



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

ALBERTO CRUZ DA SILVA JUNIOR

**USO RACIONAL DA ÁGUA EM PLANTIOS DE LIMÃO TAHITI *Citrus latifolia* (Yu.
Tanaka) NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

BELÉM-PA

2022

ALBERTO CRUZ DA SILVA JUNIOR

USO RACIONAL DA ÁGUA EM PLANTIOS DE LIMÃO TAHITI *Citrus latifolia* (Yu. Tanaka) NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: "Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia"

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Orientadora: Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo

Coorientador: Adriano Marlisom Leão de Sousa

BELÉM-PA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586u Silva Junior, Alberto Cruz da.
Uso racional da água em plantios de limão tahiti, citrus latifolia
(Yu. Tanaka), na Amazônia Oriental / Alberto Cruz da Silva Junior.
— 2022.
101 f. : il. color.
Orientador(a): Profa. Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo
Coorientador(a): Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Souza
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais,
Belém, 2022.
1. Limão. 2. Citros. 3. Evapotranspiração. 4. Pegada Hídrica. 5.
Sustentabilidade. I. Título.

CDD 630.275

ALBERTO CRUZ DA SILVA JUNIOR

USO RACIONAL DA ÁGUA EM PLANTIOS DE LIMÃO TAHITI *Citrus latifolia* (Yu. Tanaka) NA AMAZÔNIA ORIENTAL

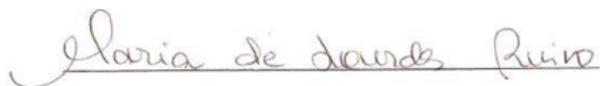
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: "Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia"

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Data de avaliação: 18 / 07 / 2022

Banca Examinadora:



Prof. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo - Orientadora
Doutora em Agronomia
Museu Paraense Emílio Goeldi



Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Membro interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Osvaldo Ryohei Kato – Membro externo
Doutor em Agricultura Tropical
Embrapa Amazônia Oriental



Prof^a. Lucieta Guerreiro Martorano - Membro externo
Doutora em Fitotecnia/Agrometeorologia
Embrapa Amazônia Oriental



Prof. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza – membro
Doutor em Meteorologia Agrícola
Universidade Federal Rural da Amazônia

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará pela oportunidade e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) pelos ensinamentos recebidos.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro no programa de doutorado acadêmico em inovação.

À Citropar Agropecuária LTDA pelo apoio financeiro para condução do experimento.

À professora Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo pela orientação nesta pesquisa.

À professora Dra. Lucieta Guerreiro Martorano pela orientação nesta pesquisa.

Ao professor Dr. Adriano Marlisom pela coorientação.

Ao professor Dr. Paulo Jorge de Oliveira pela valiosa colaboração na parte técnica e científica e pelo apoio na facilitação de equipamentos nos trabalhos de campo.

Ao professor Everaldo Barreiros de Souza, pelas contribuições.

Ao Dr. Denis de Pinho Souza pelas contribuições e ajuda com os entendimentos técnicos.

Ao Dr. Hildo Giusepe pelas contribuições e ajuda com a manipulação dos sensores.

Ao Msc. João Novoa pelas contribuições em campo e ajuda com a manipulação das tabelas de dados.

À professora Dra. Carina Melo da Silva pelas contribuições nas pesquisas.

À minha esposa Carolina Melo da Silva, sempre presente em todas as etapas do meu doutorado.

À Deus, por tudo.

