (S) > fósforo (P) e os micronutrientes: Ferro (Fe) > manganês (Mn) > cobre (Cu) > zinco > boro (B). Seguindo as recomendações de Aguiar *et al.* (2014), para os macronutrientes primários é

necessária uma adubação de 120 a 500 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 90 a 730 kg ha⁻¹ de potássio e 20 a 260 kg ha⁻¹ de fósforo. Vale ressaltar que esses valores podem variar de acordo com a disponibilidade desse nutriente no solo.

O fruto da bananeira é do tipo climatérico, com uma faixa de maturidade larga, podendo ser colhido e induzido ao amadurecimento sem perder a qualidade do produto. O tamanho comercial desse fruto é de 16 cm e seu diâmetro é de 31,8 mm (Lopes, 2018). As fases fenológicas da bananeira variam muito de região para região. A tabela a seguir apresenta um resumo da duração desse ciclo, desde o plantio até a colheita:

Tabela 3 - Fases do ciclo produtivo da bananeira

ANOS	ETAPAS
1º Ano	Implantação/formação do pomar
2º ao 5º Ano	Manutenção e produção crescente
6º Ano	Estabilização

Fonte: AD Hoc da Secretaria Executiva de Agronegócio, 2022.

4.7 A cultura da goiaba

A goiabeira tem como seu centro de origem países americanos, uma vez que essa frutífera se adapta bem às condições ambientais dessas regiões. Essa adequação da espécie tem favorecido sua expansão para todo o globo, especialmente em países de clima tropical e subtropical. Esse vegetal é encontrado em algumas regiões do México e do Brasil. Atualmente, o seu cultivo tem crescido e apresentado como uma importante fonte alimentar, auxiliando assim na segurança alimentar dos territórios que elas são encontradas (Gonzaga Neto, 2007; Rodrigues, 2009).

4.7.1 Aspectos gerais

O nome científico dessa espécie é *Psidium guajava* L., fazendo parte da família Myrtaceae. O seu hábito de crescimento é do tipo arbusto ou árvore, podendo ser pequena, média ou de grande porte, a depender do cultivo. Esse crescimento também pode ser modificado de acordo com a preferência do produtor, através do manejo (poda) a ser adotado, variando entre 3-8 metros (Maia, 2016).

O sistema radicular varia bastante, uma vez que o desenvolvimento ocorre de acordo com as condições ambientais em que a planta está inserida, alcançando, em média, uma profundidade de até 30 cm por meio de suas raízes adventícias. O tronco apresenta características bem singulares, sendo assim liso e com casca. Essas peculiaridades facilitam o reconhecimento dessa espécie vegetal no campo (Maia, 2016; Zambão; Bellintani Neto, 1998).

As folhas são opostas e do tipo oblongo, apresentando nervuras ao longo de sua estrutura. Elas variam em largura, geralmente de 3 a 6 cm, e em comprimento, atingindo cerca de 5 a 15 cm. Após o processo de maturação, entram em senescência e caem (Zambão; Bellintani Neto, 1998). Suas flores são hermafroditas de coloração branca. Com o passar dos dias, elas eclodem e formam botões, que podem se apresentar de forma isolada e/ou em grupos e nas axilas dos galhos maduros surgem as brotações (Gomes, 2007).

Em relação aos frutos, podem apresentar formatos diferentes, geralmente sendo arredondados, ovais ou piriformes e classificados como do tipo baga. Quanto ao tamanho, a variação é considerável, influenciada pelas condições do clima e manejos adotados pelo produtor. Mas geralmente a média de tamanho fica em torno de 5-7 cm de diâmetro. Sua coloração é verde, tornando-se amarela ao amadurecer. Quanto à parte interna, pode ser branca ou avermelhada (Zambão; Bellintani Neto, 1998).

4.7.2 Importância econômica

A goiaba apresenta elevada aceitação no mercado, isso porque esse fruto tem sabor e aroma agradável para maior parte da população. Essa fruta é tida como uma das mais benéficas à saúde humana, com excelente equilíbrio nutricional, composta por vitamina C, sais minerais e fibras. Além disso, o seu consumo pode estar atribuído às suas características anti-inflamatórias, antimicrobianas, antioxidantes, antidiarreicas e antimutagênicas (Ravi; Divyashre, 2014; Fachi *et al.*, 2018).

Atualmente, é difícil encontrar dados que apresentem a produção mundial da cultura da goiaba. As informações disponíveis a nível global são escassas, pois a maior parte dos dados publicados pela FAO está centrada em frutas tropicais no geral. No entanto, alguns estudos apontam o Brasil como um dos principais produtores. Além do Brasil, alguns países como Índia, Paquistão e México também apresentam elevadas produção. Estes países são destaque na produção de frutas tropicais, podendo assim explicar por que essa cultura tem visibilidade nessas regiões (Pereira; Nachtigal, 2002; Pommer; Murakami; Watlington, 2006).

No Brasil, essa cultura tem crescido de forma exponencial e ganhado mercado em praticamente todos os territórios do país, tendo grande viabilidade socioeconômica. Este fato pode explicar por que o agronegócio brasileiro tem investido nessa frutífera, melhorando a renda do agricultor e com isso, reduzindo o êxodo rural e fixando o homem no campo (Bonifácio *et al.*, 2018).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o Brasil possui atualmente uma área destinada à colheita de 22.025 hectares e uma produção de 566.293 toneladas. Essa produção é destinada tanto para o mercado nacional quanto para o mercado internacional. A Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados (ABRAFRUTAS, 2022b) publicou os dados de exportação do primeiro trimestre de 2022, revelando que a goiaba trouxe um ganho econômico de R\$ 263.062. Esses dados apresentam uma variação de 17% a mais em comparação com primeiro trimestre de 2021, que teve R\$ 224.595. O peso de frutas exportadas também teve aumento de um ano para o outro, com elevação de 25%.

Entre as cinco grandes regiões do Brasil, o Nordeste se destaca como a que contribuiu mais significativamente para a produção de goiaba, abrangendo aproximadamente 48,1% da área destinada à colheita, totalizando 10.605 hectares, e representando 50,23% da produção total do país, equivalente a 284.503 toneladas. Essa grande região obtém um valor bruto de R\$ 545.031,00 e tem como principais representantes o estado de Pernambuco com R\$ 425.183 (78%), Bahia com R\$ 61.697 (11,3%) e o Ceará com R\$ 35.820 (6,8%) (IBGE, 2020).

O Ceará tem uma grande representatividade no Nordeste, com mais de 12% da área total da região e 7,5% da produção total. Como citado anteriormente, no quesito valor da produção de goiaba, esse estado ocupa a terceira posição. Microrregiões como Litoral de Camocim (R\$ 5.244), Barro (R\$ 1.973), Fortaleza (R\$ 1.882) e Cascavel (R\$ 1.875) tem grande destaque, porém o território com maior valor agregado de produção é o Baixo do Jaguaribe, com cerca de R\$ 16.091, totalizando 45% do total do Ceará em 2020. Em comparativo com 2015, quando o valor da microrregião do Baixo Jaguaribe era de R\$ 6.767, evidencia-se o avanço dessa frutífera nos últimos anos (IBGE, 2020).

4.7.3 Condições edafoclimáticas

Essa cultura é bastante adaptada ao clima tropical, pois é nativa de um país do trópico. Considerada uma espécie rústica, a goiabeira floresce e frutifica ao longo de todo o ano nas regiões tropicais. Mas vale ressaltar que isso só se torna possível caso haja uma disponibilidade dos recursos hídricos de forma regular. Em caso de má distribuição ou irregularidade, torna-se necessária a implementação de um sistema de irrigação (Gonzaga Neto; Soares, 1994).

A temperatura ideal para um bom desenvolvimento é entre 25-28°C. No entanto, como ela é extremamente sensível ao frio, casos de geadas podem levar à queima do tecido foliar e ao retardamento dos processos fisiológicos e bioquímicos. Em casos mais extremos, a planta pode chegar a senescência e, com isso, prejudicar totalmente o ciclo produtivo (Teixeira; Gonzaga Neto; Moura, 2001).

Em relação às necessidades hídricas da cultura, ela requer uma precipitação de cerca de 800-1000 mm de água, sendo o mínimo aceitável de 600 mm. Em regiões cuja precipitação não atinja o mínimo exigido, é necessário o uso de sistemas de irrigação. O objetivo desse sistema é complementar a demanda hídrica e, conseqüentemente, não atrasar o florescimento e nem ocasionar a queda dos frutos, visto que essa perda pode tornar a produção inviável para o produtor (Lima; Moreira, 2010).

Segundo Gonzaga Neto e Soares (1994), a umidade relativa é bastante variável e essa cultura se adapta bem às alterações. Embora o ponto ótimo de umidade relativa seja em torno de 80%, alguns territórios Brasileiros com pomares de goiabeira comercial operam em condições de umidade mais baixas, chegando a níveis de 30-40%. Mesmo assim, esses locais conseguem manter a sua produção. A exemplo disso, se tem a Bahia e o estado de Pernambuco.

Alguns outros fatores relacionados ao clima também são importantes. A exemplo disto, temos a luminosidade e o calor, que influenciam no processo de praticamente todas as espécies vegetais. Para a goiabeira não é diferente. Essa espécie precisa de uma quantidade elevada de ambas as variáveis citadas para que o índice de abortamento floral seja reduzido e, com isso, sua produção seja aceitável, proporcionando renda positiva ao agricultor (Lima; Moreira, 2010).

Essa planta requer solos com boas condições nutricionais e com características físicas que permitam a drenagem do excesso de água. Solos do tipo areno-argilosos têm se mostrado bastante eficientes na produção dessa espécie. É fundamental também que esses solos possuam uma quantidade considerável de matéria orgânica e que sejam profundos. Além disso, a composição química do solo desempenha um papel importante, sendo o pH ideal situado entre 5 e 6,5, faixa que proporciona a melhor disponibilidade dos nutrientes presentes. A topografia

do terreno a ser instalado o pomar também deve ser levada em consideração, sendo ideal que seja plano ou levemente inclinado, evitando terrenos com grandes declividades (Lima; Moreira, 2010).

4.7.4 Produção da cultura

Segundo Lima e Moreira (2010), realizar a coleta e análise do solo três meses antes do plantio é uma etapa crucial na fundação do pomar. Para um bom estabelecimento das mudas e garantia de boa produtividade, é valioso observar as características físicas e químicas do solo. Caso se note a necessidade de práticas de revolvimento do solo e adição de matéria orgânica, a adoção dessas técnicas no manejo é valiosa, proporcionando resultados positivos.

Alguns pontos, como escolha da variedade e compra de sementes e mudas, são importantes se ter atenção antes da instalação do pomar. Variedades adaptadas ao solo da propriedade, as condições da região e mudas saudáveis são aspectos que podem garantir o sucesso da produção. Dada a ampla diversidade de goiabeiras, com diferentes características de copa, produção precoce ou tardia, número, tamanho e formato do fruto, a escolha dependerá dos objetivos específicos do produtor rural, como a produção de polpa ou de frutas *in natura* (Gonzaga Neto, 2007).

O espaçamento adotado vai variar de acordo com a cultivar escolhida pelo agricultor. É importante também levar em consideração o sistema de produção, incluindo a necessidade ou não de tráfego de maquinários. Em perímetros irrigados na grande região Nordeste, o espaçamento geralmente adotado é de 6 m x 5 m. As covas são geralmente abertas com auxílio de uma máquina agrícola, mas também podem ser feitas de forma manual e com auxílio de uma trena (Lima; Moreira, 2010).

Após a realização do plantio, é indispensável a realização de poda, desde a etapa de muda, até as fases mais avançadas do pomar. As podas de formação vão direcionar e orientar o crescimento da copa, fazendo-se uma arquitetura de acordo com o desejado, mas sempre visando a floração e frutificação da goiabeira. Quando se tem uma boa luminosidade, temperatura e irrigação, esse manejo poderá ser realizado em qualquer época do ano, sendo este o caso dos nossos perímetros irrigados do Nordeste (Maia, 2016; EMBRAPA, 2014).

A goiabeira se adapta bem a qualquer sistema de irrigação, porém é importante a elaboração de um projeto para dimensionamento do sistema. É de conhecimento que a eficiência irá variar de acordo com o método utilizado. Vale ressaltar que essa eficiência ocorre

em relação à quantidade de água aplicada, pela quantidade de água aproveitada pelas plantas, sendo maior em sistemas de irrigação localizado. Porém uma dificuldade para o uso do gotejamento, por exemplo, é a quantidade de gotejadores que deverá ser colocado por planta (Maia, 2016). Trabalhando com microaspersão, Bassoi *et al.* (2002) definiu que o consumo vai variar de acordo com as fases fenológicas e o ciclo de produção, com médias de 36,7 L planta⁻¹ dia⁻¹ no primeiro ciclo, 46,3 L planta⁻¹ dia⁻¹ no segundo ciclo e 45,6 L planta⁻¹ dia⁻¹ no terceiro ciclo.

A adubação é um ponto importante durante o estabelecimento/desenvolvimento do pomar. A disponibilidade de macro e micronutrientes irá favorecer os processos fisiológicos e bioquímicos da planta. Com isso, a produção do pomar pode ser elevada. Os elementos mais extraídos na colheita da goiaba são o potássio (K), nitrogênio (N) e fósforo (P), seguidos pelo enxofre (S), magnésio (Mg) e Cálcio (Ca). Em relação aos micronutrientes tem-se: Ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu) e boro (B) (Maia *et al.*, 2007).

Os frutos geralmente são ensacados em campo com o objetivo de reduzir o ataque de moscas das frutas, sendo esta praga bastante comum na cultura da goiaba. Geralmente esses frutos são colhidos com diâmetro de 6-10 cm, variando de acordo com a variedade escolhida e os manejos adotados no processo produtivo (Lima; Moreira, 2010). As fases fenológicas da goiabeira variam muito de região para região. A tabela a seguir resume a duração desse ciclo, desde o plantio até a colheita:

Tabela 4 - Fases do ciclo produtivo da goiabeira

ANOS	ETAPAS
1ºAno	Implantação/formação do pomar
2º ao 4ºAno	Manutenção e produção crescente
5ºAno	Estabilização

Fonte: AD Hoc da Secretaria Executiva de Agronegócio, 2022.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Na pesquisa foi utilizada a metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV), realizando as análises de pegada de escassez hídrica segundo a ISO 14046 (ISO, 2014) e pegada de carbono, conforme recomendações da ABNT NBR ISO 14067 (ABNT, 2023).

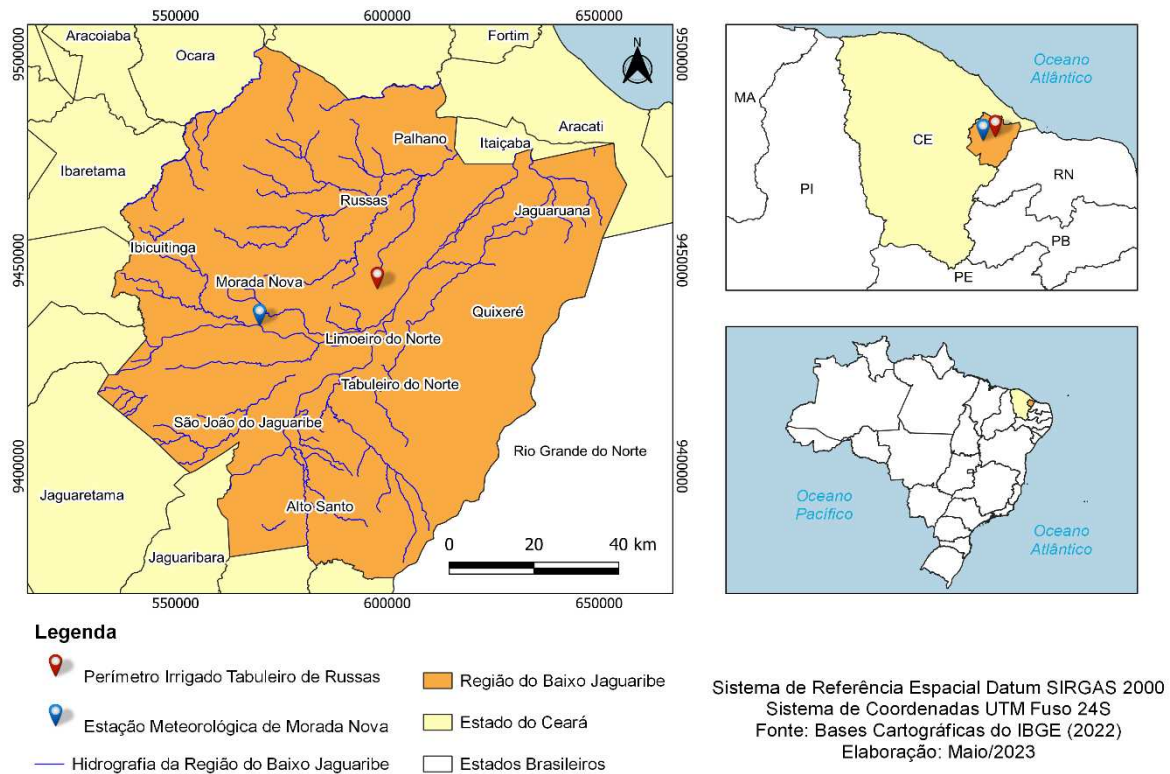
5.1 Localização e caracterização da região de estudo

O estudo foi realizado no Estado do Ceará, que tem uma área de 148.886 km², com maior parte da cobertura vegetal sendo da caatinga (IPECE, c2007). O clima característico do Estado é o tropical quente, com temperaturas variando entre 23°C a 30°C no decorrer do ano. Sua precipitação média é em torno de 800 mm (FUNCEME, [2020]). A escolha desse território se deu pela expansão da fruticultura, tendo participação significativa na exportação, ficando em terceiro lugar nos índices do Nordeste. Como citado, a banana já tem um forte mercado e apresentou 19% da produção dessa região, trazendo bons resultados, enquanto a goiabeira que está em ascensão, com previsões de amplificação da sua produção, que hoje representa 7,5% (IBGE, 2020a).

A microrregião estudada é do Baixo Jaguaribe (Figura 01), uma das principais produtoras do Ceará, com população de 326.336 habitantes e 9.951 km² de área, localizada no semiárido brasileiro (Ceará, 2016). Esse território enfrentou uma seca entre 2012 e 2017, da qual ainda não se recuperou totalmente, prejudicando a expansão da fruticultura.

A escassez hídrica neste período evidenciou a falta de segurança hídrica no projeto de irrigação Tabuleiros de Russas. Dados apresentados pelo distrito responsável (DISTAR, 2020) mostram que a disponibilidade de vazão reduziu nos últimos anos. Em 2014, era de 2,9 m³ s⁻¹, enquanto 2019 essa vazão diminuiu para 1,2 m³ s⁻¹. Essa redução refletiu no total de áreas irrigadas, que diminuiu em 63,13%, saindo de 6055 hectares para 2051 hectares (Pimentel, 2021). Diante deste cenário, torna-se importante a realização de estudos voltados para sustentabilidade local, principalmente, porque segundo Miranda, Mascedo e Gondim (2012) e Gonzaga Neto (2001), a bananeira e a goiabeira são muito exigentes quanto às condições hídricas, precisando de disponibilidade hídrica para atingir altas produções.

Figura 3 - Mapa de localização da região estudada



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Avaliação do ciclo de vida

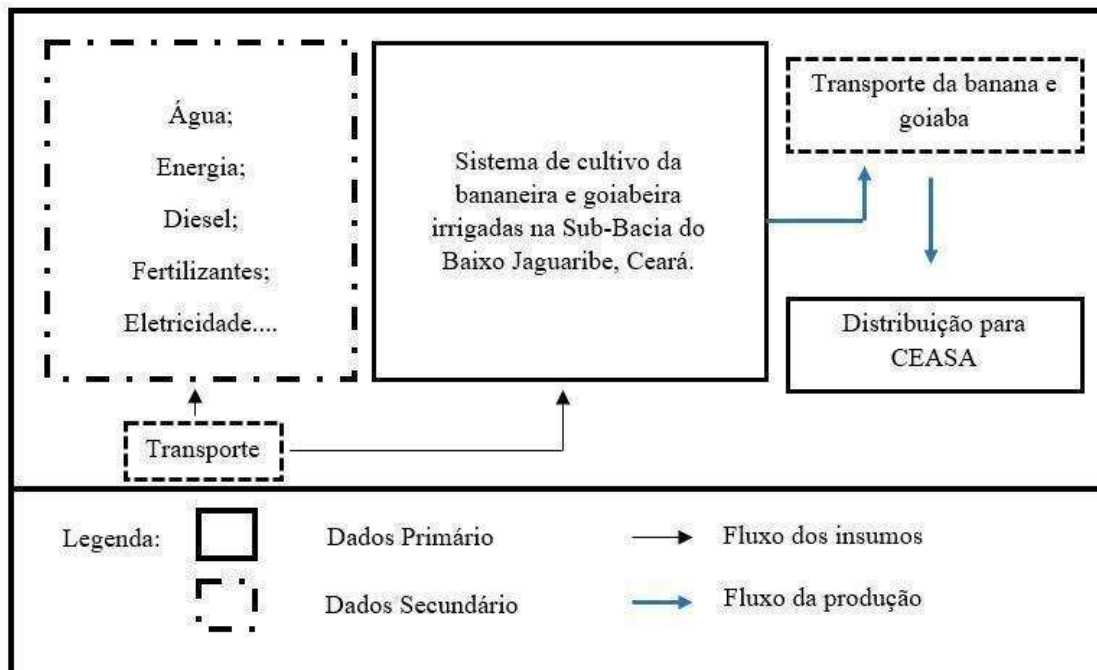
A avaliação do ciclo de vida realizada neste estudo seguiu as normas da ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b). Como citado anteriormente, esta é uma técnica para avaliar aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um processo, produto ou serviço. Segundo as diretrizes citadas, o trabalho está sendo realizado com base em quatro etapas: a) definição do objetivo e escopo; b) análise de inventário; c) avaliação de impacto ambiental; e d) interpretação, conforme representadas na Figura 2.

5.2.1 Análise do inventário do ciclo de vida

5.2.1.1 Escopo

Na primeira etapa do trabalho, definiu-se a limitação da fronteira do sistema a ser estudado e a unidade funcional a ser investigada. A fronteira do sistema foi do berço ao portão (Figura 4), onde se considera desde a produção e transporte dos produtos que serão utilizados no sistema de produção de 1 ha por cultura avaliada. Isso inclui: água, energia e agroquímicos, adubos orgânicos, e estimativas de emissões de gases de efeito estufa - GEE. A avaliação de impacto do estudo considera a quantidade de banana e goiaba produzida, tendo como unidade funcional 1 quilograma do produto in natura. Essa escolha facilita possíveis comparações com outros estudos. As etapas de manejo (preparo do solo, plantio, irrigação, adubação orgânica e inorgânica de fundação, fertirrigação inorgânica, aplicação de defensivos agrícolas, operações mecanizadas e colheita), necessárias para a produção das culturas foram consideradas no estudo. Ressalta-se que, no caso da banana, também foi contabilizada a etapa de produção de mudas micropropagadas. O transporte dos insumos para a área de produção também foi levado em consideração, bem como o transporte dos produtos (embalados) até um centro de distribuição (Fortaleza - CEASA). A disposição final dos resíduos gerados pelos processos de produção não foi considerada neste estudo.

Figura 4 - Fronteiras do sistema de produção estudadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1.2 Coleta de dados

As informações sobre consumo de insumos (dados primários) foram coletadas por meio de questionários estruturados e entrevistas com os produtores (APÊNDICE A). A aplicação do questionário foi realizada entre dezembro de 2022 e fevereiro de 2023. Todas as propriedades visitadas estavam localizadas dentro do Projeto de Irrigação Tabuleiros de Russas. Para a cultura da bananeira, foram entrevistados sete produtores, enquanto para a cultura da goiabeira foram entrevistados cinco produtores. As características das propriedades avaliadas se encontram na tabela 3.

Tabela 5 - Caracterização das propriedades avaliadas e do inventário de referência (média da Região do Baixo Jaguaribe)

Sub-Bacia	Cultura	Variedade	Local	Densidade de plantio (pl/ha)	Vida útil pomar (anos)	Área (ha)
Baixo Jaguaribe	Bananeira	Prata Catarina	Propriedade 1 (P1)*	1500	10	37
			Propriedade 2 (P2)*	1666	10	24
			Propriedade 3 (P3)*	1666	6	8
			Propriedade 4 (P4)*	1600	12	6
			Propriedade 5 (P5)*	1666	12	4
			Propriedade 6 (P6)*	1500	12	3
			Propriedade 7 (P7)*	1500	10	3
	Referência (R)*	1818	10	-		
	Goiabeira	Paluma	Propriedade 1 (P1)*	555	12	36
			Propriedade 2 (P2)*	476	15	25,5
			Propriedade 3 (P3)*	250	12	7
			Propriedade 4 (P4)*	270	12	4
			Propriedade 5 (P5)*	277	12	2
			Referência (R)*	333	10	-

* - Sistema de produção convencional.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as propriedades estudadas apresentavam sistema de produção convencional, caracterizado por ser monocultivo e associado ao consumo elevado de um pacote tecnológico, visando manter altas produtividades. Esse pacote inclui o uso de fertilizantes químicos, defensivos agrícolas, maquinário e, conseqüentemente, a queima de combustível fóssil, conforme descrito por Richard, Qi e Fitt (2022).

As informações de entradas inventariadas nas diferentes propriedades foram tratadas, buscando obter um ano de produção médio para cada um dos produtores. Para isso, foi realizada a média aritmética das fases de crescimento das culturas (implementação, manutenção e produção) nas diferentes áreas inventariadas. O ano médio foi determinado de acordo com a vida útil do pomar informada por cada produtor entrevistado (tabela 1).

Os dados secundários de produção dos insumos (energia, água, fertilizantes, pesticidas, transporte...) foram obtidos pela base de dados internacional Ecoinvent 3.8 (Frischknecht; Jungbluth, 2007). Os inventários usados encontram-se no anexo B. Um inventário de referência com dados médios da região do Baixo Jaguaribe foi disponibilizado por um *ad hoc* da Secretaria Executiva de Agronegócio/SDE para ambas as culturas (tabela 03). A vida útil do pomar adotada para ambas as culturas foi de dez anos. O inventário de referência foi utilizado para fazer uma análise comparativa dos impactos ambientais da área estudada.

5.2.1.3 Estimativas de Emissões

As estimativas das emissões para água, ar e solo foram realizadas com auxílio da calculadora ICVcal, calculadora elaborada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Matsuura *et al.*, 2022). Essa calculadora considera as metodologias da BRcalc, que utiliza os modelos mais adequados para as condições do Brasil, além de ser alimentada com informações de solo e clima de todas as 27 unidades federativas do país (Equações encontram-se no ANEXO A). As emissões diretas para o ar devido à mudança de uso da terra foram calculadas de acordo com a planilha citada anteriormente, onde os gases CO, CH₄, N₂O e NO_x foram realizados pelo IPCC 2006/2019, considerando a classificação do bioma e do solo. As emissões de CO₂ seguiram a metodologia do IPCC (2007) e MCTI (2010).

As estimativas realizadas pela BRcalc consideram as metodologias internacionalmente reconhecidas. Para as emissões de amônia-NH₃ pela aplicação de composto orgânico, foi utilizada a metodologia de AGRAMMON ([2009]). As emissões de óxidos de nitrogênio-NO_x emitido para o ar foram calculadas pelo WLFDB (Nemecek *et al.*, 2015). Já as emissões de óxido nitroso-N₂O e o dióxido de carbono-CO₂ relacionadas à aplicação de uréia e calcário seguiram as diretrizes estabelecidas pelo IPCC (2019a).

Os dados foram trabalhados no software Simapro versão 9.5.0.0., da empresa holandesa Pré Consultants, disponibilizado pela Embrapa Agroindústria Tropical. Nesse

software, se realizou a inserção dos dados inventariados em campo, a agregação de inventários das cadeias de insumos e a avaliação comparativa de impacto sobre a mudança climática dos diferentes sistemas de cultivo.

5.2.1.4 Necessidade hídrica das culturas

Os dados climáticos de um recorte de tempo de 30 anos para dois períodos (1971-2000 e 1991-2022) para cálculo da necessidade hídrica foram obtidos no “site” do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). Utilizou-se a estação de Morada Nova, com código 82588, exceto o ano de 1972, no qual, devido a falhas na estação, os dados foram obtidos do Climatic Research Unit (CRU). A partir da obtenção desses dados, foi calculada a ET_0 por meio de uma planilha de dados mínimos do Excel, seguindo a metodologia de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), conforme a equação a seguir:

$$ET_0 = \frac{0,408 (Rn-G) + \gamma \frac{900}{t} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (01)$$

Onde:

ET_0 – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});

Rn – Radiação líquida na superfície da cultura ($\text{Mj m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G – Densidade de fluxo de calor do solo ($\text{Mj m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

γ – Coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

t – Temperatura do ar a 2m de altura ($^\circ\text{C}$);

u_2 – Velocidade do vento a 2m de altura (m s^{-1});

e_s – Pressão de vapor de saturação (kPa);

e_a – Pressão parcial de vapor (kPa);

Δ – Declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}$).

A quantidade de água a ser repostada pelo sistema de irrigação para as culturas foi calculada com base nas equações a seguir:

$$IRN = ET_C - PPE \quad (02)$$

$$ET_C = ET_0 \times Kc \times Kr \quad (03)$$

$$PPE = PPT \times 0,75 \quad (04)$$

Onde:

IRN – Irrigação real necessária (Pegada hídrica azul);

ET_C – Evapotranspiração da cultura;

PPE - Precipitação Efetiva (mm/mês);

ET_0 – Evapotranspiração de referência;

Kc – Coeficiente da cultura, de acordo com as fases de crescimento;

Kr - Coeficiente de redução;

PPT – Precipitação total (mm/mês);

0,75 – Fator de conversão, diz que 75% da chuva foi efetiva (Amaral; Silva, 2008).

Tabela 6 - Dados de coeficiente da cultura (Kc) e coeficiente de redução (Kr) utilizados

Mês	Banana						Goiaba	
	Ano 1		Ano 2		Ano 3		Kc	Kr
	Kc	Kr	Kc	Kr	Kc	Kr		
	Doorenbos; Pruitt (1977)	Freitas; Ramos; Costa (2008)	Allen <i>et al.</i> (1998)	-	*	-	Ferreira (2004)	Carvalho <i>et al.</i> (2013)
Jan	0,4							
Fev	0,4							
Mar	0,45							
Abr	0,5							
Mai	0,6							
Jun	0,7							
Jul	0,85	1	1,1	1	1,1	1	0,91	0,3983
Ago	1							
Set	1,1							
Out	1,1							
Nov	0,9							
Dez	0,8							

-. Mesma citação do ano 1 (Kr); *: Mesma citação do ano 2 (Kc).

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1.5 Necessidade hídrica futura (2025-2050):

Vários estudos têm utilizado os modelos e cenários propostos pelo IPCC (2013b) para simular alterações nas condições climáticas futuras, determinando possíveis tendências em relação ao aumento ou redução de fatores climáticos como temperatura, precipitação, e evapotranspiração de referência (ET_o) para diversas regiões do mundo. Na região do Jaguaribe, destaca-se o trabalho desenvolvido por Gondim *et al.* (2018), que simulou para o recorte de 2025-2055 a ET_o futura e a precipitação nesta região.

Gondim *et al.* (2018) utilizou 25 modelos do CMIP5 retirados do sistema do IPCC (2013b) para a região em questão, com objetivo de identificar qual o melhor modelo para prever a ET_o e a Precipitação. Os autores realizaram uma interpolação dos dados do Climatic Research Unit (CRU) e da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica. Logo depois, fez-se um tratamento desses dados, calculando o erro quadrático médio e a correlação de Pearson para obter o modelo com melhor desempenho na estimativa desses dados.

Segundo Gondim *et al.* (2018), os dados do recorte de 30 anos entre 1971-2000 foram calculados pelos modelos. Com isso, aquele que representasse melhor a situação climática real no recorte destes 30 anos, também seria o que melhor representaria as condições de 2025-2055. Desta forma, cinco modelos foram escolhidos pelo autor por apresentar uma melhor avaliação temporal (EVALs), a saber: CCSM4 (EVALs = 1,0), HadGEM2-AO (EVALs = 0.948), CESM1-BGC (EVALs = 0.947), BCC-CSM1-1 (EVALs = 0.913) e GFDL-CM3 (EVALs = 0.903). Para este estudo e cálculo da demanda hídrica da banana e goiaba futura, foi escolhido apenas o modelo com melhor EVALs, sendo o CCSM4.

O autor seguiu a metodologia de Block *et al.* (2009) para fazer uma correção estatística nos dados de precipitação, ajustando uma distribuição gama desses dados mensais. Além disso, o autor relata uma falta de dados históricos para temperatura máxima e mínima na região, sendo necessário uma correção estatística dos dados do CRU (Harris *et al.*, 2014). Após a obtenção dos dados climáticos futuros, Gondim *et al.* (2018) realizou a estimativa da ET_o da região para 2025-2055 segundo o método da FAO-Penman–Monteith (Allen *et al.*, 1998), cuja equação se encontra no tópico 5.2.1.1.

A estimativa feita pelo autor seguiu dois cenários de previsões futuros indicados pelo IPCC, que traz o conceito de forçamento radioativo. Esses cenários são o RCP 4.5, que se refere a um cenário onde a radiação se mantém em 4,5 W m² até o ano de 2100 (desenvolvido pela JGCRI - Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute, dos Estados Unidos), e o cenário RCP 8.5, caracterizado pela alta elevação na concentração dos gases do efeito estufa e a radiação chegando a 8,5 W m² (elaborado pelo quadro de avaliação integrada do IIASA - International Institute for Applied Systems Analysis, da Áustria) (IPCC,

2013a). A partir disto, utilizou-se os dados de ETo e Precipitação para calcular a lâmina de irrigação necessária (IRN), seguindo as equações do tópico 5.2.1.1.

Gondim *et al.* (2018) ainda relata a importância de se fazer estudos voltados para um futuro próximo da realidade em que estamos. Segundo o autor, é necessário a implementação de estratégia e políticas voltadas para o setor da irrigação, garantindo o emprego e, conseqüentemente, reduzindo o problema do êxodo rural no setor agrícola nas próximas décadas.

5.2.1.6 Comparações das lâminas de água

Como citado no tópico 5.2.1.4, foram obtidas duas séries históricas de dados climáticos, na estação de Morada Nova e CRU, abrangendo os períodos de 1971-2000 e 1991-2022. A primeira série histórica (1971-2000) é o mesmo recorte histórico estimado pelo modelo CCSM4, e teve como objetivo a validação da estimativa realizada por Gondim *et al.* (2018), que calculou essa estimativa para toda a Bacia do Jaguaribe. Tendo em vista que este estudo é voltado apenas para a microrregião do Baixo Jaguaribe, verificou-se a adequabilidade de uso dos dados por meio de uma regressão, onde foram comparados os dados reais medidos da estação de Morada Nova e os dados estimados pelo CRU citados no tópico 5.2.1.1. Com a climatologia do mesmo período estimado pelo modelo CCSM4. A análise considerou que se o R^2 ficasse acima de 0,7 os dados representariam bem a microrregião de estudo e, com isso, poderiam ser utilizados para cálculo da lâmina bruta de água.

Enquanto a série de 1991-2022 foi utilizada para realização do cálculo de demanda hídrica das culturas (considerada necessidade hídrica atual), a demanda hídrica calculada por meio dessa série histórica foi comparada com o total de água usado pelos produtores da área de estudo e com inventário de referência. Por fim, a demanda calculada para série de 1991-2022 foi comparada com os cenários de demanda futura (RCP4.5 e RCP8.5) estimados através dos dados climáticos disponibilizados pelo modelo CCSM4 (conforme descrito no tópico 5.2.1.5). Como a estimativa realizada pelo modelo é com base no futuro próximo, essa comparação teve o intuito de observar se os impactos da pegada de escassez hídrica futura nos dois cenários já haviam sido superados ou estavam próximos.

5.2.1.7 Transporte (tkm)

O cálculo do transporte dos insumos considerou a distância em quilômetros entre a unidade de origem e as propriedades agrícolas, levando em conta as toneladas de insumos transportadas. Para os agroquímicos (fertilizantes e defensivos), foram considerados os que vinham de Cubatão - São Paulo (2663 km). Já os adubos orgânicos são obtidos na própria região, considerando Limoeiro do Norte - Ceará como origem (20 km). Quanto ao escoamento da produção, o tkm foi calculado considerando que 100% da produtividade é destinada à CEASA - Maracanaú, Ceará (183 km). O tipo de caminhão escolhido para realização do transporte foi de carga entre 16-32 toneladas (BR).

5.3 Avaliação dos impactos ambientais

5.3.1 Pegada Carbono

A avaliação de impacto sobre as mudanças climáticas foi realizada usando o método do IPCC (2021a), avaliando o potencial de aquecimento global dos GEE com horizonte de 100 anos. Dessa forma, o resultado da avaliação é expresso em quantidade de CO₂ equivalente gerada em cada sistema de cultivo em estudo para cada produtor e para os dados de inventário de referência. Essa quantidade de CO₂ equivalente comunica a contribuição dos diversos gases de efeito estufa para essa categoria, gerados ao longo das cadeias de insumo e na produção das culturas.

5.3.2 Pegada de Escassez Hídrica

Na pegada escassez hídrica de produtos agrícolas, dois parâmetros chaves foram levantados, conforme as normas ISO 14046, 14040 e 14044 (ISO, 2014, 2006a, 2006b): i) consumo de água no ciclo de vida das culturas); ii) fatores de escassez para as regiões provedoras de água. Com relação ao consumo de água, além da água utilizada diretamente na irrigação, tanto pelo produtor entrevistado como a necessidade hídrica calculada, tida como necessidade hídrica real (NHR), se fez um levantamento do consumo hídrico da produção de todas as matérias-primas (fertilizantes, pesticidas, energia) utilizadas de forma direta ou indireta

no processo de produção da cultura (para obtenção utilizou-se aplicativos do tópico 5.2.1.3). Outro fator importante, é a produtividade das culturas. Esse parâmetro é levado em consideração nos cálculos (Equação 05 e 06) e pode reduzir de forma direta os impactos.

Para a determinação da pegada de escassez hídrica das culturas foi utilizado o método AWARE (Boulay *et. al.*, 2018), que avalia o potencial relativo da privação de água, tanto para humanos como para ecossistemas. Esse método é baseado em um indicador que representa o inverso da diferença entre disponibilidade hídrica da área de demanda por área em uma determinada bacia hidrográfica em relação à média mundial. A demanda hídrica abrange tanto a humana como a do ecossistema. Os dados de demanda e disponibilidade utilizados nesse modelo foram gerados pelo modelo hidrológico Global Watergap para todas as grandes bacias hidrográficas do mundo (Boulay *et. al.*, 2018), sendo que os fatores referentes à bacia hidrográfica em estudo encontram-se na tabela 4.

Para o cálculo mais preciso da pegada de escassez hídrica pelo método AWARE, se fez necessário utilizar os fatores de escassez hídrica regionalizados (Andrade *et al.*, 2019) para todas as regiões brasileiras. Esses fatores de escassez foram regionalizados inclusive para as Unidades Hidrográficas Estaduais do Ceará definidas pela Agência Nacional de Águas - ANA (ANA, 2015). Para isso, foram utilizados dados de demanda e disponibilidade hídrica disponíveis nas bases de dados da ANA e nos planos de bacias da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH.

Esses fatores regionalizados (Tabela 4) por Andrade *et al.* (2019) serão considerados no cálculo da pegada de escassez hídrica das culturas, com objetivo de comparar com os fatores de caracterização (FC) globalizados por Boulay *et al.* (2018).

Tabela 7 - Fator de caracterização usado para cálculos de escassez hídrica

Meses	Baixo Jaguaribe	
	Boulay <i>et al.</i> (2018)	Andrade <i>et al.</i> (2019)
Jan	30,2	100
Fev	17,7	100
Mar	9,6	100
Abr	5,6	100
Mai	3,3	100
Jun	5,3	100
Jul	8,2	100
Ago	10,7	100
Set	16,0	100
Out	24,0	100
Nov	29,9	100
Dez	30,5	100
Anual Agrícola	10,7	100
Anual não agrícola	15,9	100
Anual desconhecido	11,8	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

As fórmulas usadas para realização do cálculo da pegada de escassez hídrica encontram-se a seguir:

$$PEH = FC_{mensal\ ou\ anual} * Consumo\ hídrico \quad (05)$$

$$Consumo\ hídrico = \frac{LB}{P} \quad (06)$$

Onde:

PEH – Pegada de escassez hídrica, m³ eq/kg do produto;

FC – Fator de caracterização mensal e anual, encontrado na tabela 4;

Consumo hídrico – Quantidade de água demandada por quilograma produzido;

LB – Lâmina bruta, m³/ha.mês ou ano;

P – Produtividade mensal e anual, kg.ha⁻¹.

5.3.2.1 Pegada de escassez hídrica futura

O cálculo de pegada de escassez futura seguiu o mesmo princípio do item 5.3.2, utilizando os fatores de caracterização citados na tabela 4. Porém, o impacto está diretamente

ligado à produtividade das culturas e o consumo de água por quilograma produzido. Tendo em vista isso, foi necessário realizar uma estimativa de como estará a produtividade da banana e goiaba entre os anos de 2025-2050.

Para isso se acessou o site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) e se consultou a disponibilidade de dados de produtividade da banana e da goiaba nos últimos anos, obtendo assim valores referentes a 2001-2021 (21 anos) na região do Jaguaribe. Após isso, foi feita uma variação da porcentagem de crescimento ou de redução das culturas no decorrer dos 21 anos, onde foi percebido que a banana reduziu em 1,11% a sua produtividade, enquanto a goiaba aumentou cerca de 4,78%.

O cálculo de pegada de escassez hídrica futura foi feito usando uma produtividade de 35.724,01 kg ha⁻¹ para a banana e 24.623,3 kg ha⁻¹ para a goiaba, baseando-se que no futuro (2025-2055) a tendência de produtividade de ambas as culturas irá seguir o padrão do que aconteceu nos últimos 21 anos. Para a climatologia de base do modelo CCSM4 (1971-2000), a produtividade utilizada foi a do inventário de referência, conforme apresentado na tabela 5.

5.4 Análise de incerteza

A análise de incerteza tem como objetivo quantificar quais as incertezas dos dados do inventário, considerando a variabilidade dos valores de insumos e emissões (ISO, 2006). A metodologia utilizada para realização dessa análise foi a de Monte Carlo. Este método simula valores de entradas e saídas de acordo com os valores disponibilizados, por meio de uma função de probabilidade e o desvio padrão, obtidos através da matriz pedigree. O estudo em questão assumiu que os dados seguem um log-normal de probabilidade.

Foram realizadas 1.000 simulações para comparar dois cenários, que receberam nomenclaturas de A e B. Com isso, foi obtido uma porcentagem de quantas vezes dentro dessa simulação o A foi maior que B. Quando $A > B$ ocorreu cerca de 95% das vezes, assumiu-se que existe uma diferença significativa nos impactos.

5.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade segue um processo sistêmico, que tem como objetivo observar em quais etapas do sistema de produto estudado estão os maiores impactos potenciais. O objetivo é montar possíveis alternativas (cenários) para que os impactos potenciais possam ser reduzidos. Abaixo, estão discriminados os cenários analisados:

- 1) Cenário 1 (C1) - Este cenário tem como foco zerar as emissões de mudança do uso da terra (MUT), demonstrando uma situação em que o agricultor já instalou o pomar a mais de 20 anos (apenas para categoria de mudanças climáticas);
- 2) Cenário 2 (C2) - Produtividade: As propriedades aumentam a produtividade, Produtividade: As propriedades aumentam a produtividade de acordo com a propriedade de maior rendimento, tendo em vista que todas estão na mesma região, sendo a propriedade 6 de banana e a 2 de goiaba;
- 3) Cenário 3 (C3) - Este cenário tem como foco reduzir a lâmina de água utilizada pelos produtores para atender a necessidade hídrica real das culturas. Com a redução da lâmina de água, se reduz também o consumo de energia. De acordo com informações dos produtores, a cada 5,03m³ de água, 1 kwh era consumido;
- 4) Cenário 4 (C4) - Este cenário tem como objetivo juntar o cenário 3 e incrementar com o uso de placas para geração de energia fotovoltaica para as duas culturas.

5.6 Interpretação dos resultados

Após todas as etapas de construção da ACV e avaliação dos impactos ciclo de vida (AICV) terem sido concluídas, foram avaliadas as questões significativas em torno dos resultados apresentados na avaliação dos impactos potenciais dos produtos estudados. Essa análise teve como objetivo verificar se esses resultados ficaram em consonância com os objetivos e escopo traçados para o estudo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Inventários de entrada e de saída do sistema de produção das culturas da bananeira e de goiabeira

No apêndice B, são apresentados os inventários de produção referentes ao ano médio de cada cultura (bananeira e goiabeira). Esses inventários incluem tanto os dados coletados junto aos produtores quanto os dados referentes ao Baixo Jaguaribe, disponibilizados pela Ad Hoc da Secretaria Executiva de Agronegócio (dados médios da microrregião do Baixo Jaguaribe) e considerados como o inventário de referência (R).

Pelos dados inventariados, é possível observar uma disparidade no uso de nitrogênio em ambas as culturas. Para a cultura da bananeira, as propriedades 4, 5 e 6 estudadas utilizaram maior quantidade, enquanto para a goiabeira, apenas as propriedades 3 e 4 utilizaram menos nitrogênio que o inventário de referência. Esse macronutriente primário (nitrogênio), vai influenciar diretamente nas emissões de CO₂ e N₂O, contribuindo assim, na pegada de carbono. Segundo Yan *et al.* (2016) ao trabalhar com o modelo IPCC 2007 e investigar 5 frutíferas (maçã, pêssego, pêra, laranja e banana) na China, o fertilizante nitrogenado aumentou os impactos das mudanças climáticas em todas as frutíferas.

Ressalta-se também a diferença na utilização de calcário, onde o inventário de referência apresenta quantidade muito superior quando comparado com a quantidade apresentada nas propriedades inventariadas, tanto para a bananeira quanto para a goiabeira. Segundo Medaiyese *et al.* (2023), quando se aumenta o uso de calcário, as emissões de CO₂ aumentam significativamente, sendo necessário maior atenção no uso deste insumo.

O consumo hídrico das propriedades, tanto para a bananeira quanto para a goiabeira, é significativamente superior ao do inventário de referência, com exceção da P5 para a bananeira, que teve um consumo 47,2% menor que o R. Esse uso exacerbado de água nas propriedades estudadas também eleva o consumo de energia em kwh, uma vez que o bombeamento de água demanda energia. Portanto, é essencial prestar atenção a esse consumo de eletricidade, pois este insumo tem grande impacto ambiental (Vilén; Laurell; Vahala, 2022).

As propriedades P1 e P6 apresentam maior produtividade de banana quando comparadas ao inventário de referência. Da mesma forma, para a goiabeira, as propriedades P1, P2 e P4 tiveram produtividade acima do inventário de referência.

Quanto às operações agrícolas, observa-se maior quantidade nas propriedades visitadas, tanto para a bananeira, quanto para a goiabeira, em comparação com o inventário de referência (3 operações para a bananeira e 2 para a goiabeira). Há exceções nas propriedades P4 e P7 da bananeira (que realizaram apenas 2 operações) e P4 e P5 da goiabeira (2 e 1 operação, respectivamente). As atividades mecanizadas também têm grande influência na pegada de carbono, devido à queima do diesel. Quanto mais atividades forem realizadas, maiores serão as emissões geradas (Adewale *et al.*, 2019).

Em relação à cultura da bananeira, as propriedades P1 e P2 tiveram as maiores emissões para o ar (APÊNDICE B), além do inventário de referência, que também apresentou emissões significativas. Para a goiabeira, as maiores emissões ocorreram no inventário de referência e nas propriedades P1, P2 e P3. As emissões para o ar se encontram menores nas

propriedades P4 e P5 de bananeira e de goiabeira, pois não utilizaram calcário ou o uso foi reduzido (Medaiyese *et al.*, 2023).

Quanto às emissões para mudança do uso da terra, a metodologia utilizada pela calculadora é a do IPCC 2006/2019 (IPCC, 2006), que leva em consideração apenas o tipo de vegetação do Jaguaribe e a classificação do solo da região. Dado que todas as propriedades estudadas e o inventário de referência são da mesma região, os valores de CO, CH₄, N₂O e NO_x são iguais. Em relação à emissão de CO₂ devido à mudança do uso da terra, foi considerada a densidade de plantio dos inventários em questão, sendo que quanto maior a densidade, menor será a emissão, como observado nas propriedades P2, P4 e P5 de banana e P2 de goiaba.

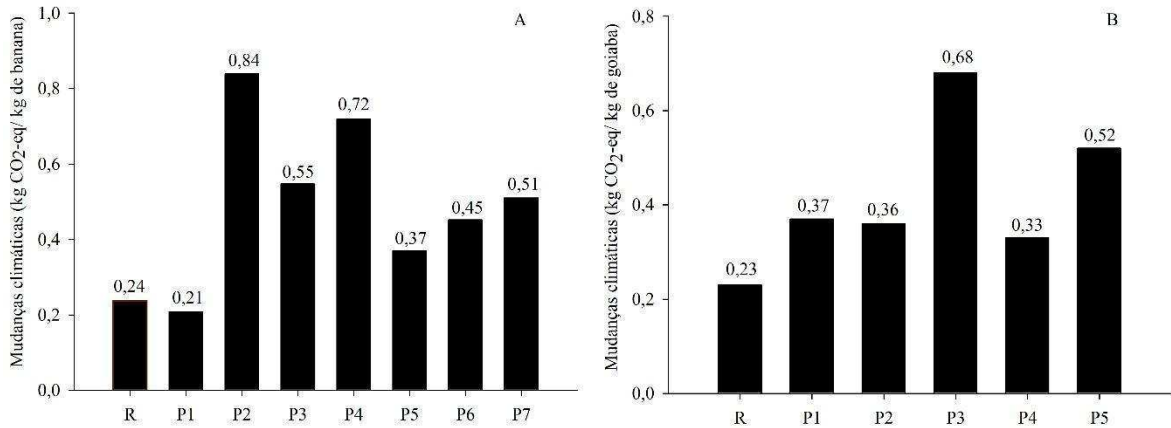
Cada planta tem um potencial de sequestro de carbono, uma vez que esse elemento é um componente estrutural da biomassa (Zhou *et al.*, 2022). Quando se aumenta a quantidade de plantas por hectare, conseqüentemente, o estoque de carbono da área tende a ser maior, como indicado por resultados semelhantes encontrados por Sampaio *et al.* (2021) em fazendas com maior densidade de plantio na cultura do coco, que também obtiveram menores emissões de CO₂ devido à mudança do uso da terra.

A goiabeira apresentou menor emissão de carbono, quando comparada com a cultura da bananeira (APÊNDICE B). Isso ocorre porque essa cultura é considerada uma árvore de pequeno porte, ou seja, mais lenhosa que a bananeira, que tem crescimento herbáceo. A complexidade estrutural da goiabeira permite um maior armazenamento de carbono, resultando em emissões de CO₂ reduzidas nos pomares (Ali *et al.*, 2022).

6.2 Pegada de carbono

Na figura 5 são apresentados os resultados da pegada de carbono dos produtos banana e goiaba, considerando a unidade funcional de 1kg, para todas as propriedades visitadas em comparação com o inventário de referência da região em estudo. Para a banana (Figura 5A), apenas a P1 teve impacto menor (0,21 kg CO₂eq kg⁻¹) que o de referência (0,24 kg CO₂eq kg⁻¹); as demais propriedades variaram entre 0,37-0,84 kg CO₂eq kg⁻¹. Em relação à goiaba (Figura 5B), todas as propriedades estudadas obtiveram maior impacto, variando entre 0,33-0,68 kg CO₂eq kg⁻¹, quando comparadas ao de referência (0,23 kg CO₂eq kg⁻¹).

Figura 5 - Pegada de carbono para 1 quilograma de banana (A) e de goiaba (B) por propriedade comparado com o inventário de referência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fatores que contribuíram no maior impacto por cada propriedade estudada, quando comparados com referência, foram o maior uso de nitrogênio (P4, P5 e P6 de banana e P1, P2 e P5 de goiaba), consumo de energia elevado (todas as propriedades, em ambos os produtos) e baixa produtividade (P2, P3, P4, P5 e P7 para banana e P3 e P5 na goiaba).

O elevado consumo de energia contribui significativamente para emissões de CO₂, assim como o uso e produção do nitrogênio, que tem participação direta na emissão de N₂O e CO₂ para o ar, gerando conseqüentemente, maior impacto nas mudanças climáticas (Chopra *et al.* 2022; Coltro; Karaski 2019).

A propriedade 1 de banana, teve a maior produtividade dentre as propriedades avaliadas, apresentou, conseqüentemente, menor impacto nas mudanças climáticas, mostrando que a produtividade elevada é uma das saídas para mitigação dos impactos. Segundo Kinley *et al.* (2020), o setor agrícola precisa melhorar sua eficiência de produção para reduzir suas contribuições na pegada de carbono.