RESUMO

A necessidade de utilização mais racional dos recursos hídricos exige mudanças de comportamento da sociedade em prol do uso mais sustentável dos recursos naturais. Esta pesquisa interdisciplinar investigou como interações solo-planta-atmosfera modificam o balanço de energia e a demanda evapotranspiratória em plantios de limão tahiti e como estas variações interferem na sustentabilidade hídrica da cultura na Amazônia oriental. Os objetivos específicos são: avaliar a sazonalidade do balanço de energia e da demanda hídrica do limão tahiti; definir parâmetros que contribuam para o uso eficiente da água na irrigação na Amazônia Oriental e calcular as pegadas hídricas verde, azul e cinza da produção de limão na região e comparar com as principais regiões produtoras do Brasil. Com os resultados dessa tese, espera-se contribuir para gerar uma base sólida de informações que permitam otimizar a reposição de água na irrigação; e quantificar o tamanho da apropriação humana sobre este recurso natural nas áreas de cultivo. Foram monitorados dados meteorológicos: temperatura do ar em dois níveis acima do dossel, umidade relativa do ar, radiação extraterrestre, velocidade e direção do vento, pluviosidade e fluxo de calor para o solo; dados relativos ao solo: granulometria, fertilidade química, densidade aparente e conteúdo volumétrico de água no solo; e dados inerentes a planta: profundidade efetiva do sistema radicular, floração, frutificação e índice de área foliar. Também utilizamos bases de dados do IBGE, INMET, ANA e MAPBIOMAS como fonte para os cálculos das pegadas hídricas da produção de limão tahiti em 48 municípios de 4 estados, correlacionando suas respectivas PH's com índices de segurança hídrica governamentais e assim avaliar a sustentabilidade da produção. Como resultados principais do capítulo 2, verificou-se que 63% da energia disponível foi utilizada para produzir calor latente no período mais chuvoso, enquanto 60% foram utilizados durante o período menos chuvoso. O calor sensível utilizou 32% e 34% durante o período mais e menos chuvoso, respectivamente. Já o calor no solo apresentou pouca variação com média de 5% para todo período. O consumo hídrico do limão tahiti durante o experimento foi de 1599 mm, com média diária de 3,70 mm dia⁻¹, enquanto o valor médio do Kc foi de 1,4. Estes resultados permitem projetar de forma adequada os protocolos de suprimento hídrico para cultura no principal polo citrícola da região amazônica. No capítulo 3, os principais achados são que existe ampla variabilidade da PH entre os municípios produtores, com destaque para os estados de São Paulo e Minas Gerais onde foram obtidos os melhores resultados. Nos estados da Bahia e Pará encontramos elevadas PH's, associadas, principalmente a baixas produtividades. Concluimos, assim, que a sazonalidade das

demandas evapotranspiratórias da cultura do limão seguem dinâmicas específicas na região amazônica, e que a pegada hídrica foi um bom aferidor da apropriação da água durante a produção do limão tahiti.

Palavras-chave: limão; citros; evapotranspiração; pegada hídrica; sustentabilidade.

ABSTRACT

The need for a more rational use of water resources requires changes in society's behavior in favor of a more sustainable use of natural resources. This interdisciplinary research investigated how soil-plant-atmosphere interactions modify the energy balance and evapotranspiration demand in Tahiti lime plantations and how these variations interfere in the water sustainability of the crop in the eastern Amazon. The specific objectives are to evaluate the seasonality of the energy balance and the water demand of the Tahiti lime and to define parameters that contribute to the efficient use of water in irrigation in the Eastern Amazon. In addition, calculate the green, blue and gray water footprints of lemon production in the region and compare with the main producing regions in Brazil. With the results of this thesis, it is expected to contribute to generate a solid base of information that allows optimizing the replacement of water in irrigation and quantifying the size of human appropriation of this natural resource in the areas of cultivation. Meteorological data were monitored: air temperature at two levels above the canopy, relative air humidity, extraterrestrial radiation, wind speed and direction, rainfall and heat flux to the ground; soil data: granulometry, chemical fertility, bulk density and volumetric soil water content; and data inherent to the plant: effective depth of the root system, flowering, fruiting and leaf area index. We also use IBGE, INMET, ANA and MAPBIOMAS databases as a source for calculating the water footprints of tahiti lime production in 48 municipalities in 4 states, correlating their respective PH's with government water security indices and thus evaluating the sustainability of production. As main results of chapter 2 it was found that 63% of the available energy was used to produce latent heat in the wettest period, while 60% were used during the less rainy season. Sensible heat used 32% and 34% during the most and least rainy period, respectively. On the other hand, soil heat showed little variation, with an average of 5% for the entire period. The water consumption of Tahiti lime during the experiment was 1599 mm, with a daily mean of 3.70 mm day⁻¹, while the mean value of K_c was 1.4. These results allow the adequate design of water supply protocols for culture in the main citrus pole in the Amazon region. In chapter 3, the main findings are that there is wide variability in PH among the producing municipalities, with emphasis on the states of São Paulo and Minas Gerais, where the best results were obtained. In the states of Bahia and Pará, we found high PH's associated mainly with low productivity. In general, we conclude that the seasonality of

the evapotranspiration demands of the lemon crop follow specific dynamics in the Amazon region and that the water footprint was a good gauge of water appropriation during the production of tahiti lemon.

Keywords: lemon; citrus; evapotranspiration; water footprint; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 01

- Figura 1- Série histórica da estimativa da superfície média de água em todo o território brasileiro..... 18

CAPÍTULO 02

- Figura 2- Localização da estação meteorológica da área experimental no município de Capitão Poço, região nordeste Paraense..... 35
- Figura 3 - Croqui do talhão experimental em um plantio comercial de limão (*Citrus latifolia*), destacando dimensões do talhão (setas pretas), sistema de irrigação (linhas brancas), “fetch” (rachura vermelha) e localização da torre experimental (círculo vermelho) 36
- Figura 4 - Procedimentos para determinação do índice de área foliar pelo método dos discos. Destacando a retirada das folhas na planta de limão (A), discos foliares frescos de área conhecida (B), material vegetal em estufa de secagem (C) e discos foliares após a secagem (D)..... 37
- Figura 5 - Distribuição dos 50 pontos utilizados no cálculo do percentual de cobertura do solo pela cultura do limão Tahiti na área experimental..... 39
- Figura 6 - Procedimentos para determinação da profundidade efetiva do sistema radicular evidenciando o cilindro coletor (A) e as peneira de separação de raízes grossas e finas (B) 40
- Figura 7 - Porcentagem de erros horários do método de razão de Bowen em diferentes meses do ano em Capitão Poço – PA..... 48
- Figura 8 - Variação dos elementos climáticos de temperatura e umidade relativa do ar (a) e do saldo de radiação e da evapotranspiração de referência (b) ao longo de 15 meses de experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA..... 50
- Figura 9 - Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo e da precipitação ao longo de 15 meses de experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA..... 52
- Figura10- Variabilidade média horária dos componentes do balanço energético diário durante o período mais chuvoso (a) e o período menos chuvoso (b) em experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA..... 53

CAPÍTULO 03

- Figura11– Variabilidade média mensal da precipitação efetiva, do déficit de consumo e da necessidade hídrica total da cultura do limão tahiti nos principais estados produtores do país..... 74
- Figura12– Componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica do limão tahiti em 4 estados e produtividade em 48 municípios produtores..... 75
- Figura13– Variabilidade da produtividade e das componentes da pegada hídrica verde, azul e cinza para 48 municípios em 4 estados produtores de limão tahiti..... 78
- Figura14– Índice de segurança hídrica do abastecimento urbano (ISH-U) para 48 municípios em 4 estados produtores de limão tahiti..... 80