Outro ponto importante, é a quantidade de nitrogênio utilizada pelas propriedades, onde a maioria teve consumo superior em comparação com o inventário de referência. Segundo Gomes da Silva *et al.* (2020), o aumento na quantidade de agroquímicos usados pode elevar significativamente a pegada de carbono. Wu *et al.* (2021) retratam que, para melhorar a eficiência na pegada de carbono do algodão da China, a saída é diminuir o uso de fertilizantes inorgânicos. Martin-Gorriz *et al.* (2020), ao estudar culturas lenhosas e hortícolas, destacou que

a maior pegada de carbono nas lenhosas era devido ao fato de consumirem maior quantidade de energia, fertilizantes e pesticidas.

Carneiro *et al.* (2019), ao trabalhar com a cultura da manga no Brasil, utilizando a metodologia do IPCC (2007), obteve impacto de 0,13 kg CO₂eq kg⁻¹, quantidade inferior aos encontrados neste estudo, com a mesma metodologia (IPCC, 2007), em que o impacto da bananeira variou entre 0,21-0,87 kg CO₂eq kg⁻¹ e da goiabeira 0,23-0,71 kg CO₂eq kg⁻¹.

Ao comparar as culturas investigadas neste estudo, é possível notar que as propriedades produtoras de goiaba tiveram menores impactos nas mudanças climáticas (em média 0,4 kg CO₂eq kg⁻¹), quando comparado com os impactos gerados pelas propriedades de produção de banana (0,5 kg CO₂eq kg⁻¹). A quantidade de nitrogênio utilizado nas propriedades com produção da bananeira (238,6 kg ha⁻¹ de N em média) é superior à das propriedades de goiabeira (137,2 kg ha⁻¹ de N em média). O nitrogênio tem participação direta nas emissões de gases do efeito estufa, como o CO₂ e N₂O para o ar, fazendo com que os impactos na pegada de carbono da bananeira sejam maiores (Chopra *et al.*, 2022).

Além disso, a goiabeira, por ser lenhosa, apresenta característica estrutural que permite maior sequestro de carbono; conseqüentemente, seus impactos nas mudanças climáticas são atenuados. Segundo Ortiz-Ulloa *et al.* (2021), a bananeira também possui grande quantidade de carbono em sua estrutura, principalmente, devido à quantidade de biomassa. Porém, os resultados deste estudo mostram que a goiabeira acabou mitigando de forma mais significativa as mudanças climáticas, devido à sua capacidade de sequestrar carbono, mesmo com uma quantidade de plantas/hectare sendo menor em comparação com a bananeira. Isso ocorre porque a goiabeira se apresenta como uma árvore frutífera, que, de acordo com Rathore *et al.* (2018), tem grande capacidade de atuar como um pomar sumidouro de carbono, enquanto a bananeira é herbácea e não possui partes lenhosas.

Ao considerar apenas a bananeira e comparar com outro trabalho realizado no Brasil, o estudo de Coltro e Karaski (2019), que abordou a bananeira prata e cavendish no Estado de São Paulo e Minas Gerais, encontrou uma pegada de carbono de 0,21 kg CO₂-eq kg⁻¹ para prata, enquanto a cavendish teve um impacto de 0,23 kg CO₂-eq kg⁻¹. Esses impactos foram inferiores ao deste estudo, exceto para a propriedade 1. Vale ressaltar que o estudo em questão não levou em consideração a mudança do uso da terra.

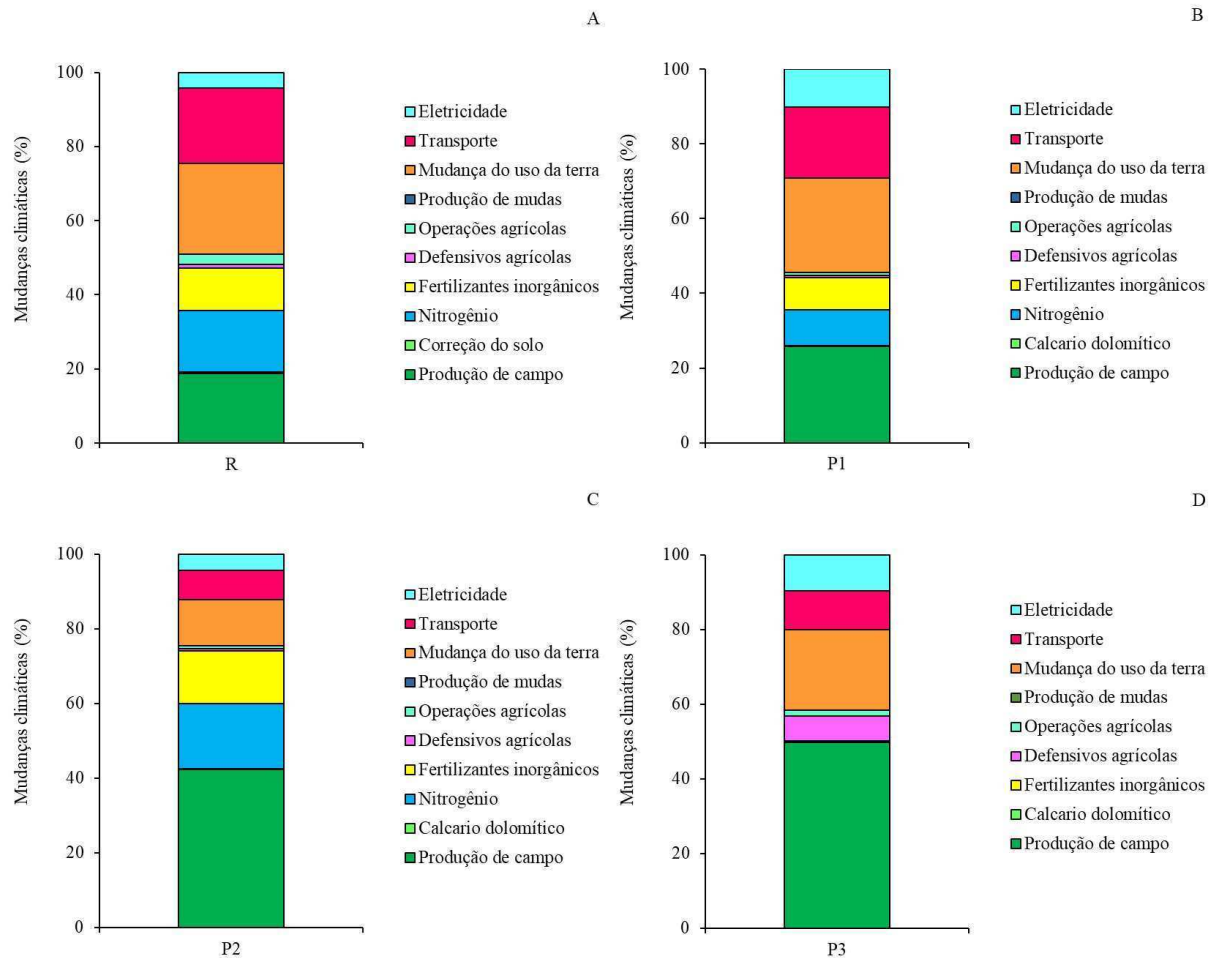
As contribuições dos insumos usados por cada produtor na cadeia produtiva da bananeira e da goiabeira são apresentadas na Figura 6, 7 e 8. A produção de campo, o transporte de insumos e produtos, especialmente fertilizantes inorgânicos, nitrogênio, e a energia são os

processos que mais contribuíram para as mudanças climáticas, tanto na referência quanto nas propriedades estudadas de ambas as culturas.

Para a bananeira, no inventário de referência as maiores contribuições foram: mudança do uso da terra (24,37%), transporte de insumos e produtos (20,46%), produção de campo (18,80%), produção de fertilizantes inorgânicos (11,31%), especialmente nitrogênio (16,72%) e eletricidade (4,19%). Na propriedade 1 de banana, as porcentagens de contribuições foram: 25,19% para mudança do uso da terra, 25,7% na produção de campo, 19,08% no transporte de insumos e produtos, 8,68% para os fertilizantes inorgânicos, 9,73% para a produção de fertilizante nitrogenado e 10,08% para a eletricidade.

Para propriedade 2, a produção de campo contribuiu com 42,3%, mudança do uso da terra teve contribuição de 12,36%, o transporte de insumos e produtos 7,85%, a produção de fertilizante nitrogenado 17,43% e a eletricidade 4,32%. A propriedade 3 teve a produção de campo com 49,7%, mudança do uso da terra 21,38%, o transporte de insumos e produtos 10,40% e a eletricidade 9,75%.

Figura 6 - Contribuições dos processos realizados na produção de 1 quilograma da banana nas mudanças climáticas de referência - R (A) e das propriedades estudadas - P1 (B), P2 (C) e P3(D)

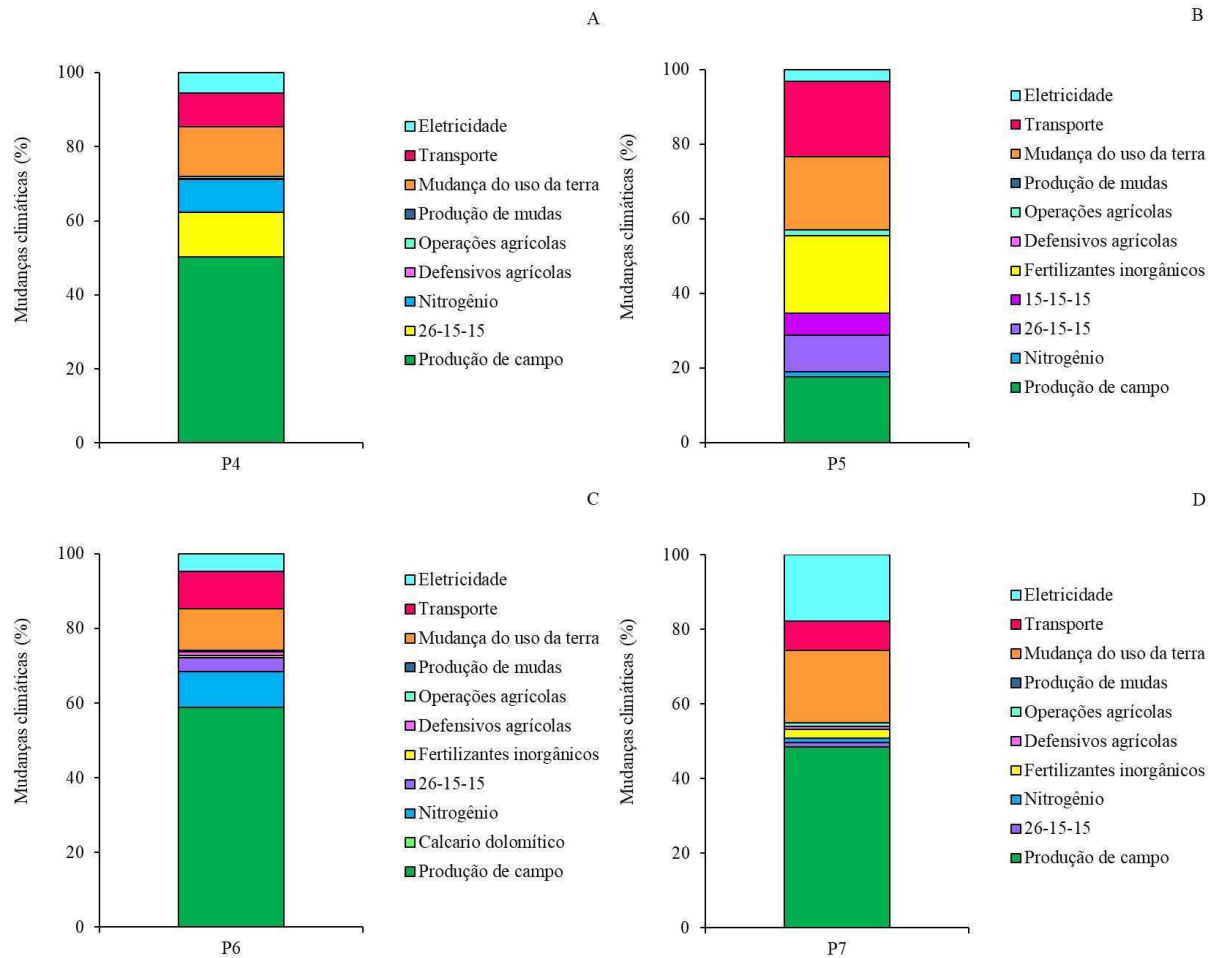


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação às demais propriedades de banana (P4, P5, P6 e P7), é possível verificar as contribuições na figura 7. Na P4, houve maior impacto da produção de campo com 50,2%, seguido pela mudança do uso da terra com 13,30%, transporte de insumos e produtos com 9,17%, produção de fertilizantes inorgânicos com 20,91% e eletricidade com 5,53%. Para a P5, a mudança do uso da terra teve maior contribuição com 19,67%, seguida pela produção de campo com 17,7%, transporte de insumos e produtos com 20,12%, produção de fertilizante inorgânico com 11,05% e eletricidade com 3,23%.

Os processos com maiores contribuições para a propriedade 6 foram: Produção de campo (58,8%), mudança do uso da terra (11,01%), transporte de insumos e produtos (10,14%), produção de fertilizante nitrogenado (9,56%) e eletricidade (17,74%). Por fim, a propriedade 7 teve a produção de campo contribuindo com 48,4%, a mudança do uso da terra com 19,50%, transporte com 7,91% e a eletricidade com 17,74%.

Figura 7 - Contribuições dos processos realizados na produção de 1 quilograma da banana nas mudanças climáticas dos produtores estudados - P4 (A), P5 (B), P6 (C) e P7 (D)



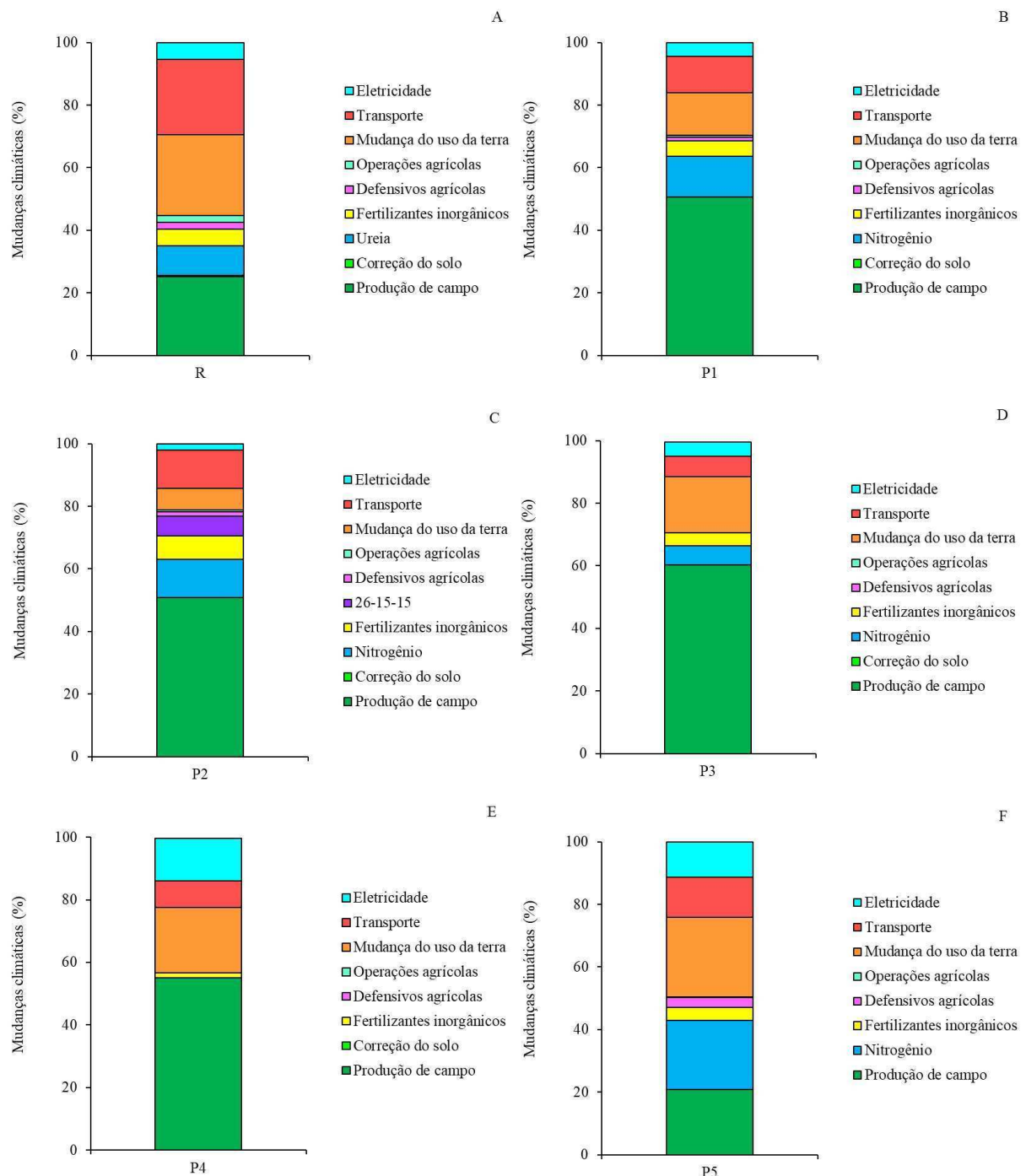
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 08, é possível observar as contribuições dos processos utilizados na cadeia produtiva da goiabeira. No Inventário de referência (R), as contribuições vieram da mudança do uso da terra (25,93%), produção de campo (25,19%), transporte de insumos e produtos (24,04%) e produção da ureia (9,47%). A propriedade P1 apresentou maiores porcentagens na produção de campo (50,53%), mudança do uso da terra (13,62%), produção de fertilizantes nitrogenados (12,98%), transporte de insumos e produtos (11,60%), e eletricidade (4,42%). Para a P2, essas contribuições partiram da produção de campo (50,83%), produção de fertilizantes nitrogenados (12,28%), transporte (12,35%), e mudança do uso da terra (6,86%).

A propriedade 3 teve a produção de campo (60,20%), mudança do uso da terra (17,96%), e produção de fertilizantes nitrogenados (6%) com maiores contribuições. Já a P4 teve os processos de produção de campo (55,06%), mudança do uso da terra (20,79%),

eletricidade (13,66%), e transporte de insumos e produtos (8,59%). Por fim, a propriedade 5 teve as contribuições mais significativas de produção de campo (20,82%), mudança do uso da terra (25,36%), produção de fertilizantes nitrogenados (22,04%), transporte de insumos e produtos (12,94%), e a eletricidade (11,24%).

Figura 8 - Contribuições dos processos realizados na produção de 1 quilograma da goiaba nas mudanças climáticas de referência - R (A) e das propriedades estudadas - P1 (B), P2 (C), P3(D), P4 (E) e P5 (F)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa contribuição significativa da produção de campo, em ambas as culturas estudadas, está associada às emissões N₂O e CO₂ devido ao uso de fertilizantes nitrogenados e calcário. Coltro e Karaski (2019) tiveram resultados semelhantes ao deste estudo, onde a produção de campo teve impacto de 54%.

Os processos de produção dos agroquímicos, como fertilizantes inorgânicos, acarretam emissões para o ar, influenciando diretamente nas mudanças climáticas. Segundo Sampaio *et al.* (2018), ao trabalhar com fazendas produtoras de coco em diferentes estados, a fazenda localizada em Alagoas teve menor impacto nas mudanças climáticas porque utilizou uma menor quantidade de agroquímicos, reduzindo assim as emissões e, conseqüentemente, os impactos de campo. Figueirêdo *et al.* (2016), ao trabalhar com a cultura do caju, descreveu que para melhorar o desempenho ambiental dessa cultura no Brasil, é necessário reduzir a utilização de agroquímicos.

Tanto as propriedades com sistema de produção da bananeira quanto as de goiabeira apresentaram alta contribuição da eletricidade nas mudanças climáticas. O consumo excessivo de água, quando acima do ideal, afeta não só a escassez hídrica, mas também a pegada de carbono, uma vez que o sistema de irrigação demanda eletricidade para bombeamento de água. Todas as propriedades estudadas, em ambas as culturas, apresentaram um uso exacerbado da água na irrigação (tópico 6.3.1), aumentando o consumo de kwh, conforme observado no cultivo do trigo irrigado (Rafiee *et al.*, 2022). A geração dessa energia resulta em emissões elevadas de carbono para o ar, conforme relatado por Šarauskis *et al.* (2018).

A adoção de práticas de manejo mais eficientes no sistema de irrigação e estratégias como a cobertura morta podem aprimorar a eficiência do uso da água, reduzindo o uso de eletricidade, como destacado por Chen *et al.* (2021). Como evidência disso, temos o inventário de referência com a média do Baixo Jaguaribe, onde o uso de água foi menor (tabela 5), e, portanto, a contribuição da eletricidade também foi menor.

O transporte (tkm) dos agroquímicos da unidade de origem para a propriedade e da produção das culturas para CEASA também teve impacto significativo na pegada de carbono. O deslocamento dessas mercadorias por via rodoviária demanda uma grande quantidade de diesel, fazendo com que a queima desse combustível aumente as emissões dos gases do efeito estufa (Adewale *et al.*, 2019). Além disso, o tipo de caminhão escolhido (apresentado no ANEXO B) e as etapas de produção desse caminhão também vão influenciar nessas emissões.

Uma pesquisa realizada por Bell e Horvath (2020) com a cultura da laranja apresentou resultados que corroboram com este estudo. Segundo os autores, o transporte teve impacto significativo, variando de 4% a 54% na pegada de carbono da laranja.

Outro ponto que merece destaque é a mudança do uso da terra (MUT). Ambas as culturas apresentaram variações nas porcentagens de contribuição, variando entre 6,86-25,93% para a goiabeira e 11,01-25,19% na bananeira. Diversos estudos voltados para a MUT demonstram a eficiência das florestas nativas em sequestrar CO₂ e os impactos causados ao retirá-las para implantação de áreas agrícolas (Song *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

Além das emissões de CO₂, é possível verificar também emissões significativas de outros gases do efeito estufa devido à mudança do uso da terra. O monóxido de carbono (CO) é liberado pela queima da biomassa (Mgalula *et al.*, 2021), enquanto o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) apresentam impactos 23 e 296 vezes maiores que o CO₂, respectivamente (IPCC, 2007; Feng *et al.*, 2022).

Alguns trabalhos realizados no Brasil e no mundo mostram que a mudança do uso da terra tem influência significativa nas mudanças climáticas. Escobar *et al.* (2020) relata que todos os estados exportadores de soja no Brasil mostraram que essa categoria teve um impacto médio de 36% em média entre os anos de 2010-2015.

Yang *et al.* (2023), ao avaliar as emissões de gases do efeito estufa na China nos últimos 300 anos, concluiu que a mudança do uso da terra tem impactado o país de forma significativa nesse recorte de tempo. Segundo o autor, nesse mesmo tempo, as lavouras aumentaram sua área em 67,11 milhões de hectares, enquanto as florestas reduziram 127,96 milhões de hectares.

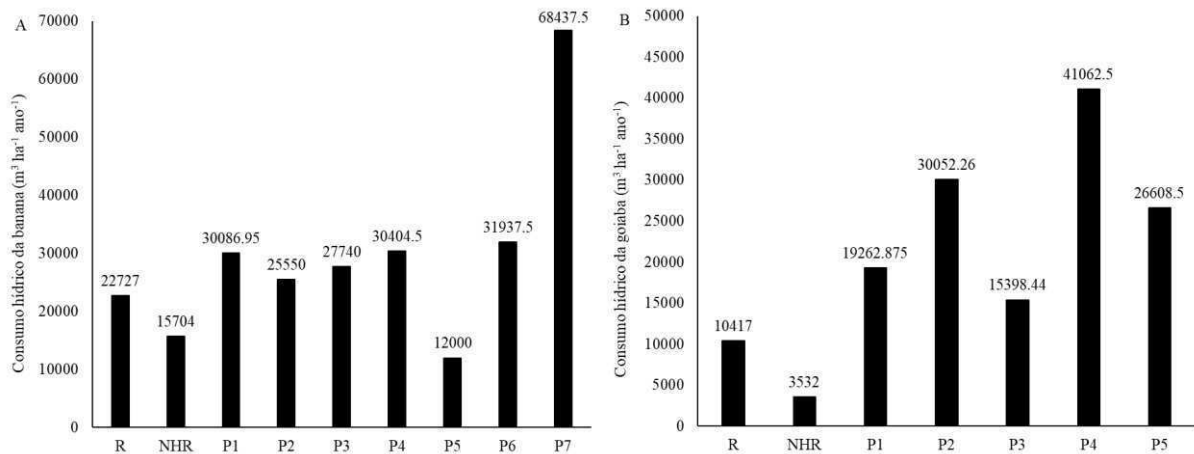
6.3 Pegada de escassez hídrica

6.3.1 Pegada de escassez hídrica da região

A quantidade de água aplicada nas propriedades estudadas e a média de água média usada no inventário de referência são muito superiores à necessidade hídrica real (NHR), tanto na bananeira (Figura 9A), exceto o P5, como na goiabeira (Figura 9B). Destacam-se, principalmente, a propriedade 7 na bananeira e a propriedade 4 na goiabeira, ambas apresentando a maior lâmina de água aplicada.

O uso exacerbado de água nas propriedades está diretamente ligado à falta de manejo do sistema de irrigação. Segundo os entrevistados, o sistema apresenta algumas falhas no campo, reduzindo assim a sua eficiência. Como resultado, eles acabam aplicando mais água que o ideal. Xu *et al.* (2019), ao estudar a pegada hídrica azul (demanda de água) em uma região importante na produção agrícola da China, percebeu que a eficiência do sistema de irrigação estava diretamente ligada a redução da lâmina bruta necessária.

Figura 9 - Comparação das lâminas de água aplicadas nas propriedades de bananeira (A) e de goiabeira (B) estudadas, necessidade hídrica real (NHR) e a do inventário de referência (R)



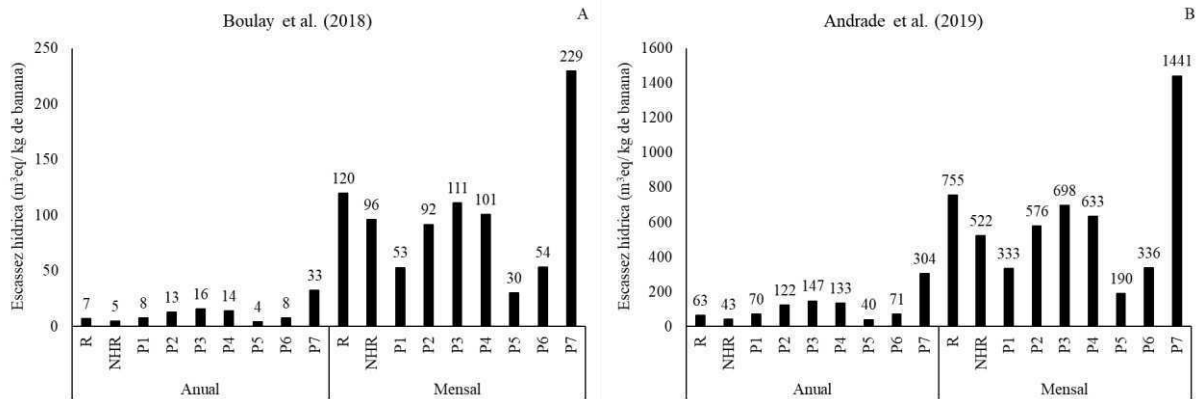
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação no impacto da pegada de escassez hídrica da bananeira entre os produtores estudados, a necessidade hídrica real (NHR) das culturas e a média do inventário de referência (R), observou-se que a maioria das propriedades estudadas, cujo produto era a banana (Figura 10), obtiveram impactos maiores na pegada de escassez hídrica por unidade funcional. Na bananeira, quando avaliada pelo FC anual, apenas a P5 teve impacto menor na pegada de escassez, cerca de 50% quando comparado por Boulay *et al.*, (2018) e 42,8% a menos, utilizando os fatores regionalizados de Andrade *et al.* (2019).

Quando avaliado pelo FC mensal, além da P5, que teve impacto menor em torno de 43,4% e 42,9%, para os FC de Boulay *et al.*, (2018) e Andrade *et al.*, (2019) respectivamente, as propriedades 6 e 1 obtiveram impactos 43,7% e 44,9% respectivamente menores por Boulay *et al.* (2018) e 35,63% e 36,20% respectivamente, para FC de Andrade *et al.* (2019), quando comparados com a NHR.

As demais propriedades e o inventário de referência, quando avaliadas pelo FC tanto anual, como mensal e comparadas com a NHR, mais que dobraram seus impactos, tanto pelos fatores globalizados (Boulay *et al.*, 2018), como os regionalizados (Andrade *et al.*, 2019).

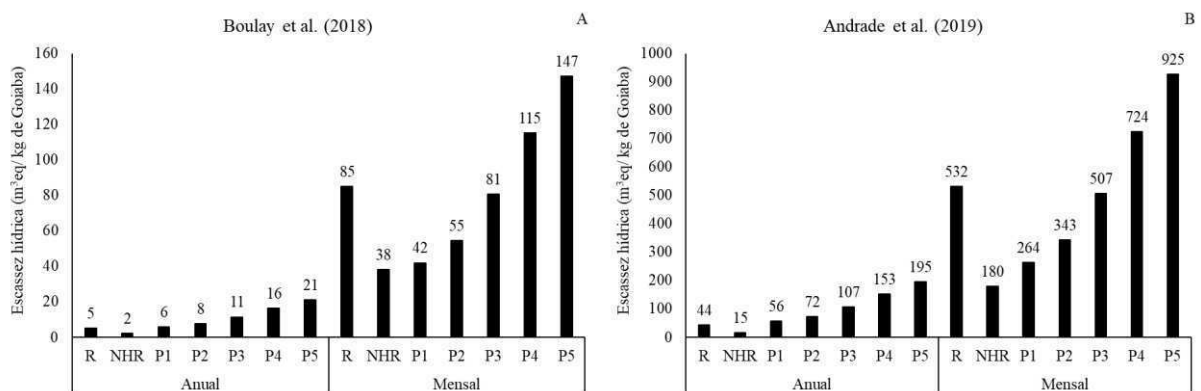
Figura 10 - Comparação no impacto da pegada de escassez hídrica da bananeira entre os produtores estudados, a necessidade hídrica real (NHR) e a média do inventário de referência (R)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na cultura da goiabeira (Figura 11), é possível observar a mesma tendência da bananeira, onde os impactos se encontram maiores nos FC regionalizados (Andrade *et al.*, 2019) e mensais. Porém, todas as propriedades (P1, P2, P3, P4 e P5) e o valor do inventário de referência da região (R) obtiveram impactos maiores, em média duas ou três vezes mais, na pegada de escassez hídrica, quando comparado com os impactos gerados pela necessidade hídrica real da cultura.

Figura 11 - Comparação no impacto da pegada de escassez hídrica da goiabeira entre as propriedades estudadas, à necessidade hídrica real (NHR) e a média do inventário de referência (R)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa diferença entre os impactos da pegada de escassez hídrica ao aplicar os fatores mensais, anuais, de Boulay *et al.* (2018) e os regionalizados por Andrade *et al.* (2019), onde o impacto se apresenta maior nos fatores regionalizados e mensais em ambas as culturas estudadas, deve-se ao fato de que os fatores regionalizados aumentam a sensibilidade dos cálculos para cada bacia do Brasil, demonstrando de forma mais efetiva a realidade hídrica da região em estudo. Carneiro *et al.* (2019) encontrou resultados semelhantes aos deste estudo quando investigou a cultura da manga, enquanto Sampaio *et al.* (2021) também constatou um aumento nos impactos ao utilizar FC regionalizados no trabalho com a cultura do coco.

Os fatores de caracterização mensais se apresentaram com impactos maiores em comparação aos FC anuais, uma tendência que se repete, tanto nos FC globalizados como nos regionalizados. Isso ocorre porque, o FC anual é apenas um, como observado na tabela 6. Já os FC mensais têm um para cada mês. Ou seja, o consumo hídrico de cada mês é multiplicado pelo seu respectivo FC, totalizando doze cálculos no caso do mensal e, após isso, são somados os impactos de cada mês.

Sampaio *et al.* (2021) ao trabalhar com a cultura do coco em quatro estados do Nordeste brasileiro, teve resultados com a mesma tendência deste estudo. Segundo os autores, os impactos do coqueiro na escassez hídrica eram maiores ao aplicarem os fatores mensais nos cálculos.

O maior impacto das propriedades que produzem banana e goiaba está ligado à falta de manejo citada anteriormente, onde os produtores acabam aplicando água de forma excessiva, influenciando, assim, no impacto da pegada de escassez hídrica. Associado a isto, é perceptível que as propriedades com maiores impactos também apresentam menores produtividades (APÊNDICE B). A produtividade da água, ou seja, a quantidade de água demandada por unidade produzida, é essencial para atenuar os impactos, sendo necessário melhorar a eficiência do uso da água.

Uma alternativa para reduzir a pressão sofrida pela agricultura, em relação ao consumo de água doce e, conseqüentemente, melhorar o impacto da pegada de escassez hídrica, é aumentar os rendimentos das culturas. Isso se apresenta como um desafio que o mundo todo tem enfrentado (Xu *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2014).

Outros estudos realizados para pegada de escassez hídrica mostram um impacto menor em comparação com as propriedades estudadas, tendência que se repete tanto para a bananeira quanto para a goiabeira. Sampaio *et al.* (2021), trabalhando com a cultura do coco

em diferentes estados brasileiros, encontrou um impacto de 0,332-0,758 m³ eq kg⁻¹ de coco. Carneiro *et al.* (2019), estudando a manga, identificou um impacto de 0,930 m³ eq kg⁻¹ de manga. Por fim, Olegário *et al.* (2022), que investigou a cultura do Cacau na Bahia, encontrou uma pegada de escassez de 646,5 m³ eq kg⁻¹ de cacau no interior do estado.

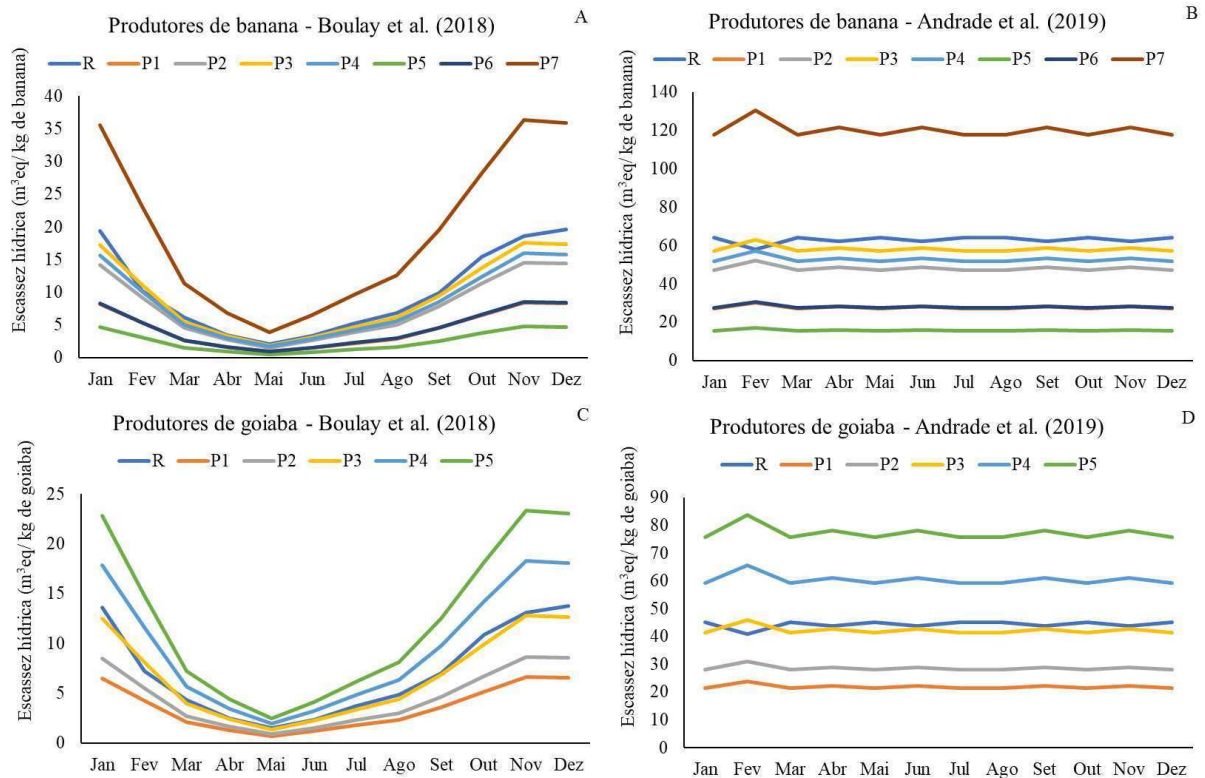
Sampaio *et al.* (2021) e Carneiro *et al.* (2019), ao trabalharem com frutíferas tropicais (coco e manga, respectivamente) em fazendas do Nordeste, tiveram resultados na pegada de escassez hídrica menores do que os observados para a bananeira e a goiabeira. Ambos os autores relatam em seus trabalhos, que as fazendas estão aplicando uma quantidade de água menor do que a necessidade hídrica calculada, com exceção da fazenda de coco na Bahia. Isso enfatiza que o melhor manejo da irrigação é capaz de reduzir os impactos na pegada de escassez hídrica.

O manejo mais eficiente da irrigação para coqueiros e mangueiras favoreceu a produtividade da água quando comparado com a bananeira e a goiabeira, conforme dados apresentados por Sampaio *et al.* (2021) e Carneiro *et al.* (2019). O coqueiro, em média de quatro fazendas, precisava de 0,23 m³/planta para produzir 1 kg de coco no ano, enquanto a mangueira necessitava de 0,33 m³/planta para produzir 1 kg de manga no ano.

Por outro lado, a bananeira, em média das 7 fazendas estudadas, precisava de 1,1 m³/planta para produzir 1 kg de banana no ano, e a goiabeira, média dos 5 produtores, requeria cerca de 1,06 m³/planta para produzir 1 kg de goiaba no ano. Esses resultados evidenciam que o coqueiro e a mangueira, além de ter um melhor manejo do sistema de irrigação, demandam uma menor quantidade de água para produzir 1 kg de fruta, em comparação com a bananeira e a goiabeira, que possuem baixa eficiência do uso da água e, conseqüentemente, os maiores impactos na pegada de escassez hídrica. Esses resultados corroboram com os apresentados por Xu *et al.* (2019), onde os autores afirmam que para reduzir a pegada de escassez hídrica é necessário melhorar o rendimento das culturas.

Na figura 12 é possível observar o comportamento da pegada de escassez hídrica das propriedades estudadas, de acordo com os meses do ano, tanto para a cultura da bananeira (figura 12A e 12B) quanto para a da goiabeira (figura 12C e 12D). Segundo Kaewmai *et al.* (2019), os fatores de caracterização mensais têm como função mostrar o comportamento da pegada de escassez hídrica de forma temporal, sendo possível perceber em quais meses a bacia da região sofre o maior impacto.

Figura 12 - Impacto da pegada de escassez hídrica das propriedades e inventário de referência para as culturas de banana (A e B) e goiaba (C e D) de acordo com cada mês do ano



Fonte: Elaborado pelo autor.

A lâmina bruta de água para atender à demanda das culturas é diretamente influenciada pela PPE e ETo, onde nos meses de fevereiro a julho, observa-se um aumento na precipitação e uma redução da ETo, resultando na diminuição da demanda por água e consequentemente, na redução do impacto (Figura 12A e 12C). Entre os meses de agosto a janeiro, essa precipitação diminui, pois o Nordeste Brasileiro praticamente não apresenta chuva nesse período, e a ETo começa a aumentar, elevando a necessidade hídrica das culturas e, por conseguinte, o impacto na pegada de escassez.

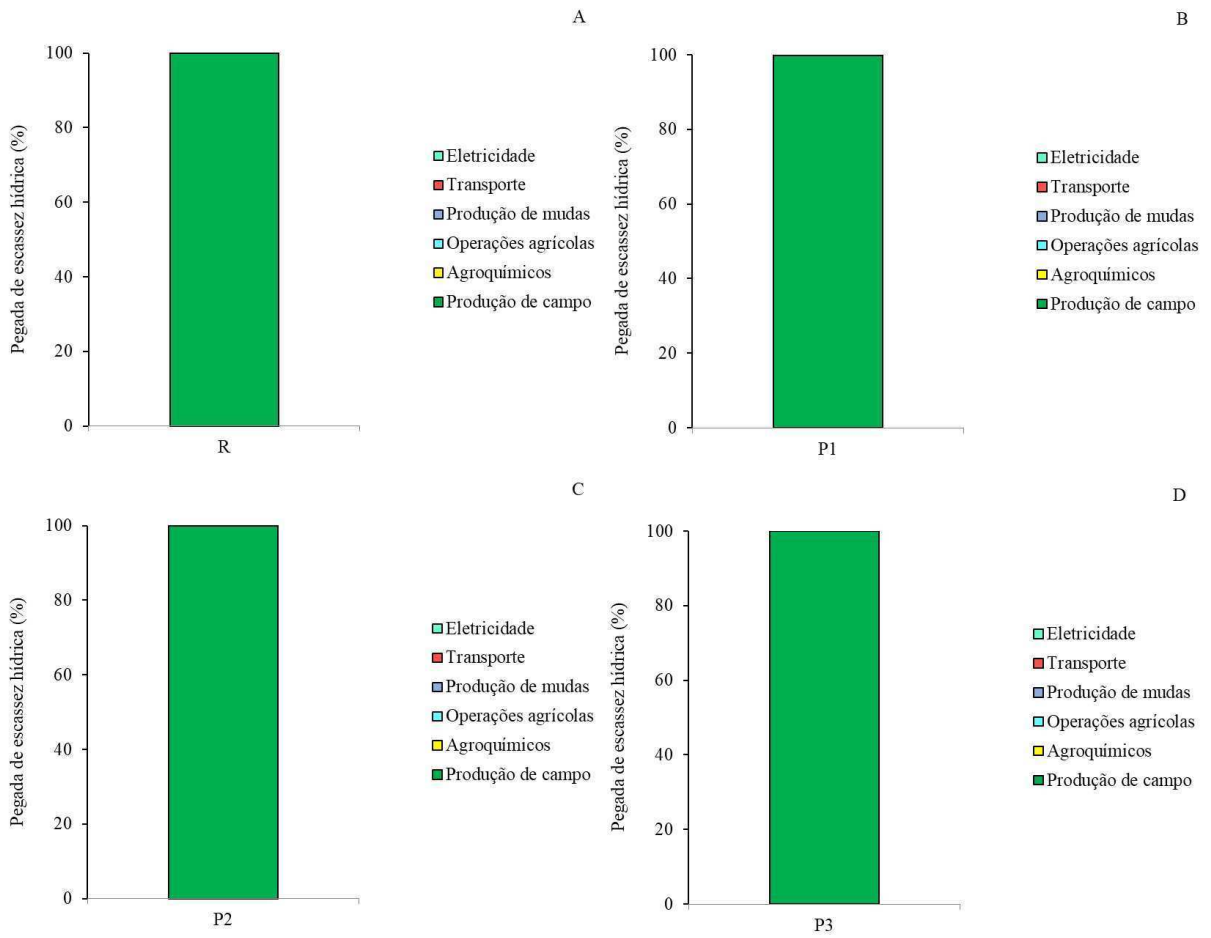
Como característica do Nordeste Brasileiro, as chuvas são irregulares e mal distribuídas, ocorrendo em sua maioria nos primeiros meses do ano e encerrando em julho. Com isso, a lâmina aplicada entre fevereiro e julho tende a ser menor, resultando em um impacto reduzido conforme o tempo avança, a chuva diminui, contribuindo para o aumento da pegada de escassez hídrica (Rocha *et al.*, 2021). Ma *et al.* (2020), ao estudar a escassez de água na China, teve resultados semelhantes ao deste estudo, destacando que em meses com baixo índice de precipitação, as bacias sofrem com escassez hídrica.

A microrregião do Baixo Jaguaribe apresenta elevada escassez hídrica, evidenciada pelos FC mensais apresentados por Andrade *et al.* (2019) nas figuras 12B e 12D, os quais permanecem iguais em todos os meses do ano (tabela 6). Isso torna perceptível que as propriedades estudadas tendem a aplicar a mesma lâmina de água em todos os meses do ano, fazendo com que, o impacto na pegada de escassez hídrica seja quase que contínuo, inclusive na quadra chuvosa.

Este resultado comprova mais ainda a falta de manejo nos sistemas de irrigação nas áreas estudadas, tanto para banana quanto para a goiaba. Estudos como o de Beltrão Júnior *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2019) mostram a necessidade crescente de buscar o uso sustentável da água pela agricultura em regiões semiáridas, enfatizando que isso deve passar diretamente pelos manejos dos sistemas de irrigação.

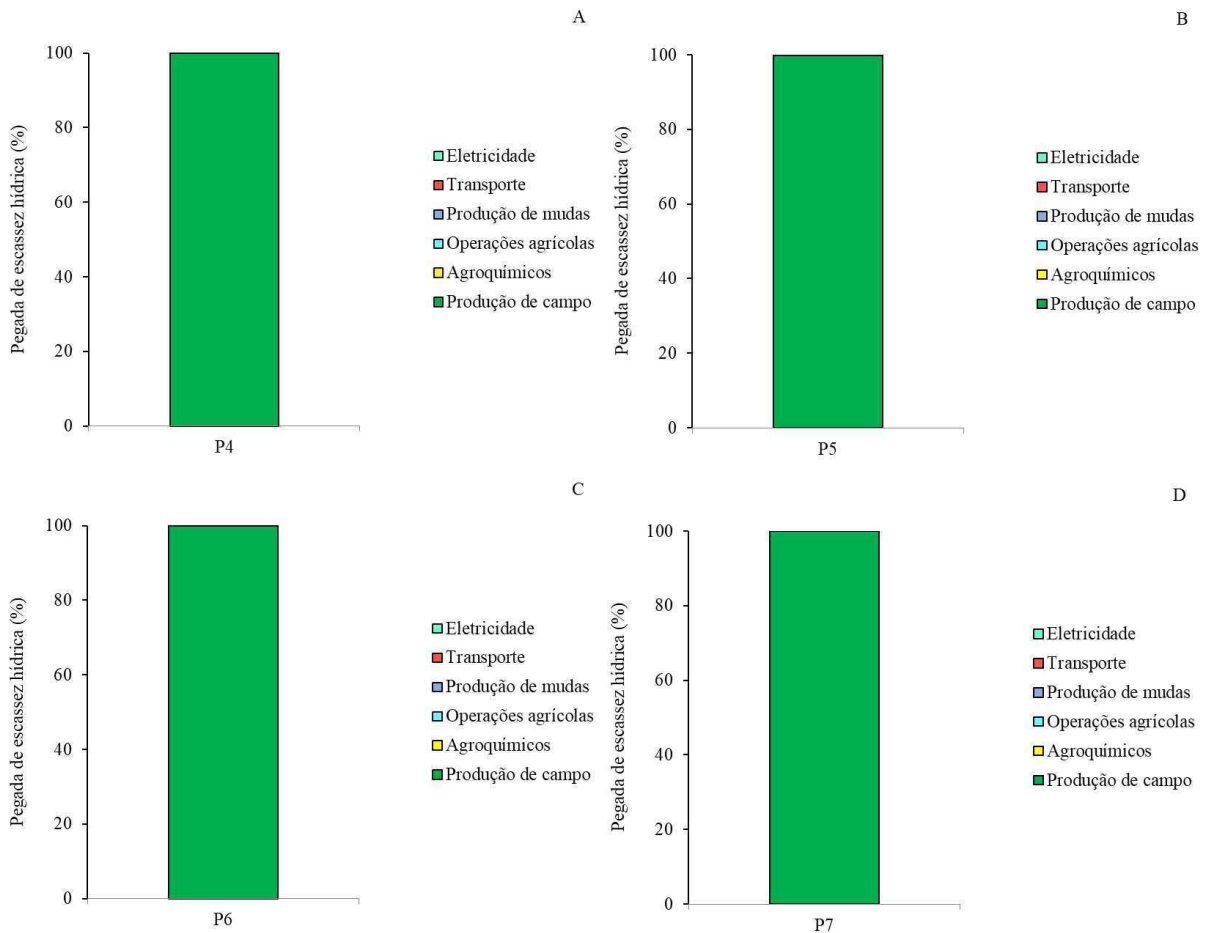
As figuras 13 e 14 apresentam a contribuição de cada processo usado na cadeia produtiva da bananeira para a pegada de escassez hídrica das propriedades e referência. É notório que a maior parte do impacto advém da produção de campo, tanto nas propriedades, quanto na referência, onde mais de 95% da contribuição provém da produção de campo.

Figura 13 - Contribuições dos processos produtivos da bananeira na pegada de escassez hídrica, tanto no inventário de referência (A) como das propriedades estudadas (B, C e D)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Contribuições dos processos produtivos da bananeira na pegada de escassez hídrica das propriedades estudadas (A, B, C e D)



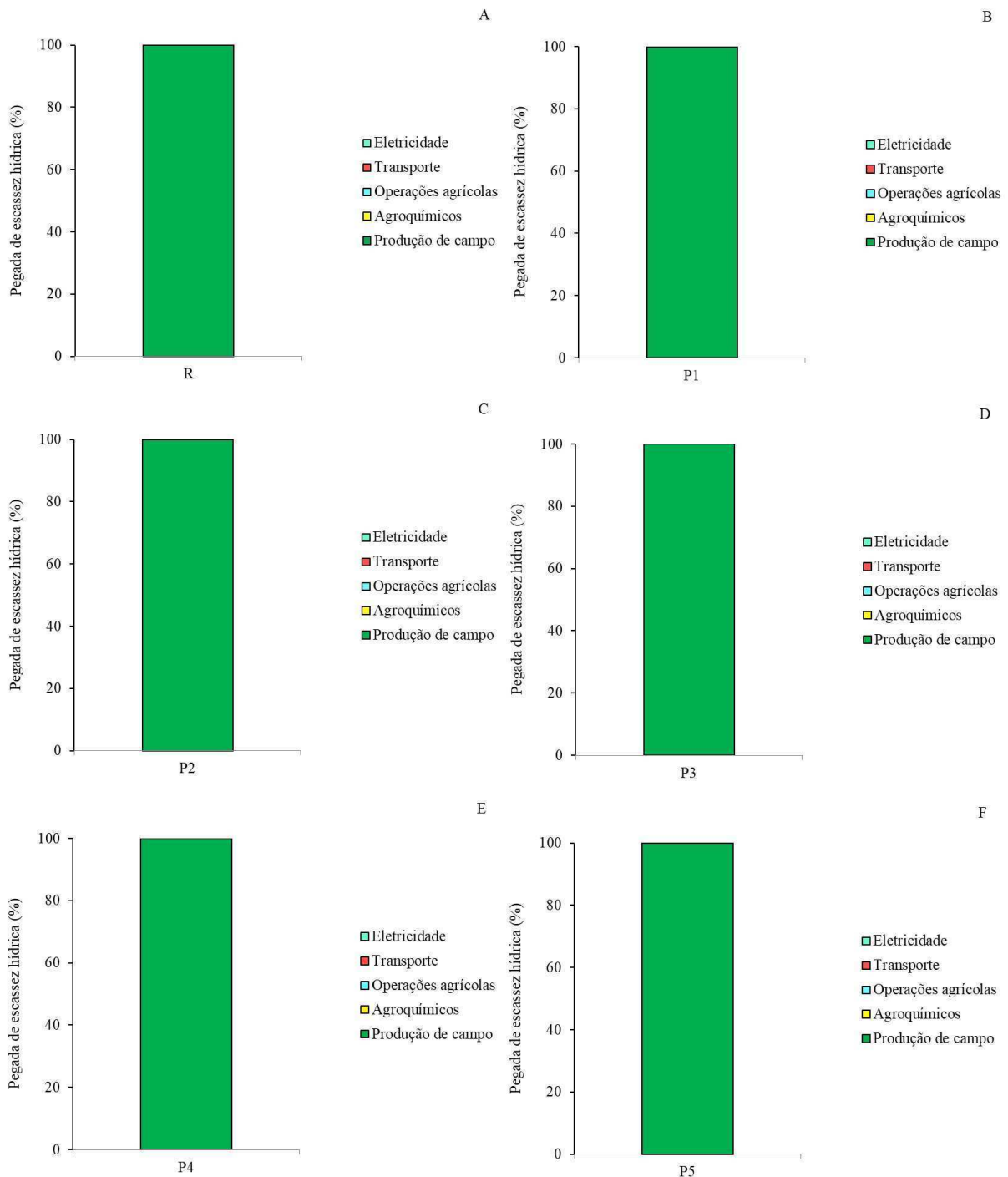
Fonte: Elaborado pelo autor.

As propriedades produtoras de goiaba, representadas na Figura 15, apresentaram a mesma tendência que as propriedades de banana. Nas duas culturas, as maiores contribuições para a pegada de escassez hídrica foram da produção de campo, tendência essa, que se repete para todos os produtores e a referência.