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 -	Coeficientes da equação de van Genuchten ajustados até a profundidade de raiz efetiva da Limão Tahiti em Capitão poço.....	40
Tabela 2 -	Variáveis e instrumentos utilizados no experimento, assim como, a disposição dos sensores em relação ao solo e o dossel vegetal.....	41
Tabela 3 -	Condições adequadas para que os dados gerados pelo método da razão de Bowen sejam, são considerados consistentes, sob condições não advectivas.....	44
Tabela 4 -	Tipos de erros (equação 9) em que o método da razão de Bowen é considerado inconsistente.....	44
Tabela 5 -	Coeficiente da análise de regressão da correlação entre H + LE (coordenada Y) e Rn - G (coordenada X), ambos em W m ⁻² , durante os meses de outubro de 2020 e julho de 2021 em Capitão Poço - PA.....	45
Tabela 6 -	Índice de área foliar, fator de desacoplamento e média diária dos componentes do balanço de energia e partição diurna durante o período mais chuvoso e menos chuvoso no experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.....	55
Tabela 7 -	Variabilidade mensal da chuva, consumo hídrico, evapotranspiração da cultura (ETc) e do coeficiente de cultivo (kc) ao longo de 15 meses de experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.....	57
Tabela 8 –	Condições médias anuais da temperatura máxima, mínima e temperatura para 48 municípios avaliados.....	71
Tabela 9 –	Fontes de dados para as estimativas das demandas evapotranspirométricas verdes e azuis para cultura do limão utilizadas nos cálculos de pegada hídrica dos 48 municípios analisados.....	72
Tabela 10 –	Pegada hídrica total e distribuição percentual das componentes verde, azul e cinza por municípios, além dos índices de segurança hídrica, eficiência da distribuição de água, tipo de captação e perdas de superfície de água.....	82
Tabela 11 –	Comparações da PH do limão obtida por diferentes autores.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ANA: Agência Nacional de Águas

PH: pegada hídrica

PHverde: pegada hídrica verde

PHazul: pegada hídrica azul

PHcinza: pegada hídrica cinza

ADEPARA: Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará

FAO: Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

HLB: Huanglongbing

EMATER-PA: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Pará

GEE: gases do efeito estufa

SP: São Paulo

PA: Pará

ET: evapotranspiração

G: fluxo de calor pro solo

H: fluxo de calor sensível

LE: fluxo de calor latente

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

AF: área foliar

IAF: índice de área foliar

MSf: massa seca total das folhas

ATd: área total dos discos

MSd: massa seca dos discos

CC: capacidade de campo

PMP: ponto de murcha permanente

INMET: instituto nacional de meteorologia

PH verde: pegada hídrica do processo verde

PH azul: pegada hídrica do processo azul

PH cinza: pegada hídrica da produção cinza

DHC verde: demanda hídrica verde da cultura

DHC azul: demanda hídrica azul da cultura

Prty: produtividade

Pdc: duração do período de produtividade da cultura

TAQ: taxa de aplicação do fertilizante químico

Cmax: concentração máxima aceitável

Cnat: concentração nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

km²: quilômetro quadrado

km³: quilômetro cúbico

Mha: mega hectare

Kg: quilograma

CO₂: dióxido de carbono

CH₄: metano

N₂O: óxido nitroso

Rnc: saldo de radiação da copa das árvores

Rng: saldo de radiação de gramado

Rg: radiação solar global

EB: energia residual

m: metro

°C: graus celcius

MJ: mega joule

m²: metro quadrado

m³: metro cúbico

g: grama

cm: centímetro

LEi: fluxo de calor latente em intervalos de 20 minutos (m⁻²);

W: watt

λ : calor latente em vaporização

J: joule

S_{dv}: energia armazenada no sistema solo dossel vegetativo

F: energia utilizada no processo fotossintético

β : razão de bowen

kh: coeficientes de difusão turbulenta de vapor d'água

kw: coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível

ρ_a : é a densidade do ar

C_p : é o calor específico do ar à pressão constante

λ : é o calor latente de evaporação da água

T é a temperatura do ar

°K: graus kelvin

q: é a umidade específica do ar (kg kg^{-1})