A produção de campo ter maior contribuição na pegada de escassez hídrica é um resultado esperado, tendo em vista que esse processo envolve a água que entra no sistema produtivo através da irrigação. Esse processo é o mais dominante no quesito uso dos recursos hídricos, dentro do setor agrícola, onde 70% da água doce captada dos reservatórios hídricos no mundo é destinada à agricultura irrigada (Galán-Martín *et al.*, 2017). Segundo o último relatório da Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), a extração de água para o setor agrícola teve um aumento de 2% nos últimos anos, chegando a 72%.

Li *et al.* (2020a), ao estudar a pegada de escassez hídrica no Nordeste da China, apresentou resultados semelhantes aos deste estudo. No Distrito de Irrigação do Rio Hulan o maior consumo de água e impacto na escassez foram atribuídos à irrigação. Outros trabalhos realizados no Brasil, Nicarágua, Colômbia, Honduras e Finlândia com a cultura do Café indicaram que a irrigação é a atividade mais impactante nessa categoria (Usva *et al.*, 2020).

Figura 15 - Contribuições dos processos produtivos da goiabeira na pegada de escassez hídrica, tanto no inventário de referência (A) como das propriedades estudadas (B, C, D, E e F)



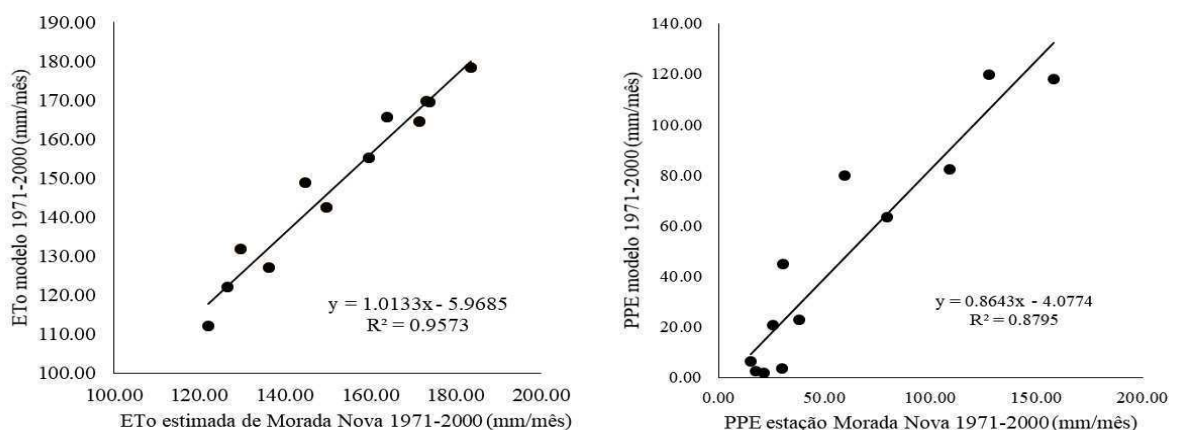
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2 Pegada de escassez hídrica futura

Conforme metodologia item (5.2.1.5) foi realizada uma adequabilidade de uso dos dados estimados por Gondim *et al.* (2018), provenientes do modelo CCSM4 para o período de 1971-2000, na Mesorregião do Jaguaribe. O objetivo era verificar se esses dados representam adequadamente a climatologia da microrregião do Baixo Jaguaribe. A validação foi conduzida por meio de uma regressão com dados da estação de Morada Nova (localizada dentro do Baixo Jaguaribe, conforme apresentado na Figura 3) durante o mesmo recorte histórico de 1971-2000, exceto o ano de 1972, cujos dados foram considerados do CRU.

Os resultados podem ser verificados na figura 16, onde a evapotranspiração de referência apresentou um R^2 de 95,7% (Figura 16A) e a precipitação efetiva teve o R^2 de 87,9% (Figura 16B). Esses valores indicam que os dados do modelo representam de maneira satisfatória o que acontecia na microrregião de estudo, podendo assim ser utilizado. Além disso, acredita-se que se o modelo representa bem o que estava acontecendo no recorte de 1971-2000, assumindo assim, que ele também seja adequado para simulações futuras das condições da PPE e ETo.

Figura 16 - Regressão para validação dos dados de base climática do modelo CCSM4



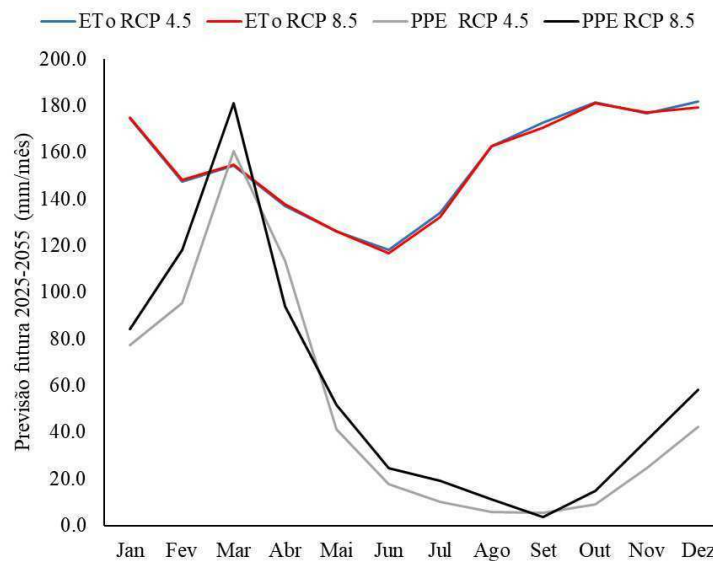
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 17, é possível observar as variações dos dados de ETo e PPE estimadas por Gondim *et al.* (2018) usando o modelo CCSM4 para 2025-2055. Segundo os dados do autor, a ETo não varia muito de acordo com os cenários, sendo ele de forçamento radioativo

(RCP 8.5) ou o cenário de estabilização (RCP 4.5). No entanto, ao observar os dados de precipitação efetiva, é possível identificar que no cenário RCP 4.5 tem-se uma redução na precipitação efetiva. Em contrapartida, no RCP 8.5, a maioria dos meses apresenta uma concentração maior de chuvas.

Segundo Gondim *et al.* (2018), a metodologia para precipitação segue sendo muito debatida por apresentar algumas incertezas climatológicas. No entanto, é perceptível um leve aumento na precipitação total, refletindo na precipitação efetiva. Porém, segundo o autor, esse aumento ainda não é suficiente para atender a demanda de água na agricultura. Alguns modelos de previsão futura têm apontado projeções de aumento na precipitação em outras regiões do globo (Tan *et al.*, 2017; Resende *et al.*, 2019).

Figura 17 - Comparação da ETo e PPE futura estimada pelo modelo CCSM4 para dois cenários do IPCC



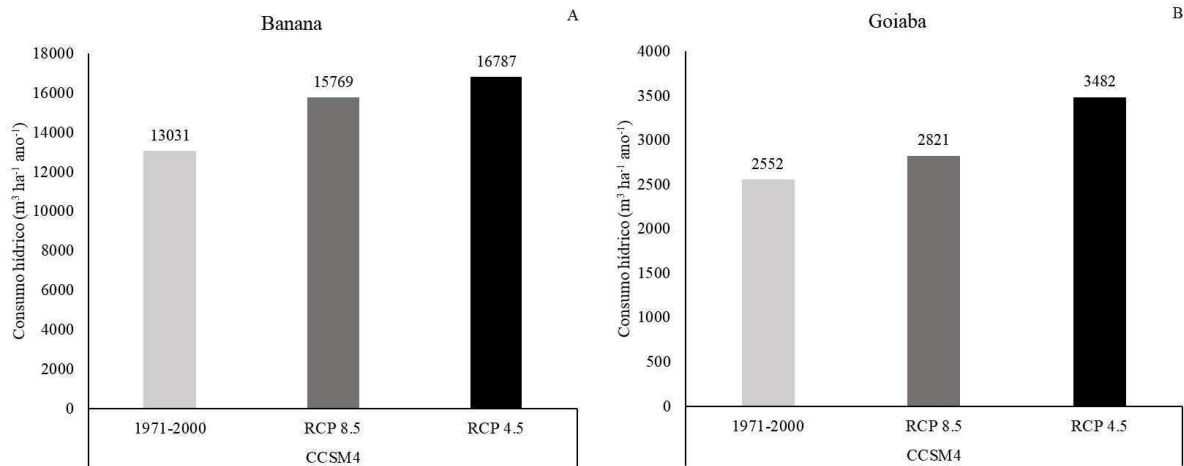
Fonte: Gondim *et al.* (2018).

Na figura 18, é possível observar a demanda hídrica das duas culturas em relação aos dois cenários futuros e compará-los com o cenário de base do modelo, representando a série histórica 1971-2000. A necessidade hídrica da banana (Figura 18A) e da goiaba (Figura 18B) tende a aumentar com passar dos anos. O cenário RCP4.5 apresenta maior lâmina bruta no futuro para ambas as culturas estudadas, com um aumento de 28,8% para banana e 36,44% para a goiaba. Enquanto isso, o cenário RCP8.5 teve aumento de 21% e 10,5%, respectivamente.

Os dois cenários futuros mostram um aumento significativo na demanda por água para banana e goiaba. Esse resultado já era esperado, pois o aumento populacional, associado à

necessidade de aumentar a produção e as mudanças climáticas, tendem a elevar a demanda por água na agricultura. Alguns estudos com o objetivo de estimar essa demanda hídrica já apresentam resultados semelhantes a este (Ayt Ougougdal *et al.*, 2020; Kumilachew; Hatiye, 2022).

Figura 18 - Comparação da demanda hídrica entre os cenários do modelo CCSM4

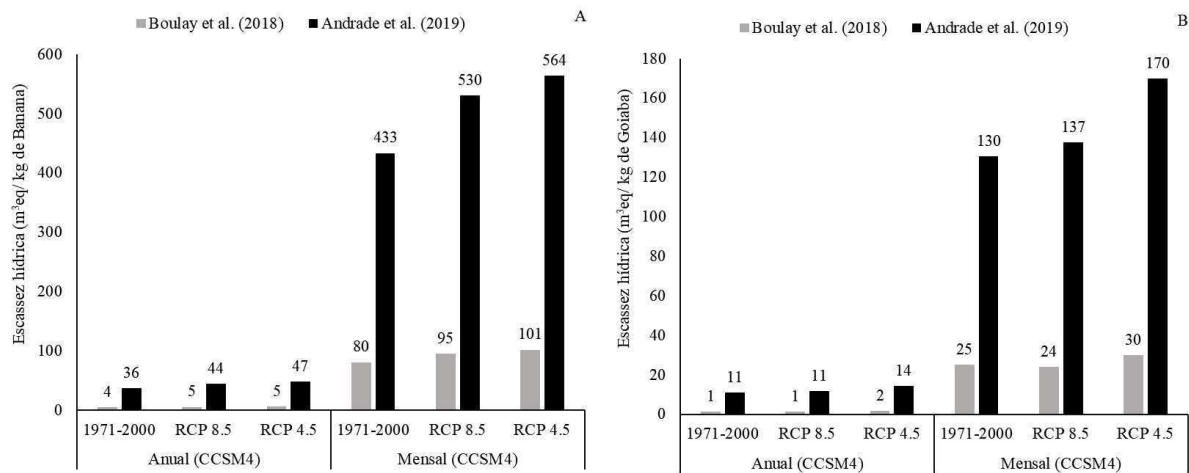


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 19, observa-se que a pegada de escassez hídrica futura tende a ser maior em ambos os cenários estudados (RCP 4.5 e RCP 8.5) quando comparada aos dados de base do modelo (1971-2000), com impacto maior mensal se comparado com o anual. O cenário de maior impacto é o RCP 4.5, que aumentou cerca de 30,5% anualmente e 30,3% mensalmente na cultura da banana (Figura 19A), enquanto na goiaba (Figura 19B) houve um aumento de 27,3% anualmente e 30,2%. Como mostrado na figura 12, o cenário RCP8.5 apresenta aumento na precipitação futura, o que resultou em um impacto menor desse cenário quando comparado com RCP4.5.

Na literatura hoje, é possível encontrar diversos trabalhos científicos que confirmam o aumento da temperatura no Brasil e no mundo devido ao aumento na emissão dos gases do efeito estufa, que conseqüentemente tem gerado aceleração nas mudanças climáticas. Com essa elevação da temperatura, é normal que a demanda hídrica das culturas aumente, tendo em vista que a evapotranspiração se intensificará, sendo esse o principal motivo para o maior impacto na pegada de escassez hídrica nos cenários futuros quando comparados com o cenário de base (Silva *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2021; Mohammed; Hassan, 2022).

Figura 19 - Comparação entre os cenários do modelo CCSM4 no impacto da pegada de escassez hídrica das culturas



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.3 Comparação entre as pegadas de escassez hídrica atual (tópico 6.3.1) e futura (tópico 6.3.2)

A comparação das pegadas de escassez hídrica das propriedades estudadas com os potenciais impactos para 2025-2055, calculados através dos dados climáticos estimados pelo modelo CCSM4 no trabalho de Gondim *et al.* (2018), e com potencial impacto da demanda hídrica atual das culturas, calculada considerando a série histórica (1991-2022), tem como objetivo verificar se a pegada de escassez hídrica para a situação climática atual na Sub-bacia do Baixo Jaguaribe está próxima ou já superou a pegada de escassez hídrica futura.

Para os fatores globalizados (Boulay *et al.*, 2018) na cultura da bananeira, é perceptível que as pegadas de escassez futura (Figura 19A) já estão próximas de serem ultrapassadas quando comparadas com a NHR atual (recorte 1991-2022), onde os impactos anuais encontram-se iguais, assim como os impactos mensais ao comparar a NHR com RCP8.5, enquanto o RCP4.5 teve impacto maior em 5,21%.

Em relação aos fatores de caracterização regionalizados por Andrade *et al.* (2019), os potenciais impactos do recorte futuro 2025-2055 encontram-se maiores. Anualmente, o RCP4.5 apresenta-se com impacto 9,3% maior, e o RCP8.5 2,3% maior que o impacto da NHR. Mensalmente, a tendência é a mesma, onde o RCP 4.5 tem potencial impacto 8,1% maior, enquanto o RCP 8.5 tem 1,53% maior que a necessidade hídrica real.

A estimativa realizada para o recorte de 2025-2050 é considerada um futuro próximo, justificando o fato de que esse impacto já está sendo quase ultrapassado. Segundo Malhi *et al.* (2021), as atividades humanas aumentaram as emissões dos gases do efeito estufa, intensificando as mudanças climáticas nos últimos anos e influenciando fatores como a temperatura. Consequentemente a necessidade hídrica das culturas tem se elevado. Estudos como o de Nashwan *et al.* (2019) em uma região árida do Egito, afirmam que a temperatura vem aumentando de forma significativa. Esse aumento anual considerável tem amplificado o problema de escassez hídrica, principalmente em regiões que já sofriam com essa problemática (Schilling *et al.*, 2020).

Para a cultura da goiabeira, segundo a estimativa realizada neste estudo, a produtividade futura da cultura tende a aumentar, fazendo com que a pegada de escassez hídrica seja amenizada e, consequentemente, o cenário do recorte histórico dos últimos 30 anos (1991-2022) teve maior impacto.

Para os fatores de caracterização globalizados e anuais, os potenciais impactos foram praticamente iguais, enquanto mensalmente, o cenário atual teve impacto maior em 26,66% do RCP4.5 e 11,76% do RCP8.5. Em relação aos fatores regionalizados anuais, o impacto foi maior no cenário atual em cerca de 7,14% quando comparado ao RCP4.5 e 36,4% em comparação com RCP.8.5. Mensalmente, o cenário atual teve 5,88% e 31,4% maior que potencial impacto do RCP4.5 e RCP8.5 respectivamente.

A pegada de escassez hídrica está diretamente ligada à produtividade da água, ou seja, a quantidade de água utilizada em relação ao total produzido. Essa relação pode amenizar os impactos, porém, é um desafio que o mundo todo tem enfrentado. Estudos, como o de Xu *et al.* (2019), mostram que uma boa produtividade da água reduz significativamente a escassez desse recurso. Segundo Huang *et al.* (2019), na China uma das saídas para garantir a segurança hídrica do país é melhorar essa relação entre produtividade e água consumida.

Os potenciais impactos apresentados pelas propriedades de banana (Figura 10) e de goiaba (Figura 11) se mostraram muito superiores aos impactos estimados para o futuro (2025-2055). Utilizando os FC anuais, os impactos das propriedades variaram entre 4-33 m³ eq kg⁻¹ para o globalizado e 40-304 m³ eq kg⁻¹ para o regionalizado na bananeira. Já na goiabeira, os valores ficaram entre 6-21 m³ eq kg⁻¹ e 56-195 m³ eq kg⁻¹ nos FC globalizados e regionalizados, respectivamente.

Mensalmente, os potenciais impactos na banana ficaram entre 30-229 m³ eq kg⁻¹ e 190-1441 m³ eq kg⁻¹ nos FC globalizados e regionalizados, respectivamente. Já na goiaba, os

valores foram entre 42-147 m³ eq kg⁻¹ nos fatores globalizados e 264-925 m³ eq kg⁻¹ nos regionalizados.

O fato das propriedades de bananeira e goiabeira estarem com impacto maior que a projeção futura só reafirma a falta de manejo na lâmina de água aplicada pelos irrigantes. O excesso de água usado pode agravar mais ainda a sustentabilidade e os impactos da escassez hídrica futura, tornando necessário implementar manejos que possam amenizar e melhorar a eficiência do uso da água, garantindo assim, a segurança hídrica regional (Zhang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020b).

6.4 Análise de incerteza

O método de Monte Carlo, conhecido também como análise de incerteza, é uma metodologia amplamente conhecida no mundo, principalmente em estudos de avaliação do ciclo de vida. Segundo Bamber *et al.* (2020), a maioria dos estudos com análise de incerteza e que utilizaram a ACV como metodologia trabalharam com Monte Carlo para estimar as incertezas de seus resultados. O autor ainda relata a importância dessa avaliação dentro dos estudos de ACV, garantindo essa ferramenta como apoio essencial na tomada de decisão.

As análises encontram-se no APÊNDICE C para as duas categorias de impacto investigadas neste estudo, sendo elas: mudanças climáticas e pegada de escassez hídrica. Os resultados são expressos em porcentagem, indicando quantas vezes, dentro das 1.000 interações, o impacto de A foi superior ao de B de acordo com as simulações realizadas.

Conforme a análise para mudanças climáticas, as propriedades 3 e 4 de banana e 3 e 5 de goiaba tiveram impactos significativamente maiores que as demais propriedades. Já em relação a pegada de escassez hídrica, as propriedades com maiores impactos foram: 3 e 4 de banana e 5 de goiaba, diferindo estatisticamente dos demais.

6.5 Análise de sensibilidade

6.5.1 Pegada de carbono

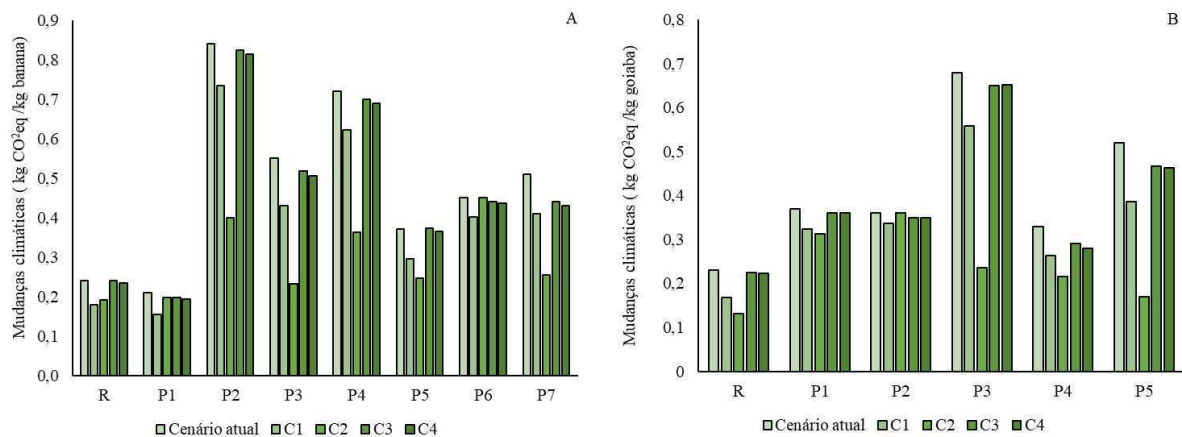
Os cenários montados buscam reduzir a pegada de carbono do produtor. Com isso, foi primeiramente observado em quais etapas produtivas estavam as maiores contribuições nessa categoria de impacto. Em seguida, foram avaliadas as etapas nas quais eram possíveis

fazer modificações que gerassem uma queda nas emissões de CO₂ equivalente. Na figura 20, é possível observar como se comporta a categoria de mudanças climáticas com base em cada cenário montado.

Na figura 20, é possível verificar como os cenários influenciaram na redução da pegada de carbono das propriedades. Na cultura da bananeira (Figura 20A), o cenário 1 (C1) reduziu a pegada de carbono entre 10,73-26,05% nas propriedades estudadas. Para o C2, essa redução variou entre 6-57,9%, enquanto para o C3 essa diminuição foi de 1,8-13,7% e para o C4 de 1,3-15,6%, quando comparados com o cenário atual.

O comportamento dos cenários para cultura da goiabeira (figura 20B) não foram diferentes. O C1 teve uma redução em torno de 6,5-26,6% do cenário atual. No C2, a variação entre as propriedades ficou de 15,43-67,3%, enquanto que a porcentagem de redução no C3 foi de 2,3-11,7%, e o C4 variou entre 2,7-15,1%.

Figura 20 - Comparação entre os cenários de pegada de carbono



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os cenários destacam como a pegada de carbono é diretamente influenciada pela mudança do uso da terra, produtividade e eletricidade. O cenário atual de mudança no uso da terra é considerado a pior situação, onde a mata nativa é retirada e o pomar é inserido. Conseqüentemente, a área que estava sequestrando carbono começa a emitir carbono. O C1 desconsidera as emissões de MUT, resultando em uma redução no impacto. Isso evidencia que o desmatamento deve ser evitado e que a implementação de novas áreas deve ocorrer em locais já degradados ou visar a melhoria da produtividade de áreas já instaladas (Stabile *et al.*, 2020).

A produtividade agrícola é um fator fundamental para redução dos impactos ambientais, como mostrado no C2 tanto na bananeira quanto na goiabeira. Melhorar o

rendimento das culturas agrícolas é uma saída para diluir e reduzir significativamente os impactos causados por este setor, melhorando a qualidade ambiental e a sustentabilidade de áreas produtoras (Alhassan, 2021; Raihan; Tuspekova, 2022).

Segundo Chen *et al.* (2021), ao trabalhar com 16 sistemas de cultivo na China, os autores observaram que a pegada de carbono foi diretamente influenciada pela irrigação, onde o aumento da lâmina influenciava no uso de eletricidade e nas emissões de CO₂ equivalente. Segundo o autor, a demanda da água deverá aumentar e o impacto potencial da eletricidade na pegada de carbono será um fator crucial a ser observado, tornando-se de fundamental importância a redução no uso desse insumo.

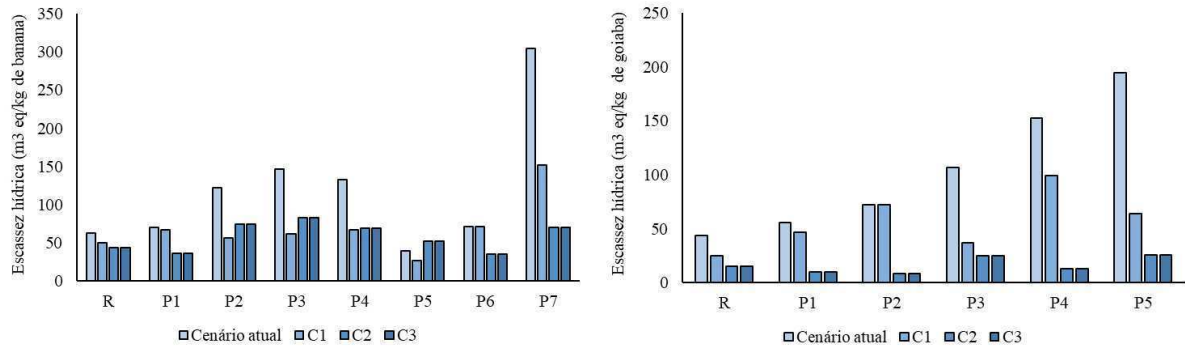
Por fim, tem-se os cenários com energia fotovoltaica, nos quais uma parte do terreno é destinada para painéis com o intuito de gerar energia solar. Segundo Fu e Yang (2022), os sistemas agro voltaicos (junção da agropecuária com energia fotovoltaica) podem reduzir as emissões de carbono, diminuindo assim os impactos dessa categoria. Além disso, é uma fonte segura de eletricidade.

Atualmente, 60% da energia gerada no Brasil vem de Hidrelétricas. Porém, tem-se buscado cada vez mais por novas fontes de eletricidade, sendo a energia solar (fotovoltaica) uma alternativa viável nesta região, visto que é uma fonte renovável e sustentável, favorecendo o uso consciente dos serviços ecossistêmicos (Zuluaga *et al.*, 2022). Além disso, segundo Sharif *et al.* (2021) e Muñoz-García e Hernández-Callejo (2022), a utilização de energia renovável, como a fotovoltaica, é uma das principais saídas para a descarbonização no setor agrícola, sendo também um dos métodos de mais fácil implementação.

6.5.2 Pegada de escassez hídrica

Na figura 21, é possível verificar como se comportou a pegada de escassez hídrica utilizando os fatores de caracterização regionalizados e anuais nas propriedades e no inventário de referência de acordo com os cenários montados. Para a cultura da bananeira (Figura 21A), o cenário 1 (C1) reduziu entre 4-58% os potenciais impactos da pegada de escassez hídrica, enquanto no C2 e C3 a variação da porcentagem se apresentou 31-77% menor que o cenário atual. Na cultura da goiabeira (Figura 21B), a tendência de redução é a mesma, onde o C1 diminuiu entre 17-67%, e o C2 e C3 variaram entre 66-91%, quando comparados com a situação atual.

Figura 21 - Comparação entre os cenários de pegada de escassez hídrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como tratado no tópico 6.5.1, eletricidade e produtividade têm poder de reduzir os impactos ambientais, tanto na pegada de carbono quanto na pegada de escassez hídrica. A redução da atual lâmina de água para necessidade hídrica real da cultura irá diminuir significativamente os impactos potenciais da escassez hídrica, além de ajudar na pegada de carbono (Chen *et al.*, 2021).

É perceptível que, ao contrário da pegada de carbono, o C2 e o C3 não tiveram diferença significativa na redução dos potenciais impactos da pegada de escassez hídrica, evidenciando que durante as etapas de produção e manutenção (limpeza) dessas placas solares, o consumo de água é elevado.