γ : é o fator psicrométrico

ΔT = diferenças de temperatura do ar acima do dossel

Δe = diferenças de pressão de vapor d'água na camada de ar acima do dossel

T_{ar} : é a temperatura média do ar

u_2 : é a velocidade do vento

e_s : é a pressão de saturação do vapor

e_a : é a pressão de vapor de ar

kPa: quilo pascal

Δ : é a declividade da curva de pressão de vapor vs temperatura

mm: milímetro

α : fração de lixiviação/escoamento

mg: miligrama

L: litro

ha: hectares

ETc: evapotranspiração de cultura

ETo: evapotranspiração de cultura de referência

Kc: coeficiente de cultivo

Rn: saldo de radiação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1 Indicadores de sustentabilidade e os recursos hídricos	20
1.2 O contexto da produção agrícola na Amazônia sob a perspectiva da disponibilidade hídrica regional	22
1.3 A importância dos citros no contexto nacional e regional;	24
1.4 Justificativa e interdisciplinaridade da proposta	26
1.5 Hipóteses	28
1.6 Objetivos	29
1.6.1 Objetivo Geral.....	29
1.6.2 Objetivos específicos	29
1.7 Estrutura da tese	30
CAPÍTULO 2 BALANÇO DE ENERGIA E DEMANDA HÍDRICA DO LIMÃO TAHITI <i>Citrus latifolia</i> (Yu. Tanaka) NA AMAZÔNIA ORIENTA	31
2.1 Introdução	32
2.2 Materiais métodos	34
2.2.1 Descrição da área de estudo	34
2.2.2 Determinação do índice de área foliar (IAF) e do percentual de cobertura do solo (PCS)	36
2.2.3 Determinação da profundidade efetiva do sistema radicular	39
2.2.4 Conteúdo volumétrico de água no solo	40
2.2.5 Medições das variáveis meteorológicas.....	41
2.2.6 Balanço de energia pelo método da razão de Bowen	42
2.2.7 Critérios de rejeição de dados inconsistentes do método de razão de Bowen.....	43
2.2.8 Estimativa do fator de desacoplamento, da evapotranspiração e do coeficiente da cultura	45
2.3 Resultados e Discussão	47
2.3.1 Controle de qualidade dos dados obtidos pelo método da razão de Bowen	47
2.3.2 Condições ambientais e variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo.....	48
2.3.3 Sazonalidade do balanço de energia.....	53
2.3.4 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo	56

2.4	Conclusão	59
CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DA PRODUÇÃO DE LIMÃO NAS		
	PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DO BRASIL.....	65
3.1	Introdução	66
3.2	Material e Métodos	68
3.2.1	Fontes de dados para os calculos de pegada hídrica	68
3.3	Resultados e Discussão	73
3.4	Conclusão	88
CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL.....		
4.1	Resultados chaves: Impactos e Implicações	93
4.2	Prioridades para Pesquisas futuras	94
4.3	Considerações Finais	95
	REFERÊNCIAS.....	96

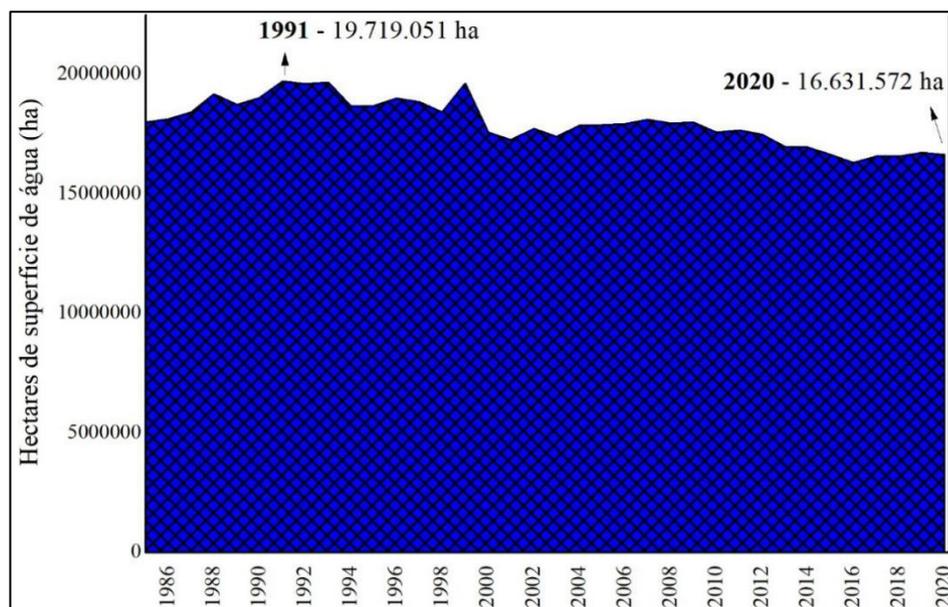
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