Segundo Tawalbeh *et al.* (2021), ainda faltam estudos que apresentem com precisão o uso da água dessas fontes renováveis. O autor ainda relata que os trabalhos encontrados hoje apresentam grande disparidade de resultados, gerando assim, dúvidas em relação aos impactos dos painéis fotovoltaicos na pegada de escassez hídrica. O Sudoeste dos Estados Unidos tem investido em energia solar, mas os avanços podem ser reduzidos, tendo em vista o consumo de água apresentado e a disponibilidade da região (Bukhary; Ahmad; Batista, 2018).

7 CONCLUSÕES

O maior uso de agroquímicos pelas propriedades fez com que a pegada de carbono, tanto da banana quanto da goiaba, fosse maior quando comparado com o inventário de referência. Os insumos e/ou processos que mais contribuíram para as mudanças climáticas em ambas as culturas foram a produção de campo, transporte, eletricidade e fertilizantes inorgânicos, especialmente os nitrogenados, com destaque para a mudança do uso da terra.

A carência de uma assistência técnica qualificada e contínua para dar suporte à condução dos cultivos e manejo da irrigação foi identificada como um forte determinante nos elevados valores das pegadas de carbono e da escassez hídrica.

A evapotranspiração das culturas irá aumentar no período de 2025-2055. Com isso, a demanda por água terá um acréscimo e, conseqüentemente, os impactos na pegada de escassez hídrica também, nos dois cenários futuros estudados, com maior destaque para o RCP4.5, tanto para a banana quanto para a goiaba.

Ao comparar os impactos da pegada de escassez da lâmina calculada com os impactos futuros, é possível notar que, para a banana, esse impacto já está próximo de ser superado. No caso da goiaba, ele já foi ultrapassado, mostrando que, se a produtividade da goiaba aumentar em 2025-2055, como mostrou a estimativa deste estudo, a pegada de escassez hídrica tende a ser menor.

Ao comparar a pegada de escassez de 2025-2055 com os potenciais impactos atuais das propriedades estudadas, é perceptível que a falta de manejo da irrigação tem feito com que os impactos sejam maiores até mesmo que a estimativa realizada para o futuro.

Em ambos os inventários estudados, a banana apresentou um impacto maior que a goiaba, tanto para a pegada de carbono, na categoria de mudanças climáticas, quanto na pegada de escassez hídrica.

Todos os cenários apresentam uma redução na pegada de carbono e pegada de escassez hídrica. Para a pegada de carbono, fica evidente a necessidade de reduzir o desmatamento, evitando as emissões geradas pela mudança do uso da terra. Melhorar a produtividade das culturas é uma saída para amenizar os impactos na pegada de carbono e na pegada de escassez hídrica, além de ser uma saída para evitar o desmatamento. O uso sustentável da água impacta tanto na pegada de escassez quanto nas mudanças climáticas, devido ao consumo de energia. Por esse motivo, torna-se necessário o uso consciente dos serviços ecossistêmicos, como a água, para mitigar os impactos da bananeira e da goiabeira.

REFERÊNCIAS

- ADEWALE, C.; REGANOLD, J. P.; HIGGINS, S.; EVANS, R. D.; CARPENTER-BOGGS, L. Agricultural carbon footprint is farm specific: Case study of two organic farms. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 229, p. 795-805, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Crise hídrica: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. – Brasília: ANA, GGES, 2016
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Regiões hidrográficas brasileiras**. Brasília: ANA, 2021.
- AGRAMMON GROUP. Technische Parameter Modell Agrammon. Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL. Agrammon. [Bern, xb]. [2009]. Disponível em: <https://www.agrammon.ch/>. Acesso em 06 jun. 2022.
- AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S. A.; CASTRO, C. E. F. **Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas**. 7º. ed. rev. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 46-51, 2014.
- ALHASSAN, H. The effect of agricultural total factor productivity on environmental degradation in sub-Saharan Africa. **Scientific African**, [s.l.]. v. 12, p. e00740, 2021.
- ALI, S.; KHAN, S. M.; SIDDIQ, Z.; AHMAD, Z.; AHMAD, K. S.; ABDULLAH, A.; HASHEM, A.; AL-ARJANI, A. F.; ABD_ALLAH, E. F. Carbon sequestration potential of reserve forests present in the protected Margalla Hills National Park. **Journal of King Saud University-Science**, [s.l.]. v. 34, n. 4, p. 101978, 2022.
- ALLEN R. K.; PEREIRA L. S.; RAES D.; SMITH M. Crop evapotranspiration. Guideline for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper no. 56. **United Nations Food and Agricultural Organization**, Rome, 1998.
- ALMEIDA, R. S. R. **Pegada hídrica de plantas hortícolas cultivadas no semiárido brasileiro**. Tese (Doutorado em recursos naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 74 f. 2019.
- AMARAL, J. A. B.; SILVA, M. T. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do gergelim por manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 12, n. 1, 2008.
- AMORIM, D. A. L. A. **Pegada de Carbono de uma Empresa Produtora de Eletricidade de Fontes Renováveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 102f. 2013.
- ANDRADE, C. W.; MONTENEGRO, S. M.; MONTENEGRO, A. A.; LIMA, J. R. D. S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. Climate change impact assessment on water resources

under RCP scenarios: a case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, [s.l.]. v. 41, p. E1045-E1061, 2021.

ANDRADE, E. P.; ARAÚJO, N. A. B.; FREITAS, A. K.; UGAYA, C. M. L.; COSTA, A. M.; LIMA, S. T.; BARROS, V. S.; PASTOR, A. V.; FIGUEIREDO, M. C. B. Water scarcity in Brazil: part 1—regionalization of the AWARE model characterization factors. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 25, p. 2342–2358, 2019.

ANDRADE, E. P.; FIGUEIREDO, M. C. B.; SANTOS, T.; NUNES, A. D. A. Regionalização de fatores de escassez hídrica em sub-bacias cearenses. **Revista Dae**, São Paulo, v. 68, n. 224, p. 122-132, 2020. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2020.044>.

ARAÚJO, J. P. C. **Crescimento e marcha de absorção de nutrientes de bananeira (Musa sp. AAA), 'Grande Naine' no primeiro ciclo de produção**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 80 f. 2008.

ASMAR, S. A.; CASTRO, E. M.; PASQUAL, M.; PEREIRA, F. J.; SOARES, J. D. R. Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. **Scientia Horticulturae**, [s.l.]. v. 161, p. 328-332, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14067: Gases de efeito estufa — Pegada de carbono de produtos — Requisitos e orientações sobre quantificação**. 1 ed. Rio de Janeiro: NBR ISO, 2023. 54 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS (ABRAFRUTAS). **Terceiro maior exportador de frutas do País, o Ceará comercializa US \$178 milhões em 2021**. 2022a. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2022/01/terceiro-maior-exportador-de-frutas-do-pais-ceara-comercializa-us-178-milhoes-em-2021/>. Acesso em: 27 mai. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS (ABRAFRUTAS). **Comparativo trimestre de exportação de frutas**. 2022b. Disponível em: <https://abrafrutas.org/2022/05/dados-de-exportacao-do-primeiro-trimestre-de-2022/>. Acesso em: 27 mai. 2022.

AYT OUGOUGDAL, H.; YACOUBI KHEBIZA, M.; MESSOULI, M.; LACHIR, A. Assessment of future water demand and supply under IPCC climate change and socio-economic scenarios, using a combination of models in Ourika Watershed, High Atlas, Morocco. **Water**, [s.l.]. v. 12, n. 6, p. 1751, 2020.

BAMBER, N.; TURNER, I.; ARULNATHAN, V.; LI, Y.; ZARGAR ERSHADI, S.; SMART, A.; PELLETIER, N. Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: review of current practice and recommendations. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 25, p. 168-180, 2020.

BARE, J. C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D. W.; UDO DE HAES, H. A. Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. **Int. J. Life Cycle Assess**, [s.l.]. n. 5, n. 6. Ecomed: 319–26, 2000. doi:10.1007/BF02978665.

BARROS, V. S. **Pegada de carbono do melão produzido em sistemas convencionais ou conservacionistas.** Tese (Doutorado em fitotecnia) - Programa de pós-graduação em fitotecnia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 120f, 2015.

BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. D. C.; SILVA, J. A. M.; DA SILVA, E. E. G.; FERREIRA, M.; MAIA, J. L. T.; TARGINO, E. D. L. **Consumo de água e coeficiente de cultura da goiabeira irrigada por microaspersão.** Embrapa Semiárido-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2002.

BELL, E. M.; HORVATH, A. Modeling the carbon footprint of fresh produce: effects of transportation, localness, and seasonality on US orange markets. **Environmental Research Letters**, [s.l.]. v. 15, n. 3, p. 034040, 2020.

BELTRÃO JÚNIOR, J. A.; COSTA, R. N. T.; LIMA, S. C. R. V.; IÑGUEZ, L. M.; SOUSA, P. G. R. Fornecimento relativo de irrigação como estratégia de gestão do distrito de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.11, n.5, p. 1756 - 1762, 2017.

BLANCO, C. F.; MARQUES, A.; VAN BODEGOM, P. M.; PETER M. An integrated framework to assess impacts on ecosystem services in LCA demonstrated by a case study of mining in Chile. **Ecosystem Services**, [s.l.]. v. 30, p. 211-219, 2017.

BLOCK P. J.; SOUZA FILHO F.A.; SUN, L.; KWON H-H. A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models. **J Am Water Resour Assoc**, [s.l.]. v. 45:828–843, 2009.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é: o que não é.** 5. ed. Petrópolis: Vozes, 2016. 200 p.

BONIFÁCIO, B. F.; NOBRE, R. G.; SOUSA, A. D. S.; GOMES, E. M.; DA SILVA, E. M.; DE SOUSA, L. P. Efeitos da adubação potássica e irrigação com águas salinas no crescimento de porta-enxerto de goiabeira. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife, v. 41, n. 4, p. 971-980, 2018.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. da S. **O Cultivo da Bananeira.** Cruz das Almas - BA. Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2004. 279p.

BOULAY, A. M.; BARE, J.; BENINI, L.; BERGER, M.; LATHUILLIÈRE, M.J.; MANZARDO, A.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ, M.; PASTOR, A.V.; RIDOUTT, B.; OKI, T.; WORBE, S.; PFISTER, S. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 23, ed. 2, p. 368 - 378, 2018.

BOULAY, A. M.; Bare, J.; CAMILLIS, C.; DOLL, P.; GASSERT, F.; GERTEN, D.; HUMBERT, S.; INABA, A.; ITSUBO, N.; LEMOINE, Y.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ, M.; PASTOR, A.V.; RIDOUTT, B.; SCHENCKER, U.; SHIRAKAWA, N.; VIONNET, S.; WORBE, S.; YOSHIKAWA, S.; PFISTER, S. Consensus building on the development of a stress-based indicator for LCA-based impact assessment of water consumption: outcome of the expert workshops. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 20, n. 5, p. 577–583, 2015.

BRAGA, N. K. M. **Potencial de aquecimento global de paredes de concreto a partir da avaliação do ciclo de vida**. Dissertação (mestrado em estruturas e construção civil) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília faculdade de tecnologia, Brasília, 137f, 2018.

BRASIL. **Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF: Casa Civil, 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 12 jul. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 12 jul. 2023.

BUKHARY, S.; AHMAD, S.; BATISTA, J. Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.]. v. 82, p. 3288-3305, 2018.

BUREK, P.; SATOH, Y.; FISCHER, G.; KAHIL, M.T.; SCHERZER, A.; TRAMBEREND, S.; NAVA, L.F.; WADA, Y.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; HANASAKI, N.; MAGNUSZEWSKI, P.; COSGROVE, B.; WIBERG, D. **Water Futures and Solution-Fast Track Initiative (Final Report)**; IIASA: Laxenburg, Austria, 2016.

CAMPOS, F. H. A. **Análise do ciclo de vida na construção civil: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 123 f., 2012.

CARNEIRO, J. M.; DIAS, A.F.; BARROS, V.S; GIONGO, V.; MATSUURA, M.I.S.F.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 24, p. 735-752, 2019.

CARVALHO, M. A. R.; LEÃO, M. C. S.; DE CARVALHO, L. C. C.; SOUZA, F.; DE AGUIAR, J. V. Coeficientes de Cobertura (Kr) em Fruteiras Tropicais Adultas Microirrigadas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 1, n. 1, 2013.

CEARÁ. Governo do Estado. **Atualização do plano de desenvolvimento do Vale do Jaguaribe**: sumário executivo. 2016. Disponível em: https://www.cidades.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2015/12/P8_Sum%C3%A1rio-Executivo_Vale-Jaguaribe.pdf. Acesso em 02 abr. 2022.

CHAPAGAIN A.K., HOEKSTRA A.Y., SAVENIJE, H.H.G., GAUTAM, R. A pegada hídrica do consumo de algodão: uma avaliação do impacto do consumo mundial de produtos de algodão nos recursos hídricos nos países produtores de algodão. **Ecol Econ**. [s.l.]. v.60, n.1, p. 186–203, 2006.

CHAPAGAIN, A. K.; TICKNER, D. **Pegada Hídrica: evolução do conceito e sua utilidade na prática**. In: EMPINOTI, V; JACOBI, P.R.(Org.). Pegada Hídrica: inovação, corresponsabilização e os desafios de sua aplicação. São Paulo: Annablume, 2012.

CHEHEBE, J.R.B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 1997. p. 104.

CHEN, H.; SUN, J.; LIN, W.; XU, H. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. **Science Bulletin**, [s.l.]. v. 65, n. 17, p. 1415-1418, 2020.

CHEN, X.; MA, C.; ZHOU, H.; LIU, Y.; HUANG, X.; WANG, M.; CAI, Y.; SU, D.; MUNEEER, M. A.; GUO, M.; CHEN, X.; ZHOU, Y.; HOU, Y.; CONG, W.; GUO, J.; MA, W.; ZAHNG, W.; CUI, Z.; WU, L.; ZHOU, S.; ZHANG, F. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001–2018. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.]. v. 172, p. 105661, 2021.

CHOPRA, R.; MAGAZZINO, C.; SHAH, M. I.; SHARMA, G. D.; RAO, A.; SHAHZAD, U. The role of renewable energy and natural resources for sustainable agriculture in ASEAN countries: do carbon emissions and deforestation affect agriculture productivity?. **Resources Policy**, [s.l.]. v. 76, p. 102578, 2022.

CINTRA, P. H. N.; DE MELO, O. F. P.; DE MENEZES, J. O. S. Produção agrícola: uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. **Revista Agrotecnologia, Ipameri**, [s.l.]. v. 1, p. 2179-5959, 2020.

COLTRO, L.; KARASKI, T. U. Environmental indicators of banana production in Brazil: Cavendish and Prata varieties. **Journal of cleaner production**, [s.l.]. v. 207, p. 363-378, 2019.

DANARTO, S. A., & HAPSARI, L. I. A. Biomass and carbon stock estimation inventory of Indonesian bananas (*Musa spp.*) and its potential role for land rehabilitation. **BIOTROPIA-The Southeast Asian Journal of Tropical Biology**, [s.l.]. v. 22, n. 2, p. 102-108, 2015.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C.; INMAN-BAMBER, G.; EVERINGHAM, Y. Sugarcane yield future scenarios in Brazil as projected by the APSIM-Sugar model. **Industrial Crops and Products**, [s.l.]. v. 171, p. 113918, 2021.

DISTAR. OLIVEIRA, Aridiano Belk de; GOMES, Elídia Maria de Matos. **Informações Gerais Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas**. Russas-CE. 2020. Apresentação de PowerPoint. 38 slides.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requiremensts**. Rome, Italy: FAO Irrigation and Drainage, 1977. (FAO, Paper 24).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA MANDIOCA E FRUTICULTURA; AGROINDÚSTRIA TROPICAL (EMBRAPA). **Cultivo da Bananeira para o Agropolo Jaguaribe-Apodi, Ceará**. 2ª Edição, 2014. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=

column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=8003&p_r_p_-996514994_topicoId=8701. Acesso em: 28 maio 2022.

ESCOBAR, N.; TIZADO, E. J.; ZU ERMGASSEN, E. K.; LÖFGREN, P.; BÖRNER, J.; GODAR, J. Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. **Global Environmental Change**, [s.l.]. v. 62, p. 102067, 2020.

FACHI, L.; GARBUGIO, E.; FERREIRA, A.; MACHADO, R.; KRAUSE, W. Qualidade e correlação dos parâmetros físicos e químicos dos frutos de cultivares de goiaba. **Scientific Electronic Archives**, [s.l.]. v. 11, n. 4, p. 36-40, 2018.

FENG, Z.; WANG, L.; WAN, X.; YANG, J.; PENG, Q.; LIANG, T.; WANG, Y.; ZHONG, B.; RINKLEBE, J. Responses of soil greenhouse gas emissions to land use conversion and reversion—A global meta-analysis. **Global Change Biology**, [s.l.]. v. 28, n. 22, p. 6665-6678, 2022.

FENNER, A. E.; KIBERT, C. J.; WOO, J.; MORQUE, S.; RAZKENARI, M.; HAKIM, H.; LU, X. The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.]. v. 94, p. 1142-1152, 2018.

FERREIRA, C. F.; SILVA, S. D. O.; AMORIM, E. P.; DOS SANTOS-SEREJO, J. A. **O agronegócio da banana**. Brasília: Embrapa, 2016.

FERREIRA, F.; MORENO, N.; EVANGELISTA, J.; SILVA, A. C.; AMANCIO, L. A fruticultura no Ceará: evolução e tendências na região metropolitana do CARIRI. **Enciclopédia Biosfera**, [s.l.]. v. 10, p. 1-13, 2014.

FERREIRA, M. N. L. **Distribuição radicular e consumo de água de goiabeira (*Psidium guajava* L.) irrigada por microaspersão em Petrolina-PE**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 124 f. 2004.

FERREIRA, Z. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Irrigação pública e fruticultura no Semiárido. **Revista de Política Agrícola**, [s.l.]. v. 30, n. 1, p. 34, 2021.

FERRERO, L. M. M.; ARAUJO, P. Z.; VALDEÓN, D. H.; HUN, A. L. N.; MELE, F. D. Water footprint of lemon production in Argentina. **Science of The Total Environment**, [s.l.]. v. 816, p. 151614, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151614>

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; POTTING, J.; SERRANO, L. A. L.; BEZERRA, M. A.; DA SILVA BARROS, V.; GONDIM, R. S.; NEMECEK, T. Environmental assessment of tropical perennial crops: the case of the Brazilian cashew. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 112, p. 131-140, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. FAOSTAT: **production-crops**. 2020a. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 19 de abr. de 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Prospects for global production and trade in bananas and tropical fruits 2019-2028**, p. 24, 2020b. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/card/fr/c/CA7568EN/>. Acesso em: 19 de abr. de 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAOSTAT: Producer Prices**. 2020c. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/PP/visualize>. Acesso em: 27 de mai. de 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAOSTAT: production-crops**. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 19 de abr. de 2022.

FREITAS, W. S.; RAMOS, M. M.; COSTA, S. L. Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, p.343-349, 2008.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H. J.; DOKA, G.; HECK, T.; HELLWEG, S. **Overview and Methodology. ecoinvent report nº. 1**. Dubendorf: Swiss Center for Life Cycle Inventories, 2007. p.77.

FU, B.; WANG, S.; ZHANG, J.; HOU, Z.; LI, J. Unravelling the complexity in achieving the 17 sustainable-development goals. **National Science Review**, [s.l.]. v. 6, n. 3, p. 386-388, 2019.

FU, X.; YANG, F. Viewpoints on the theory of agricultural energy internet. **Frontiers in Energy Research**, v. 10, p. 871772, 2022.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Calendário das chuvas no Estado do Ceará, Ceará**. [2020]. Disponível em: <http://www.funceme.br/app/calendario/produto/municipios/maxima/diario?data=hoje>. Acesso em: 02 abr. 2022.

GALÁN-MARTÍN, Á.; VASKAN, P.; ANTÓN, A.; ESTELLER, L. J.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria: a case study of wheat production in Spain. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 140, p. 816-830, 2017.

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**, [s.l.]. v.16, p.100-112, 2012.

GHG PROTOCOL - Programa Brasileiro GHG Protocol. FGV EAESP – Centro de Estudos em Sustentabilidade. (2016, Março 3). Nota Técnica: equação para cálculo das emissões de N2O provenientes do uso de fertilizante nitrogenado sintético – version 1.0. Retrieved in 2016, September 5, from www.ghgprotocolbrasil.com.br.

GOMES DA SILVA, F. J.; GOUVEIA, R. M.; GOMES DA SILVA, F. J.; GOUVEIA, R. M. Global population growth and industrial impact on the environment. **Cleaner Production: Toward a Better Future**, [s.l.]. v. 1, p. 33-75, 2020.

GOMES, P. **Fruticultura brasileira**, 13 ed. São Paulo: Nobel, 2007.

GONDIM, R.; SILVEIRA, C.; DE SOUZA FILHO, F.; VASCONCELOS, F.; CID, D. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.]. v. 77, p. 1-14, 2018.

GONZAGA NETO, L. **goiaba – produção: aspectos técnicos. Embrapa – Semiárido** (Petrolina, PE) – Brasília: Embrapa – Informações Tecnologias, 2001, 72p.

GONZAGA NETO, L. **Produção de goiaba**. Fortaleza: 14^a Semana Internacional da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria - Instituto Frutal, v. 60, 2007. Disponível em: <http://frutvasf.univasf.edu.br/images/goiaba.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2022.

GONZAGA NETO, L.; SOARES, J. M. **goiaba para exportação: aspectos técnicos da produção**. Brasília, DF: Embrapa-SPI: FRUPEX, 1994. 49 p. (FRUPEX. Publicações Técnicas, 5).

GUINEE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life cycle assessment: past, present, and future. **Environmental Science & Technology**, [s.l.]. v. 45, p.90-96, 2011.

HANAFIAH, M. M.; HASAN, M. K.; RAZMAN, K.; HARUN, S. N.; SAKAWI, Z. Life Cycle Assessment of Laser-Induced Maize Production: Adoption of Sustainable Agriculture Practices. **Applied Sciences**, [s.l.]. v. 12, n. 22, p. 11779, 2022.

HARRIS I.; JONES P.D.; OSBORN T.J.; LISTER D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 dataset. **Int J Climatol**, [s.l.]. v. 34:623–642, 2014.

HARTL, A. The effects of the Kyoto Protocol on the carbon trade balance. **Review of World Economics**, [s.l.]. v. 155, n. 3, p. 539-574, 2019.

HERNANDES, G. M. C.; EFRAIM, P.; SILVA, A. R. D. A.; QUEIROZ, G. D. C. Pegada de carbono do cacau brasileiro produzido no estado do Pará. **Brazilian Journal of Food Technology**, [s.l.]. v. 25, e2020263, 2022. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.26320>.

HOEKSTRA, A. Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. **Ecological Economics**, [s.l.]. v.68, p.1963-1974, 2009.

HOEKSTRA, A. Y. Water footprint assessment: evolvement of a new research field. **Water Resources Management**, [s.l.]. v. 31, n. 10, p. 3061-3081, 2017.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard**. London, UK: Earthscan, 2011.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. The water footprint of humanity. *PNAS*, vol v. 109, n. 9. P.3232-3237. 2012.

HOEKSTRA, A. Y.; WIEDMANN, T. O. Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science*, [s.l.]. v. 344, n. 6188, pág. 1114-1117, 2014. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1248365>.

HUANG, J.; RIDOUTT, B. G.; THORP, K. R.; WANG, X.; LAN, K.; LIAO, J.; TAO, X.; WU, C.; HUANG, J.; CHEN, F.; SCHERER, L. Water-scarcity footprints and water productivities indicate unsustainable wheat production in China. *Agricultural Water Management*, [s.l.]. v. 224, p. 105744, 2019.

HUANG, Z.; HEJAZI, M.; TANG, Q.; VERNON, C. R.; LIU, Y.; CHEN, M.; CALVIN, K. Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes. *Journal of Hydrology*, [s.l.]. v. 574, p. 242-256, 2019.

IBGE-SISTEMA BRASILEIRO DE RECUPERAÇÃO DE DADOS AUTOMÁTICA. **Agropecuária**: produção agrícola municipal. 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 30 mar. 2022.

IBGE-SISTEMA BRASILEIRO DE RECUPERAÇÃO DE DADOS AUTOMÁTICA. **Agropecuária**: produção agrícola municipal. 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 05 mai. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Ceará em Mapas – Informações georreferenciadas e especializadas para os 184 municípios cearenses, Ceará**. c2007. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/index.htm>. Acesso em: 02 abr. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados meteorológicos**. 2023. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. (ed.). Japan: IGES, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller). Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, pp. 996, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Emission Scenarios (Special Report)**. Vienna: IPCC, 2007. 608 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: the physical science basis**. Genebra, Suíça: IPCC, 2013a. 29 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2013: the physical science basis, Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge Univ. Press, New York, 2013b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Suíça: IPCC, 2021a. 38 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Switzerland: IPCC, 2019a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use -Chapter 11 N₂O Emissions from Managed Soils and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application**. Switzerland: IPCC, 2019b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global Warming of 1,5°C**. Suíça: IPCC, 2021b. 28 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. 2 ed. Genebra: ISO, 2006a. 20 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines**. 1 ed. Genebra: ISSO, 2006b. 46 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14067:2013 - Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication**. Genebra. ISO: 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14046: 2014 - Environmental management – Water footprint – Principles, requirements and guidelines**. Genebra. ISO: 2014.

JAVADINEJAD, S.; HANNAH, D.; OSTAD-ALI-ASKARI, K.; KRAUSE, S.; ZALEWSKI, M.; BOOGAARD, F. The impact of future climate change and human activities on hydro-climatological drought, analysis and projections: using CMIP5 climate model simulations. **Water Conservation Science and Engineering**, [s.l.]. v. 4, p. 71-88, 2019.

KAEWMAI, R.; GRANT, T.; EADY, S.; MUNGKALASIRI, J.; MUSIKAVONG, C. Improving regional water scarcity footprint characterization factors of an available water remaining (AWARE) method. **Science of the Total Environment**, [s.l.]. v. 681, p. 444-455, 2019.

KINLEY, R. D.; MARTINEZ-FERNANDEZ, G.; MATTHEWS, M. K.; DE NYS, R.; MAGNUSSON, M.; TOMKINS, N. W. Mitigating the carbon footprint and improving

productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. **Journal of Cleaner production**, [s.l.]. v. 259, p. 120836, 2020.

KOUNINA, A.; MARGNI, M.; BAYART J.; BOULAY A.; BERGER, M.; BULLE, C.; FRISCHKNECHT F.; KOEHLER, A.; MILÀ I CANALS, L.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ, M.; PETERS, G.; PFISTER, S.; RIDOUTT, B.; VAN ZELM, R.; VERONES, F.; HUMBERT, S. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 18, p. 707 – 721, 2013.