A água doce corresponde a apenas 3% da água da terra, de um montante total que corresponde à dois terços da superfície terrestre, porém 2% está armazenado na forma de gelo (IBGE, 2021). A maior fonte de água doce disponível da terra encontra-se na bacia amazônica, que drena uma área de $6,2 \times 10^6$ km² e descarrega uma média de 6.300 km³ de água para o Oceano Atlântico anualmente (MARENGO, 2006).

A região hidrográfica Amazônica detém aproximadamente 80% da água superficial do Brasil, porém essa região apresenta baixa densidade populacional e uma demanda reduzida por água (ANA, 2019a), contribuindo significativamente para o destaque no cenário mundial em relação à disponibilidade de água.

Nos últimos 30 anos tem se observado uma redução na superfície de água no Brasil, chegando a 3,1 milhões de ha, o que equivale a 15,7% de toda a área (Figura 1); na Amazônia essa redução foi de 10,4% (PROJETO MAPBIOMAS, 2021). Somando-se a isso, observa-se o aumento na frequência de eventos extremos de seca, a exemplo do ocorrido nos anos de 1999 e 2015, quando respectivamente, 50% e 70% do território nacional foram afetados (NDEHEDEHE et al., 2020).

Figura 1 - Série histórica da estimativa da superfície média de água em todo o território brasileiro.



Fonte: Projeto Mapbiomas (2021).

Em 2021, estados como Mato Grosso do Sul registraram redução de até 57% na superfície coberta por água e apesar de representar a situação mais crítica não reflete um caso isolado, pois outros 22 estados somam perdas consideráveis de volumes de água (PROJETO MAPBIOMAS, 2021). Diante desse cenário de perdas hídricas, faz-se necessária a boa gestão dos recursos hídricos de forma técnica e responsável, considerando as variáveis que eventualmente possam afetar os mecanismos de produção, captação e distribuição de água (MATTOS et al., 2019). A percepção histórica de que a água no Brasil é abundante prejudica a atenção, o investimento do governo e obscurece problemas reais relacionados à poluição, demanda, disponibilidade e conflitos por recursos hídricos (FERREIRA; LIMA; CORRÊA, 2020).

Neste sentido, podemos destacar que mesmo em ambientes como a Amazônia, marcada por uma significativa riqueza hídrica; superficial, atmosférica ou subterrânea; com uma população rural e urbana extremamente vinculada aos rios, lagos e igarapés, existe uma “crise da água” causada pela má de gestão dos recursos hídricos, e pelo baixo investimento financeiro e tecnológico na ampliação e melhoria dos serviços de abastecimento de água (BORDALO, 2017). Alterações nos regimes médios de chuva geram preocupações nas esferas científicas, políticas e sociais, pois é nos países menos desenvolvidos que existem as projeções mais acentuadas de redução na oferta de água. Soma-se a isso, maiores tendências em explorar, degradar e poluir os recursos naturais; em nosso caso, associados principalmente à conversão de áreas para agricultura e pecuária (MARENCO, 2008).

Quando analisamos a crise hídrica a nível de Bioma Amazônico, estes eventos causam preocupação adicional, não somente pela possível perda de biodiversidade, mas também pela possibilidade de efeitos sinérgicos no ciclo hidrológico, haja a vista a conhecida dependência de umidade exportada da região amazônica para outras regiões do país (LAURANCE; WILLIAMSON, 2001; PROJETO MAPBIOMAS, 2021).