KUMILACHEW, Y. W.; HATIYE, S. D. The dual impact of climate change on irrigation water demand and reservoir performance: a case study of Koga irrigation scheme, Ethiopia. **Sustainable Water Resources Management**, [s.l.]. v. 8, n. 1, p. 25, 2022.

LI, M.; XU, Y.; FU, Q.; SINGH, V. P.; LIU, D.; LI, T. Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty. **Journal of Hydrology**, [s.l.]. v. 586, p. 124888, 2020a.

LI, Y.; GUAN, K.; PENG, B.; FRANZ, T. E.; WARDLOW, B.; PAN, M. Quantifying irrigation cooling benefits to maize yield in the US Midwest. **Global change biology**, [s.l.]. v. 26, n. 5, p. 3065-3078, 2020b.

LIMA, M.; MOREIRA, F. **A cultura da goiaba**. Embrapa Informação Tecnológica e Embrapa Semiárido. Brasília. 2. Ed. P. 180, 2010.

LOPES, C. B. **Diferentes lâminas de irrigação no cultivo da bananeira prata anã em Missão Velha – CE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 61 f. 2018.

LORENA, D. R. **Produtividade e qualidade de bananas das cultivares ‘Grand Naine’ e ‘Brs Tropical’ em função de irrigação e adubação na região do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 118 f. 2015.

MA, T.; SUN, S.; FU, G.; HALL, J. W.; NI, Y.; ELE, L.; YI, J.; ZHAO, N.; DU, Y.; PEI, T.; CHENG, W.; SONG, C.; FANG, C.; ZHOU, C. Pollution exacerbates China’s water scarcity and its regional inequality. **Nature communications**, [s.l.]. v. 11, n. 1, p. 650, 2020.

MAIA, J. L. T.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J.; LIMA, M. A. C. D.; ASSIS, J. S. D.; MORAIS, P. L. D. D. Assessment on nutrient levels in the aerial biomass of irrigated guava in São Francisco Valley, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, p. 705-709, 2007.

MAIA, L. A. F. **Níveis e modelos de distribuição de irrigação na cultura da Goiabeira nas condições edafoclimáticas do Tabuleiros de Russas, Ceara**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de pós-graduação em Engenharia agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 63f, 2016.

MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, [s.l.]. v. 13, n. 3, p. 1318, 2021.

- MANICA, I. **Fruticultura Tropical**. 4: banana. Porto Alegre: Cinco Continente, 1997. 485p.
- MANKE, E. B.; SANTOS, A. F. dos; PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; BAMBERG, A. L.; FARIA, L. C. Pegada hídrica do arroz cultivado sob diferentes manejos de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 2, p. 248-263, 2021.
<http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2021v1n2p248-263>.
- MARACAJÁ, K. F. B.; DA SILVA, V. de P. R.; NETO, J. D.; ARAÚJO, L. E. Pegada hídrica como indicador de sustentabilidade ambiental. **Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, [s.l.]. v. 2, n. 2, p. 113-125, 2013.
<http://dx.doi.org/10.18696/reunir.v2i2.75>.
- MARTÍNEZ-ÁNGEL, J.D.; VILLAMIZAR-G, R.A.; ORTÍZ-RODRIGUEZ, O.O. Caracterização e avaliação da casca da vagem do cacau (*Theobroma cacao* L.) como fonte de energia renovável. **Agrociencia**. [s.l.]. v. 49, p. 329-345. 2015.
- MARTIN-GORRIZ, B.; GALLEGO-ELVIRA, B.; MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; MAESTRE-VALERO, J. F. Life cycle assessment of fruit and vegetable production in the Region of Murcia (south-east Spain) and evaluation of impact mitigation practices. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 265, p. 121656, 2020.
- MATSUURA, M. I. S. F.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; RAMOS, N. P.; MACIEL, V. G.; GAROFALO, D. T.; NOVAES, R. M. L.; MORANDI, M. Workbook for life cycle inventories of agricultural products, according to different methodological guides. Jaguariúna. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2022.
- MEDAIYESE, A. O.; WU, J.; UNC, A. Utility of wood ash, paper sludge and biochar for the mitigation of greenhouse gases emissions from acid boreal soils. **Journal of Environmental Management**, [s.l.]. v. 330, p. 117202, 2023.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrology And Earth System Sciences**, [s.l.]. v. 15, n. 5, p. 1577-1600, 25 maio 2012.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. **Indicadores ecológicos**, [s.l.]. v. 46, p. 214-223, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>.
- MGALULA, M. E.; WASONGA, O. V.; HÜLSEBUSCH, C.; RICHTER, U.; HENSEL, O. Greenhouse gas emissions and carbon sink potential in Eastern Africa rangeland ecosystems: A review. **Pastoralism**, [s.l.]. v. 11, n. 1, p. 1-17, 2021.
- MILLER, G.T.; SPOOLMAN, S.E. **Ecologia e sustentabilidade**. São Paulo: Cengage Learning, 2012. 400 p. ISBN: 9788522111527.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil**. 5ª edição. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020. p. 108. Disponível em:

https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/livro_digital_5ed_estimativas_anuais.pdf. Acesso em: 08 abr. 2020.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Segundo inventário Brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. Emissões de gases de efeito estufa no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. Brasília: MCT, 103 p., 2010.

MIRANDA, F. R. MASCEDO, A. B. M., GONDIM, R. S. **Eficiência de uso da água e produtividade da bananeira cv. Pacovan sob diferentes potenciais de água no solo**. Fortaleza. Embrapa Agroindústria Tropical, 2012. 18 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 1679-6543, 61).

MOHAMMED, Z. M., & HASSAN, W. H. Climate change and the projection of future temperature and precipitation in 107outhern Iraq using a LARS-WG model. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s.l.]. v. 8, n. 3, p. 4205-4218, 2022.

MONTE, P. M. P.; ARAÚJO, R. C. P. D.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. D. Avaliação das pegadas hídrica e de carbono da amêndoa da castanha de caju processada em minifábricas no estado do Ceará. **Gaia Scientia**, [s.l.]. v. 15, n. 4, p. 51-71, 2022.

MUÑOZ-GARCÍA, M. A.; HERNÁNDEZ-CALLEJO, L. Fotovoltaica e Eletrificação na Agricultura. **Agronomia**, [s.l.]. v. 12, n. 1, pág. 44, 2022.

NARANJO-MERINO, Carlos; ORTÍZ-RODRIGUEZ, Oscar; VILLAMIZAR-G, Raquel. Assessing Green and Blue Water Footprints in the Supply Chain of Cocoa Production: a case study in the northeast of colombia. **Sustainability**, [s.l.]. v. 10, n. 2, p. 38, 25 dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/su10010038>.

NASHWAN, M. S.; SHAHID, S.; ABD RAHIM, N. Unidirectional trends in annual and seasonal climate and extremes in Egypt. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.]. v. 136, p. 457-473, 2019.

NEMECEK T.; BENGUA X.; LANSCHER J.; MOURON P.; RIEDENER E.; ROSSI V.; HUMBERT S. Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. Version 3.0, July 2015. **World Food LCA Database (WFLDB)**. Quantis and Agroscope, Lausanne and Zurich, Switzerland, 2015.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J.; REINHARD, J. Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crops inventories. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 21, n. 9, p. 1361-1378, 2016.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**. Agroscope Reckenholz –Tänikon Research Station. Zurich, 2011.

NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I. R. (Ed.). **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília: Embrapa, 2018.

OLEGÁRIO, K. F.; ANDRADE, E. P.; SAMPAIO, A. P. C.; MATOS, J. S.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. D.; ALMEIDA NETO, J. A. D. Water scarcity footprint of cocoa irrigation in Bahia. **Revista Ambiente & Água**, [s.l.]. v. 17, 2022.

OLIVEIRA, V. R. **Pegada hídrica da banana nas principais regiões produtoras do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de pós-graduação em Engenharia agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 93f, 2018.

OLIVEIRA, W. C.; BERTOLINI, G. R. F. Uma revisão sistemática sobre a contribuição das cooperativas para a sustentabilidade da agricultura familiar. **Research, Society and Development**, [s.l.]. v. 11, n. 2, p. e43411226098-e43411226098, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU: **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU: **Relatório mundial das nações unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos em 2021**. 2021. 12 p. Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/noticia/509/agencias-da-onu-lancam-o-relatorio-mundial-das-nacoes-unidas-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-hidricos-2021>. Acesso: 30 mar. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU: **Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água 2023**. 2023. 539 p. Disponível em: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua - UNESCO Digital Library. Acesso: 09 Out. 2023.

ORTIZ-ULLOA, J. A.; ABRIL-GONZÁLEZ, M. F.; PELAEZ-SAMANIEGO, M. R.; ZALAMEA-PIEDRA, T. S. Biomass yield and carbon abatement potential of banana crops (*Musa spp.*) in Ecuador. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.]. v. 28, p. 18741-18753, 2021.

PEREIRA, F. M.; NACHTIGAL, J. C. Goiabeira. In: BRUCKNER, C. H. (Org.). **Melhoramento de fruteiras tropicais**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2002. V. 1, p. 267-289.

PERRY, C. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations, **Irrigation and Drainage**, [s.l.]. v. 56, 2007, p. 367-378.

PIMENTEL, J. N. F. **Impacto da escassez hídrica na agricultura irrigada e estratégia de cultivo e manejo da irrigação em condições de déficit hídrico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 60f, 2021.

POMMER, C. V.; MURAKAMI, K. R. N.; WATLINGTON, F. goiaba no mundo. **Agrônomo**, [s.l.]. v. 58 p. 22- 26, 2006. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/oagronomico.php>. Acesso em: 10 maio 2022.

RAFIEE, H.; AMINIZADEH, M.; HOSSEINI, E. M.; AGHASAFARI, H.; MOHAMMADI, A. A cluster analysis on the energy use indicators and carbon footprint of irrigated wheat cropping systems. **Sustainability**, [s.l.]. v. 14, n. 7, p. 4014, 2022.

RAIHAN, A.; TUSPEKOVA, A. Dynamic impacts of economic growth, energy use, urbanization, agricultural productivity, and forested area on carbon emissions: New insights from Kazakhstan. **World Development Sustainability**, [s.l.]. v. 1, p. 100019, 2022.

RATHORE, A. C.; KUMAR, A.; TOMAR, J. M. S.; JAYAPRAKASH, J.; MEHTA, H.; KAUSHAL, R.; ALAM, N. M.; GUPTA, A. K.; RAIZADA, A.; CHATURVEDI, O. P. Predictive models for biomass and carbon stock estimation in *Psidium guajava* on bouldery riverbed lands in North-Western Himalayas, India. **Agroforestry systems**, [s.l.]. v. 92, p. 171-182, 2018.

RAVI, K.; DIVYASHREE, P. *Psidium guajava*: A review on its potential as na adjunct in treating periodontal disease. **Pharmacognosy reviews**, [s.l.]. v. 8, n. 16, p. 96, 2014.

RESENDE, N. C.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R.; CHU, M. L.; CHOU, S. C. Impacts of regional climate change on the runoff and root water uptake in corn crops in Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, [s.l.]. v. 221, p. 556-565, 2019.

RICHARD, B.; QI, A.; FITT, B. D. Control of crop diseases through Integrated Crop Management to deliver climate-smart farming systems for low-and high-input crop production. **Plant Pathology**, [s.l.]. v. 71, n. 1, p. 187-206, 2022.

ROCHA, T. B. C.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. D. C.; SILVEIRA, C. D. S.; MARTINS, E. S. P. R.; GONÇALVES, S. T. N.; SILVA, E. M. D.; ALVES, J. M. B.; SAKAMOTO, M. S. Indicadores de Veranicos e de Distribuição de Chuva no Ceará e os Impactos na Agricultura de Sequeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.]. v. 36, p. 579-589, 2021.

RODRIGUES, A. J. O. **Bactérias promotoras de crescimento em mudas micropropagadas de bananeira cv. prata catarina irrigadas com água salina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de pós-graduação em Engenharia agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 131f, 2020.

RODRIGUES, L. A. **Contribuição ao estudo bioquímico de frutas tropicais e exóticas produzidas no brasil: pectina, açúcar e proteína**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, São Paulo, 129f, 2009.

ROIBÁS, L.; ELBEHRI, A.; HOSPIDO, A. Carbon footprint along the Ecuadorian banana supply chain: Methodological improvements and calculation tool. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 112, p. 2441-2451, 2016.

SAMPAIO, A. P. C. **Pegada de carbono e hídrica do cultivo de coco em sistemas de produção convencional no nordeste brasileiro**. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento e Meio ambiente) - Programa de pós-graduação em desenvolvimento e Meio ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 124f, 2019.

SAMPAIO, A. P. C.; SILVA, A. K. P.; DE AMORIM, J. R.; SANTIAGO, A. D.; DE MIRANDA, F. R.; BARROS, V. S.; VENDAS, M. C.; DE FIGUEIRÊDO, M. C. B. Reducing the carbon and water footprints of Brazilian green coconut. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 26, p. 707-723, 2021.

SAMPAIO, A. P. C.; SILVA, A. K.; BARROS, V. S.; DE AMORIM, J. R. A.; MIRANDA, F. R.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Pegada hídrica da água de coco verde nas principais regiões produtoras do Nordeste. **Embrapa Agroindústria Tropical-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, edição especial, n. 2, p. 128-141, 2018.

SANTOS, T. L.; NUNES, A.B.A.; GIONGO, V.; BARROS, V.S.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. Cleaner fruit production with green manure: The case of Brazilian melons. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 181, p. 260-270, 2018.

ŠARAUSKIS, E.; ROMANECKAS, K.; KUMHÁLA, F.; KRIAUCIŪNIENĖ, Z. Energy use and carbon emission of conventional and organic sugar beet farming. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 201, p. 428-438, 2018.

SCHILLING, J.; HERTIG, E.; TRAMBLAY, Y.; SCHEFFRAN, J. Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. **Regional Environmental Change**, [s.l.]. v. 20, p. 1-12, 2020.

SHA, J.; LI, X.; WANG, Z. L. Estimation of future climate change in cold weather areas with the LARS-WG model under CMIP5 scenarios. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.]. v. 137, p. 3027-3039, 2019.

SHARIF, A.; MEO, M. S.; CHOWDHURY, M. A. F.; SOHAG, K. Role of solar energy in reducing ecological footprints: An empirical analysis. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 292, p. 126028, 2021.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M. D.; SANTOS, C. A. G.; LINHARES, F. M.; XAVIER, A. P. C. Modeling the effects of future climate and land-use changes on streamflow in a headwater basin in the Brazilian Caatinga biome. **Geocarto International**, [s.l.]. v. 1, p. 1-30, 2022.

SILVA, É. L.; SILVA, K. A.; SOUSA, F. R. L.; TAVARES, F. B. R. A escassez hídrica na zona rural: O consumo de água sob a perspectiva dos agricultores de um assentamento no município de Pombal-PB. **Research, Society and Development**, [s.l.]. v. 8, n. 6, p. 01-14, 2019.

SILVA, V. de P. R.; ALEIXO, D. de O.; DANTAS NETO, J.; MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E. Uma medida de sustentabilidade ambiental: pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 100-105, jan. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662013000100014>.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. **Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental**. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissões do Setor de Agropecuária**. Brasília: IMAFLORA, 2018. Disponível em: https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/Relatorios_SEEG_2018-Agro_Final_v1.pdf. Acesso: 08 abr. 2022.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações**

para as metas climáticas do Brasil 1970-2020. Brasília: IMAFLORA, 2021. 55 p.
Disponível em: [https://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020#:~:text=O%20total%20de%20emiss%C3%B5es%20brutas,de%20Efeito%20Estufa%20\(SEEG\)](https://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020#:~:text=O%20total%20de%20emiss%C3%B5es%20brutas,de%20Efeito%20Estufa%20(SEEG).). Acesso em: 08 abr. 2022.

SONG, X.; SONG, S.; LI, Z.; LIU, W.; LI, J.; KANG, Y.; SUN, W. Past and future changes in regional crop water requirements in Northwest China. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.]. v. 137, p. 2203-2215, 2019.

SONG, Z.; LIU, H.; STRÖMBERG, C. A.; WANG, H.; STRONG, P. J.; YANG, X.; WU, Y. Contribution of forests to the carbon sink via biologically-mediated silicate weathering: A case study of China. **Science of the Total Environment**, [s.l.]. v. 615, p. 1-8, 2018.

SOUSA, H. A. F. **Desempenho agrônômico, pós-colheita e caracterização físicoquímica e sensorial de variedades de bananeira cultivadas sob diferentes condições de reposições hídricas e adubo químico.** Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 212 f. 2019.

SOUZA JUNIOR, A. F.; CASELLI, F. T. R.; SOARES, R. D. B. Levantamento da pegada de carbono da cadeia produtiva do coco babaçu no estado do Piauí. **Mix Sustentável**, Piauí, v. 7, n. 1, p. 73-80, 2020. <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.mix2020.v7.n1.73-80>.

SOUZA, H. G. de; TABOSA, F.J.S.; CAMPOS, K.C.; VIEIRA FILHO, J.E.R.; NEDER, H.D. Análise da projeção espacial da fruticultura no nordeste brasileiro. **Revista Econômica do Nordeste**, [s.l.]. v.49, p.121-141, 2018.

STABILE, M. C.; GUIMARÃES, A. L.; SILVA, D. S.; RIBEIRO, V.; MACEDO, M. N.; COE, M. T.; PINTO, E.; MOUTINHO, P.; ALENCAR, A. Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. **Land use policy**, [s.l.]. v. 91, p. 104362, 2020.

STEVENS, B.; GIORGETTA, M.; ESCH, M.; MAURITSEN, T.; CRUEGER, T.; FAST, S.; KINNE, S.; KORNBLUEH, L.; LOHMANN, U.; PINCUS, R.; REICHLER, T.; ROECKNER, E. Atmospheric component of the MPI-M Earth system model: ECHAM6. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, [s.l.]. v. 5, n. 2, p. 146-172, 2013.

TAN, M.L.; IBRAHIM, A.L.; YUSOP, Z.; CHUA, V.P.; CHAN, N.W. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River basin, Malaysia. **Atmospheric Research**, [s.l.]. v.189, 1– 10, 2017.

TAWALBEH, M.; AL-OTHMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. **Science of The Total Environment**, [s.l.]. v. 759, p. 143528, 2021.

TEIXEIRA, A. H. de C.; GONZAGA NETO, L.; MOURA, M. S. B. de. Condições de clima e solo. In: GONZAGA NETO, L. (Ed.). **goiaba: produção**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2001. P. 24-27.

UGAYA, C. M. L. Avaliação do ciclo de vida de produtos. In: ADISSI, P. J. et. al. (Orgs.). **Gestão ambiental de unidades produtivas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. Cap. 9, p. 275 – 298. ISBN 9788535251593.

USVA, K.; SINKKO, T.; SILVENIUS, F.; RIIPI, I.; HEUSALA, H. Carbon and water footprint of coffee consumed in Finland—life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.]. v. 25, p. 1976-1990, 2020.

VÁZQUEZ-ROWE, I.; TORRES-GARCÍA, J. R.; CÁCERES, A. L.; LARREA-GALLEGOS, G.; QUISPE, I.; KAHHAT, R. Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for the cultivation of grapes for pisco production. **Science of the Total Environment**, [s.l.]. v. 601, p. 532-542, 2017.

VILÉN, A.; LAURELL, P.; VAHALA, R. Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. **Journal of Environmental Management**, [s.l.]. v. 324, p. 116356, 2022.

WANG, Y. B.; WU, P. T.; ENGEL, B. A.; SUN, S. K. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China. **Science of the Total Environment**, [s.l.]. v. 497, p. 1-9, 2014.

WENYU, W.; KASHAGAN, K.; LANHAI, L. Sensitivities of Wheat and Maize Productivity in Kazakhstan to Future Climate Change Scenarios. **International Journal of Plant Production**, [s.l.]. v. 16, n. 3, p. 365-383, 2022.

WU, H.; MACDONALD, G. K.; GALLOWAY, J. N.; ZHANG, L.; GAO, L.; YANG, L.; YANG, J.; LI, X.; LI, H.; YANG, T. The influence of crop and chemical fertilizer combinations on greenhouse gas emissions: A partial life-cycle assessment of fertilizer production and use in China. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.]. v. 168, p. 105303, 2021.

XU, L.; SOLANGI, Y. A.; WANG, R. Evaluating and prioritizing the carbon credit financing risks and strategies for sustainable carbon markets in China. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. p. 137677, 2023.

XU, Z.; CHEN, X.; WU, S. R.; GONG, M.; DU, Y.; WANG, J.; LI, Y.; LIU, J. Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity in a major crop production region. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 224, p. 375-383, 2019.

XUE-ZHENG, Z. O. N. G.; XIAO-RUI, T. I. A. N.; YUN-HE, Y. I. N. Forest and Grass Fire Risk Assessment for Central Asia under Future Climate Scenarios. **Forestry Science Research**, [s.l.]. v. 34, n. 3, p. 13-22, 2021.

YAN, M.; CHENG, K.; YUE, Q.; YAN, Y.; REES, R. M.; PAN, G. Farm and product carbon footprints of China's fruit production—life cycle inventory of representative orchards of five major fruits. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.]. v. 23, p. 4681-4691, 2016.

YANG, F.; HE, F.; LI, S.; LI, M.; WU, P. A new estimation of carbon emissions from land use and land cover change in China over the past 300 years. **Science of The Total Environment**, [s.l.]. v. 863, p. 160963, 2023.

ZAMBÃO, J. C.; BELLINTANI NETO, A. M. **Cultura da goiaba**. Campinas: Coordenadoria de assistência técnica integral. CATI, Boletim técnico, 236, p. 23, 1998.

ZHANG, J.; GUAN, K.; PENG, B.; JIANG, C.; ZHOU, W.; YANG, Y.; PAN, M.; FRANZ, T.; HEEREN, D. M.; ABIMBOLA, O.; KIMM, H.; CAYLOR, K.; GOOD, S.; KHANNA, M.; GATES, J.; CAI, Y. Challenges and opportunities in precision irrigation decision-support systems for center pivots. **Environmental Research Letters**, [s.l.]. v. 16, n. 5, p. 053003, 2021.

ZHANG, P.; HE, J.; HONG, X.; ZHANG, W.; QIN, C.; PANG, B.; LI, Y.; LIU, Y. Carbon sources/sinks analysis of land use changes in China based on data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 204, p. 702-711, 2018.

ZHOU, Y.; HE, J.; CHEN, R.; LI, X. Recent advances in biomass-derived graphene and carbon nanotubes. **Materials Today Sustainability**, [s.l.]. v. 18, p. 100138, 2022.

ZULUAGA, C. F.; AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F. B.; MARTINS, F. R.; CERON, W. L. The climate change perspective of photovoltaic power potential in Brazil. **Renewable Energy**, [s.l.]. v. 193, p. 1019-1031, 2022.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

Tabela 1A. Questionário aplicado junto aos produtores

1. Informações Gerais					
Fazenda:					
Localização:					
Contato:					
Data da visita:					
Cultura:					
Data de início do cultivo:					
Vegetação anterior ao cultivo:					
2. Informações sobre o pomar					
Densidade de plantio:					
Total de hectares:					
Espaçamento:					
Tipo de irrigação:					
Idade do pomar:					
Com quantos anos iniciou a produção:					
Com quantos anos estabilizou a produção:					
Vida útil do pomar:					
Produto principal:					
Coprodutos:					
3. Dados de produção					
Ano	Área plantada (ha)	Produção total (t)	Produção comercializada (t)	Produção refugada (t)	Produtividade (t/ha)
1					
2					
3					
4					
5					
Estabilização					
4. Operações agrícolas					
Qual operação foi realizada:					
Em qual ano de produção:					
Nome do equipamento:					
Quantas vezes no mesmo ano:					
5. Água e energia					
Ano	Água (m ³ /ha)	Período de irrigação	Consumo de energia (kwh/mês)		
1					
2					
3					

4						
5						
Estabilização						
6. Defensivos agrícolas						
Ano	Nome comercial do produto	Tipo	Unidade	Quantidade média aplicada	% Ingrediente ativo	Etapa de cultivo que utilizou
1						
2						
3						
4						
5						
Estabilização						
7. Fertilizantes inorgânicos						
Ano	Nome do produto	Etapa de cultivo utilizada	Quantidade média aplicada (L/ha)			
1						
2						
3						
4						
5						
Estabilização						
8. Fertilizantes orgânicos						
Ano	Tipo	Quantidade média aplicada (kg/ha)	% Umidade	% NPK	Fonte (caprino, ovino, bovino...)	
1						
2						
3						
4						
5						
Estabilização						
9. Dados edafoclimáticos						
Precipitação:						

Tipo de solo:
% de área
% de argila
% de silte
Declividade do terreno:

APÊNDICE B – INVENTÁRIOS

● Inventário dos produtores de banana

Insumos	Unidade	Banana						
		Baixo Jaguaribe						
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Área	ha	1	1	1	1	1	1	1
Água	m ³	30.086,95	25.550	27.740	30.404,5	12.000	31.937,5	68437,5
Energia	kwh	5981,50	5079,52	7500	6044,63	2385,59	6349,4	13605,86
Produtividade								
Densidade	Pl	1500	1666	1600	1666	1666	1500	1500
kg da fruta	kg	42770	21000	18835,6	22776	30000	45000	22500
Adubação orgânica								
Esterco Bovino	kg	1446	2036	28891,25	28188,72	221,67	1000	-
Esterco de galinha	kg	3375	-	-	-	-	-	-
Adubação mineral								
Calcário dolomítico	kg	150	250	250	-	-	100	-
N	kg	184	225	9,6	307	310	579	55,8
P	kg	25	17	92,8	157	155	50	30,6
K	kg	383	532	118	255	600	330	64,8
Macronutrientes secundários	kg	93,5	149	13,3	135	589	22,5	18
Micronutrientes	kg	8,56	7,51	-	-	-	-	-
Defensivos agrícolas								
Óleo mineral	kg	30	-	0,46	-	-	-	-
Piraclostrobina	kg	0,2	-	-	-	-	1,6	0,532
Epoxiconazol	kg	0,075	-	-	-	-	0,6	0,2
Hidrocarboneto aromático	kg	0,3	-	-	-	-	2,4	0,8
Trifloxistrobina	kg	0,15	-	-	-	-	-	-
Tebuconazol	kg	0,3	-	-	-	-	-	-
Terbufós	kg	3,04	-	-	-	-	-	-
Glifosato	kg	-	6	-	0,9	-	-	-
Ácido de glifosato	kg	-	4,5	-	0,675	-	-	-
Dicloreto de paraquat	kg	-	3,45	-	-	-	-	-
Imidacloprido	kg	-	-	0,373	-	-	-	-
Espiromesifeno	kg	-	-	2,23	-	-	-	-
Glifosato – Sal de potássio	kg	-	-	19,84	-	-	-	-
Glifosato – Sal de amônio	kg	-	-	9,6	1,5	-	8	-

Éter monometílico	Kg	-	-	5,28	0,825	-	4,4	-
Difenoconazol	kg	-	-	2,2	-	0,04	-	-
Abamectina	kg	-	-	0,144	-	-	0,036	0,07
Nafta de petróleo	kg	-	-	6,9	-	-	-	-
Clorpirifós	kg	-	-	3,84	-	-	-	1,8
Xileno	kg	-	-	4	-	-	-	2
Tiametoxam	kg	-	-	0,8	-	-	-	-
Profenofos	kg	-	-	3,2	-	-	-	-
Cipermetrina	kg	-	-	0,32	-	-	-	1
Alquil ester etoxilado do ácido fosfórico	kg	-	-	-	0,42	-	-	-
Sulfluramida	kg	-	-	-	-	0,03	-	-
Flutriafol	kg	-	-	-	-	-	0,5	-
Mancozebe	kg	-	-	-	-	-	-	3,2
Mecanização								
Desmatar	Hora	0,8	-	-	-	-	-	-
Arado	Hora	-	-	0,58	0,08	0,17	0,2	0,2
Gradagem	Hora	0,3	0,25	0,22	0,17	-	0,1	0,2
Aplicação Gesso	Hora	-	0,03	-	-	-	-	-
Aplicação calcário	Hora	0,1	0,1	-	-	0,08	0,1	-
Escavadeira	Hora	0,9	-	-	-	-	-	-
Roço	Hora	0,15	-	12	-	-	-	-
Sulcamento	Hora	-	0,05	-	-	0,04	-	-
Pulverização	Hora	0,3	-	0,1112	-	-	-	-
Diesel	L ano ⁻¹	29,7	4,21	105,22	2,67	2,67	3,90	4,20
Transporte								
Insumos e produção	tkm	12263,61	10008,62	7753,92	10861,3	16116,43	14912,5	6567,46
Emissões								
Emissões para o ar								
Amônia (NH ₃)	kg	33,5	6,4	15,3	17,4	4,21	92,9	8,38
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg	4,45	5,33	0,682	7,11	7,18	13,0	1,68
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	kg	7,28	26,8	18,3	30,1	30,2	40,8	20,1
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg	298	142	119	0,0	0,0	797	67,5
Emissões de mudança do uso da terra								
CO ₂	kg	1657,46	1597,42	1621,29	1597,42	1597,42	1657,46	1657,46
CO	kg	299	299	299	299	299	299	299
CH ₄	kg	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
N ₂ O	kg	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966
NO _x	kg	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Inventário dos produtores de goiaba

Insumos	Unidade	Goiaba				
		Baixo Jaguaribe				
		P1	P2	P3	P4	P5
Área	ha	1	1	1	1	1
Água	m ³	19262,88	30052,3	15398,44	41062,5	26608,5
Energia	kwh	3829,6	1950	3061,32	8163,5	5290
Produtividade						
Densidade	Pl	275	476	277	250	270
kg da fruta	kg	34625	41475,47	14400	26875	13625
Adubação orgânica						
Esterco Bovino	kg	1960	10174,98	-	9176,7	270
Esterco de galinha	kg	-	-	-	-	-
Adubação mineral						
Calcário dolomítico	kg	125	53,3	125	20,8	-
Gesso	kg	-	-	-	-	-
N	kg	149	250	81	1,8	204
P	kg	166	427	90,1	1,92	119
K	kg	172	241	120	7,2	59,7
Macronutrientes secundários	kg	171	117	26,5	8,74	199
Micronutrientes	kg	7,98	9,58	2,22	13	0,13
Defensivos agrícolas						
Glufosinato – Sal de amônio	kg	0,91	-	-	-	-
Éter monometílico	kg	0,5	-	-	-	-
Imidacloprido	kg	0,4	1,92	-	-	-
Dimetoato	kg	1,6	-	-	-	5
Ciclohexanone	kg	1,22	-	-	-	3,6
Xylene	kg	1,15	-	-	-	3,93
Clorpirifós	kg	1,26	-	-	-	-
Xileno	kg	1,32	3,45	-	-	-
Casugamicina	kg	0,1	-	-	-	-
Monoetilenoglicol	kg	0,25	-	-	-	-
Azoxistrobina	kg	0,25	-	-	-	-
Mancozebe	kg	1	-	-	-	-
Deltametrina	kg	0,041	-	-	0,004	-
Hidrocarboneto aromático	kg	1,30	-	-	0,12	-
Beta-Cipermetrina	kg	0,1	-	-	-	-
Destilado de petróleo	kg	0,066	-	-	-	-

Solvente nafta de petróleo	kg	0,5	-	-	-	-
Acefato	kg	1,44	-	-	-	-
Beta-ciflutrina	kg	0,074	-	-	-	-
Abamectina	kg	-	0,13	-	-	0,21
Tiofanato-metílico	kg	-	1	-	-	1,64
Clorotalonil	kg	-	2,52	-	-	4,1
Alfa-cipermetrina	kg	-	0,48	-	-	-
Hidróxido de cobre	kg	-	10,32	-	-	-
Lambda-cialotrina	kg	-	-	0,009	-	-
Cipermetrina	kg	-	-	-	-	2,92
Paraquate	kg	-	-	-	-	0,19
Mecanização						
Desmatar	Hora	0,67	-	-	-	-
Arado	Hora	-	0,53	-	-	-
Gradagem	Hora	0,25	0,2	0,17	0,2	0,2
Aplicação calcário	Hora	0,08	0,07	0,08	0,04	-
Escavadeira	Hora	0,75	-	-	-	-
Roço	Hora	0,04	-	-	-	-
Pulverização Diesel	Hora L ano ⁻¹	- 17,33	- 8,07	2,41 21,78	- 2,17	- 1,8
Transporte						
Insumos e produção	tkm	10901,47	13390,8	4594,37	5561,27	6599,8
Emissões						
Emissões para o ar						
Amônia (NH ₃)	kg	4,25	11,4	10,9	4,83	12,0
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg	4,18	6,37	2,71	1,00	5,37
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	kg	23,8	27,8	21,1	18,0	26,0
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg	59,6	25,4	140	9,91	0,0
Emissões de mudança do uso da terra						
CO ₂	kg	1188,02	808,70	1180,66	1280,02	1206,42
CO	kg	299	299	299	299	299
CH ₄	kg	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
N ₂ O	kg	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966
NO _x	kg	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

- Inventário de referência para ambas as culturas (bananeira e goiabeira)

Insumos	Unidade	Referência	
		Banana	Goiaba
Área	ha	1	1
Água	m ³	22.727	10.417
Energia	kwh	2400	1900
Produtividade			
Densidade	Pl	1909	350
kg da fruta	kg	36.125	23.500
Adubação orgânica			
Esterco Bovino	kg	18181,8	10000
Adubação mineral			
Calcário dolomítico	kg	300	666,7
N	kg	228	137
P	kg	318	100
K	kg	330	186
Macronutrientes secundários	kg	34,7	-
Micronutrientes	kg	13,9	4,44
Defensivos agrícolas			
Glifosato	kg	0,096	0,096
<i>Benzovindiflupyr</i>	kg	0,725	-
Epoxiconazole	kg	0,07	-
Pyraclostrobin	kg	0,186	-
Isca formiga	kg	0,006	-
Lauril éter sulfato de sódio	kg	0,558	0,81
Fitalmida	kg	-	1,20
Copper oxychloride	kg	-	1,18
Mecanização			
Arado	Hora	0,3	0,3
Gradagem	Hora	0,2	0,2
Sulcamento	Hora	0,2	-
Diesel	L ano ⁻¹	3,66	2,27
Transporte			
Insumos e produção	tkm	12700,32	9320,53
Emissões			
Emissões para o ar			
Amônia (NH ₃)	kg	45,7	32,4
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg	4,44	2,96
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	kg	9,02	5,43
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg	400,00	541,00
Emissões de mudança do uso da terra			
CO ₂	kg	1509,53	912,03
CO	kg	299	299
CH ₄	kg	10,6	10,6
N ₂ O	kg	0,966	0,966
NO _x	kg	17,9	17,9

APÊNDICE C – ANÁLISE DE INCERTEZA

Tabela 1 - Resultado da análise de incerteza ao comparar os impactos dos produtores e inventário de referência

Categoria de impacto	Unidade	(A)	(B)	% de 1000 simulações onde A \geq B
		Banana		
		R	P1	96,4
		R	P2	0,0
		R	P3	0,0
		R	P4	0,0
		R	P5	0,0
		R	P6	0,0
		R	P7	0,0
		P1	P2	0,0
		P1	P3	0,0
		P1	P4	0,0
		P1	P5	0,0
		P1	P6	0,0
		P1	P7	0,0
Pegada de carbono	CO ₂ -eq	P2	P3	100
		P2	P4	96,1
		P2	P5	100
		P2	P6	100
		P2	P7	100
		P3	P4	0,0
		P3	P5	100
		P3	P6	99,4
		P3	P7	93,0
		P4	P5	100
		P4	P6	100
		P4	P7	100
		P5	P6	0,1
		P5	P7	0,0
P6	P7	1,6		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Resultado da análise de incerteza ao comparar os impactos dos produtores e inventário de referência

Categoria de impacto	Unidade	(A)	(B)	% de 1000 simulações onde A > B
		Goiaba		
		R	P1	0,0
		R	P2	0,0
		R	P3	0,0
		R	P4	0,1
		R	P5	0,0
Pegada de carbono	CO ₂ -eq	P1	P2	75,5
		P1	P3	0,0
		P1	P4	97,5
		P1	P5	0,0
		P2	P3	0,0
		P2	P4	88,3
		P2	P5	0,0
		P3	P4	100
		P3	P5	100
		P4	P5	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Resultado da análise de incerteza ao comparar os impactos dos produtores e inventário de referência

Categoria de impacto	Unidade	(A)	(B)	% de 1000 simulações onde A \geq B
			Banana	
		R	P1	17
		R	P2	0,0
		R	P3	0,0
		R	P4	0,0
		R	P5	100
		R	P6	14,5
		R	P7	0,0
		P1	P2	0,0
		P1	P3	0,0
		P1	P4	0,0
		P1	P5	100
		P1	P6	45,5
		P1	P7	0,0
Pegada de escassez hídrica	m ³ -eq	P2	P3	0,4
		P2	P4	11,3
		P2	P5	100
		P2	P6	100
		P2	P7	0,0
		P3	P4	91,1
		P3	P5	100
		P3	P6	100
		P3	P7	0,0
		P4	P5	100
		P4	P6	100
		P4	P7	0,0
		P5	P6	0,0
		P5	P7	0,0
		P6	P7	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Resultado da análise de incerteza ao comparar os impactos dos produtores e inventário de referência

Categoria de impacto	Unidade	(A)	(B)	% de 1000 simulações onde A >= B
Goiaba				
Pegada de escassez hídrica	m ³ -eq	R	P1	2,8
		R	P2	0,0
		R	P3	0,0
		R	P4	0,0
		R	P5	0,0
		P1	P2	0,0
		P1	P3	0,0
		P1	P4	0,0
		P1	P5	0,0
		P2	P3	0,0
		P2	P4	0,0
		P2	P5	0,0
		P3	P4	0,0
		P3	P5	0,0
		P4	P5	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A - FÓRMULA E FATORES UTILIZADOS

1 Mudança de carbono na biomassa (MCT, 2010)

$$(1) E = \frac{(A \times (C - avAgri))}{20} \times \frac{44}{12} \times 72\%$$

Onde:

E - Emissão de carbono (t CO₂.ha⁻¹), considerando um período de 20 anos desde a conversão de uso da terra;

A - Área convertida em área agrícola (ha);

C - Estoque de carbono na biomassa e na matéria orgânica morta (t C.ha⁻¹);

avAgri - estoque de carbono na área de produção (t C.ha⁻¹);

72% - Porcentagem de perda de carbono da degradação biológica da biomassa após a mudança no uso da terra, segundo Nemecek (2016).

Tabela 1. Valores das variáveis utilizadas para os produtores de banana do estudo

Variável	R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
A	1	1	1	1	1	1	1	1
C	26,45	26,45	26,45	26,45	26,45	26,45	26,45	26,45
avAgri*	5,23	4,11	4,56	4,38	4,56	4,56	4,11	4,11

*O valor de estoque de carbono foi obtido com base no estudo de Danarto et al. (2015), onde a partir de análises foi afirmado que a bananeira imobiliza em média 2,74 kg C/planta.ano.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2. Valores das variáveis utilizadas para os produtores de banana do estudo

Variável	R	P1	P2	P3	P4	P5
A	1	1	1	1	1	1
C	26,45	26,45	26,45	26,45	26,45	26,45
avAgri*	9,76	7,67	10,54	7,72	6,97	7,53

*O valor de estoque de carbono foi obtido com base no estudo de Rathore et al. (2018), onde a partir de análises foi afirmado que a goiabeira imobiliza em média 7,75 kg C/planta.ano.

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

2 Mudança de carbono no solo (IPCC, 2007)

$$(2) Es = (A \times C_{solo} \times \frac{[fc(t_0) - fc(t_f)]}{20}) \times \frac{44}{12}$$

$$(3) fc(t) = fUT \times fMG \times fi$$

Onde:

- Es - emissões líquidas de carbono pelo solo (t CO₂.ha⁻¹);
 A - área (ha);
 Csolo - estoque de carbono no solo da área, associação solo-vegetação (t C.ha⁻¹);
 fc (t) - fator de alteração de carbono num tempo t (adimensional);
 fUT - fator de alteração de carbono relacionado tipo de cultura (anual, perene, pastagem) (adimensional);
 fMG - fator de alteração de carbono relacionado ao manejo ou revolvimento do solo (adimensional).
 fi - fator de alteração de carbono relacionado às entradas de matéria orgânica (adimensional).

Tabela 3. Valores das variáveis utilizadas.

Variável	Jaguarib
	e
A	1
Csolo*	15,10
fc	1,493
fUT	1
fMG	1,09
fi	1,37

*Csolo: solo latossolo com argila de baixa atividade e caatinga = 2,58 kg C/ha; solo arenoso e caatinga = 1,51 kg C/ha.

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

3 Emissões de N₂O, CH₄, NO_x e CO pela queima da biomassa removida (IPCC, 2007)

$$(4) \text{ Emissões } (i) = A * M_b * C_f * G_{ef} * 10^{-3}$$

Onde:

Emissões (i) = emissões de gás pela queima da biomassa removida (kg i.ha⁻¹);

i = N₂O, CH₄, NO_x e CO;

A = área queimada (ha);

M_b = massa de combustível disponível para combustão (t.ha⁻¹);

C_f = fator de combustão (adimensional);

G_{ef} = fator de emissão (g.kg matéria orgânica queimada⁻¹).

Tabela 4. Valores das variáveis utilizadas no estudo

Variável	Jaguaribe
1	
A	1
$M_b * C_f$	4,6
$G_{ef} (CO_2)$	1613
$G_{ef} (N_2O)$	0,21
$G_{ef} (CH_4)$	2,3
$G_{ef} (NO_x)$	3,9
$G_{ef} (CO)$	65

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

3 Emissões de N₂O e NO_x por mineralização da matéria orgânica (IPCC, 2007)

a) Emissões Diretas

$$(5) \text{ Emissões } N - N_2O = (F_{SOM}) * EF1) * \frac{44}{28}$$

$$(6) F_{SOM} = [(\Delta C_{solo} * \frac{1}{R}) * 1000]$$

Onde:

Emissões N-N₂O = emissões diretas de N₂O da mineralização da matéria orgânica (kg N₂O.ha);

FSOM = quantidade de N mineralizado no solo pela mudança no uso da terra (kg N₂O.ha);

EF1 = fator de emissão para o N₂O (adimensional);

Csolo = estoque de carbono no solo da área, associação solo-vegetação (t C.ha⁻¹);

R = C:N = relação carbono e nitrogênio da matéria orgânica do solo, que é 15, segundo o IPCC (2007).

Tabela 5. Valores das variáveis utilizadas no estudo

Variável	Jaguaribe
F _{SOM}	-24,7
EF1	0,01
C _{solo}	0,0
R	15

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Emissões indiretas por lixiviação e escoamento

$$(7) N - N_2O = \left((F_{SOM}) * Frac_{leach-(H)} * EF_5 \right) * \frac{44}{28}$$

Onde:

N-N₂O = quantidade de N₂O produzida pela lixiviação e escoamento das adições de nitrogênio no solo (kg N₂O.ha);

F_{SOM} = quantidade de nitrogênio mineralizado no solo pela mudança no uso da terra (kg N₂O.ha);

Frac_{leach-(H)} = fração de nitrogênio adicionado/mineralizado que é perdido por lixiviação ou escoamento, que é 0,3, segundo o IPCC (2007);

EF₅ = fator de emissão (kg N-1), que é 0,0075, segundo o IPCC (2007).

Tabela 6. Valores das variáveis utilizadas no estudo

Variável	Jaguaribe
F _{SOM}	-24,7
Frac _{leach-(H)}	0,24
EF ₅	0,011

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

c) Emissões indiretas de óxidos de nitrogênio (NO_x) pela mineralização da matéria orgânica (Nemecek; Schnetzer, 2011)

$$(8) \quad \text{[NO]}_x = 0,21 * \text{N}_2\text{O}$$

Onde:

NO_x = emissão de NO_x pela mineralização da matéria orgânica pela mudança no uso do solo (kg NO_x.(ha.ano)⁻¹);

N₂O = emissões diretas de N₂O da mineralização da matéria orgânica (kg N₂O.ha) - calculada no item 'a'.

EMISSÕES RELATIVAS À PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM CAMPO

1 Emissão de NH₃ para o ar pelo uso de fertilizantes nitrogenados (Modelo Agrammon – Nemecek e Schnetzer, 2011)

$$(9) \quad \text{[NH]}_3\text{-N min} = \sum_{i=1}^N (m_{\text{fert}_i}) * \text{[EF]}_i * 17/14$$

Onde:

NH₃ - N_{min} = quantidade de amônia emitida pelo uso de fertilizantes nitrogenados (kg NH₃.(ha.ano⁻¹))

N_{fert} = quantidade total de nitrogênio aplicada na forma de fertilizantes ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Tabela 13. Valores das variáveis utilizadas no estudo

Variável	Banana	Goiaba
N_{fert}	Citado na tabela 8	Citado na tabela 9

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Emissão de CO₂ fóssil pela aplicação de calcário (IPCC, 2007)

$$(17) \text{ Emissão de CO}_2 = m_{\text{calcário}} * EF1 + m_{\text{cal.dolomítico}} * EF2$$

Onde:

Emissão de CO₂ = quantidade de CO₂ fóssil emitido para o ar ($\text{kg CO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$);

$m_{\text{calcário}}$ = massa de calcário aplicada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$);

$EF1$ = fator de emissão para o calcário ($\text{kg CO}_2\text{-C/kg}$);

$m_{\text{cal.dolomítico}}$ = massa de calcário dolomítico aplicada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$);

$EF2$ = fator de emissão para o calcário dolomítico ($\text{kg CO}_2\text{-C/kg}$).

Tabela 14. Valores das variáveis utilizadas no estudo (bananeira)

Variável	R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
$m_{\text{cal.dolomítico}}$	300	150	250	250	-	-	100	-
$EF1$	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15. Valores das variáveis utilizadas no estudo (goiabeira)

Variável	R	P1	P2	P3	P4	P5
$m_{\text{calcdolomítico}}$	666,7	125	53,3	125	20,8	-
EF1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 Emissão de CO₂ fóssil devido à aplicação de ureia como fertilizante (IPCC, 2007)

$$(18) \text{ Emissões } C - CO_2 = (M * EF) * \frac{44}{12}$$

Onde:

Emissões C-CO₂ = emissões de CO₂ pela aplicação de ureia (kg CO₂.(ha.ano)⁻¹);

M = massa de ureia na forma de nitrogênio (kg N.(ha.ano)⁻¹);

EF = fator de emissão da ureia (kg CO₂/kgN).

Tabela 16. Valores das variáveis utilizadas no estudo (bananeira)

Variável	R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
M	350	139	13,8	0,0	0,0	0,0	460	41,4
EF	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17. Valores das variáveis utilizadas no estudo (goiabeira)

Variável	R	P1	P2	P3	P4	P5
M	305	0,0	0,0	49,4	0,0	0,0
EF	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO B - INVENTÁRIOS ECOINVENT BANANA E GOIABA

Insumos banana	Inventários
Área de estudo e referência	
Água	Water, unspecified natural origin, BR, Baixo Jaguaribe
Esterco bovino	Manure, solid, cattle {GLO} manure, solid, cattle, Recycled Content cut-off Cut-off, U
Esterco aves	Poultry manure, dried {GLO} poultry manure, dried, Recycled Content cut-off Cut-off, U
Gesso	Gypsum, mineral {RoW} gypsum quarry operation Cut-off, U
Calcário dolomítico	Dolomite {RoW} dolomite production Cut-off, U
Ureia	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from urea Cut-off, U
Sulfato de amônia	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from ammonium sulfate Cut-off, U
Fosfato monoamônico	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from monoammonium phosphate Cut-off, U
Nitrato de potássio	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from potassium nitrate Cut-off, U
Nitrato de cálcio	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {GLO} nutrient supply from calcium nitrate Cut-off, U
Formulação (NPK)	NPK (26-15-15) fertiliser {RoW} NPK (26-15-15) fertiliser production Cut-off, U
Superfosfato simples	Inorganic phosphorus fertiliser, as P ₂ O ₅ {RoW} nutrient supply from single superphosphate Cut-off, U
Fosfato monoamônico	Inorganic phosphorus fertiliser, as P ₂ O ₅ {RoW} nutrient supply from monoammonium phosphate Cut-off, U
Nitrato de potássio	Inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O {RoW} nutrient supply from potassium nitrate Cut-off, U
Cloreto de potássio	Inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O {RoW} nutrient supply from potassium chloride Cut-off, U
Sulfato de potássio	Inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O {RoW} nutrient supply from potassium sulfate Cut-off, U
Magnésio	Magnesium {GLO} market for magnesium Cut-off, U
Enxofre	Sulfur {GLO} market for sulfur Cut-off, U
Zinco	Zinc {RoW} primary zinc production from concentrate Cut-off, U
Cobre	Copper carbonate {RoW} copper carbonate production Cut-off, U
Manganês	Manganese {RoW} manganese production Cut-off, U
Boro	Boron carbide {GLO} boron carbide production Cut-off, U
Molibdênio	Molybdenum {RoW} molybdenum production Cut-off, U
Pesticidas não específicos	Pesticide, unspecified {RoW} pesticide production, unspecified Cut-off, U
Mancozebe	Mancozeb {RoW} mancozeb production Cut-off, U
Glifosato	Glyphosate {RoW} glyphosate production Cut-off, U
Pulverização	Application of plant protection product, by field sprayer {BR} application of plant protection product, by field sprayer Cut-off, U
Roço	Weed control, by brush cutter, pasture {BR} weed control, by brush cutter, pasture Cut-off, S

Arado	Tillage, subsoiling, by subsoiler plow {BR} tillage, subsoiling, by subsoiler plow Cut-off, U
Grade	Tillage, harrowing, by offset leveling disc harrow {BR} tillage, harrowing, by offset leveling disc harrow Cut-off, S
Aplicação de calcário e gesso	Limestone and gypsum application, by spreader {BR} limestone and gypsum application, by spreader Cut-off, U
Sulcamento	Furrowing, sugarcane {RoW} furrowing, sugarcane Cut-off, U
tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Eletricidade	Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity, high voltage, production mix Cut-off, U

Insumos goiaba	Inventários
Área de estudo e referência	
Água	Water, unspecified natural origin, BR, Baixo Jaguaribe
Esterco bovino	Manure, solid, cattle {GLO} manure, solid, cattle, Recycled Content cut-off Cut-off, U
Calcário dolomítico	Dolomite {RoW} dolomite production Cut-off, U
Ureia	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from urea Cut-off, U
Sulfato de amônia	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from ammonium sulfate Cut-off, U
Fosfato monoamônico	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {RoW} nutrient supply from monoammonium phosphate Cut-off, U
Nitrato de cálcio	Inorganic nitrogen fertiliser, as N {GLO} nutrient supply from calcium nitrate Cut-off, U
Formulação (NPK)	NPK (15-15-15) fertiliser {RoW} NPK (15-15-15) fertiliser production Cut-off, U
Superfosfato simples	Inorganic phosphorus fertiliser, as P ₂ O ₅ {RoW} nutrient supply from single superphosphate Cut-off, U
Fosfato monoamônico	Inorganic phosphorus fertiliser, as P ₂ O ₅ {RoW} nutrient supply from monoammonium phosphate Cut-off, U
Cloreto de potássio	Inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O {RoW} nutrient supply from potassium chloride Cut-off, U
Sulfato de potássio	Inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O {RoW} nutrient supply from potassium sulfate Cut-off, U
Magnésio	Magnesium {GLO} market for magnesium Cut-off, U
Enxofre	Sulfur {GLO} market for sulfur Cut-off, U
Zinco	Zinc {RoW} primary zinc production from concentrate Cut-off, U
Cobre	Copper carbonate {RoW} copper carbonate production Cut-off, U
Manganês	Manganese {RoW} manganese production Cut-off, U
Boro	Boron carbide {GLO} boron carbide production Cut-off, U
Molibdênio	Molybdenum {RoW} molybdenum production Cut-off, U
Silício	Silicon carbide {RoW} silicon carbide production Cut-off, U
Pesticidas não específicos	Pesticide, unspecified {RoW} pesticide production, unspecified Cut-off, U
Mancozebe	Mancozeb {RoW} mancozeb production Cut-off, U
Clorotalonil	Chlorothalonil {RoW} chlorothalonil production Cut-off, U
Pulverização	Application of plant protection product, by field sprayer {BR} application of plant protection product, by field sprayer Cut-off, U
Roço	Weed control, by brush cutter, pasture {BR} weed control, by brush cutter, pasture Cut-off, S
Arado	Tillage, subsoiling, by subsoiler plow {BR} tillage, subsoiling, by subsoiler plow Cut-off, U
Grade	Tillage, harrowing, by offset leveling disc harrow {BR} tillage, harrowing, by offset leveling disc harrow Cut-off, S
Aplicação de calcário e gesso	Limestone and gypsum application, by spreader {BR} limestone and gypsum application, by spreader Cut-off, U
Sulcamento	Furrowing, sugarcane {RoW} furrowing, sugarcane Cut-off, U
Aduação foliar	Fertilising, by broadcaster {BR} fertilising, by broadcaster Cut-off, U

tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {BR} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U
Eletricidade	Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity, high voltage, production mix Cut-off, U