Variações atípicas no cenário hidrológico do país tem sido alvo de vários estudos ao longo dos anos (LAURANCE; WILLIAMSON, 2001; MARENCO, 2006, 2008; NDEHEDEHE et al., 2020), entretanto poucas medidas mitigatórias têm sido efetivamente adotadas. Assim, novos eventos extremos climáticos têm colocado diversos setores da sociedade em alerta. É preciso reduzir os efeitos das mudanças climáticas globais de origem antropogênica para minimizar os impactos no abastecimento de água, pois os eventos climáticos extremos, como seca podem ser resultado do aumento da concentração de gases de efeito estufa, como resultado da queima de combustíveis fósseis (PARKS; MCLAREN, 2019) e de mudanças no uso da terra.

Os distúrbios nos ciclos hidrológicos têm estreita relação com as mudanças climáticas globais, logo, as medidas para mitigá-las não se dissociam das políticas de gestão dos recursos hídricos. Assim, a gestão da crise hídrica precisa de ações holísticas que considerem mudanças nos padrões de consumo da sociedade, o aumento populacional, o crescimento espacial desordenado das cidades, as incipientes políticas públicas ambientais, a baixa sensibilização ambiental do poder público, da população e o aumento da demanda por alimentos. Sendo necessária a adoção de indicadores de sustentabilidade que permitam mensurações e comparações entre as diferentes contribuições dos sistemas produtivos (COSTA, 2017) .

1.1 Indicadores de sustentabilidade e os recursos hídricos

Os princípios de sustentabilidade estão amplamente difundidos quando o assunto é a manutenção do equilíbrio ambiental. Entretanto, a base conceitual que deu origem ao tema ganhou força somente em meados da década de 80 com o advento dos primeiros grandes fóruns mundiais sobre o meio ambiente. Naquele momento, vários setores da sociedade se organizaram para debater os impactos negativos da interferência humana sobre o planeta. Com isso se aprofundaram as discussões sobre a apropriação humana dos recursos naturais, relacionando esta demanda diretamente às perspectivas de produção e sua eficiência em busca da sustentabilidade. Assim as consequências da pressão do consumo, de forma direta e indireta no meio ambiente, passaram a ser contabilizadas através de indicadores como a pegada ecológica, do carbono e hídrica (GALLI et al., 2012).

O indicador pegada ecológica foi proposto na década de 90 e analisa quanto da superfície da terra é necessário para suportar uma população com necessidades específicas (REES; WACKERNAGEL, 1996). A contabilização da pegada ecológica gera informação sobre a demanda da população sobre áreas da natureza, quantifica os recursos naturais utilizados pela população e compara com os recursos disponíveis (WACKERNAGEL et al., 2004). A adoção desse indicador foi um marco na adoção de indicadores de sustentabilidade e juntamente com os conceitos de “Pegada de Carbono” e “Pegada Hídrica” ajudaram a evidenciar que a humanidade está vivendo para além das capacidades do planeta (GALLI et al., 2012).

A pegada de carbono contabiliza a emissão de gases do efeito estufa liberados devido às atividades de consumo, enquanto que a pegada hídrica, a demanda por recursos naturais em termos de volume de água doce necessária para consumo humano (GALLI et al., 2012). O conceito de PH foi ganhando notoriedade à medida que popularizou a ideia de “água virtual” ou “água embutida”, a qual preconiza a contabilização de todo o volume de água ao longo de

uma cadeia produtiva e não somente a água contida no produto; por exemplo, a produção de uma tonelada de grão demanda mil metros cúbicos de água, de acordo com a teoria proposta por Allan (1998). A PH é expressa em volume água por unidade de produto ($m^3.t^{-1}$) e corresponde a toda água utilizada em todas as etapas da produção (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011).

Embora a pegada hídrica possa ser calculada para diversos grupos definidos de consumidores, seja um indivíduo, uma família, comunidade, cidade, estado, nação ou ainda para um determinado processo ou organização (HOEKSTRA et al., 2011), observamos que a PH de produtos agrícolas é a mais representativa, pois o uso doméstico de água corresponde a menos de 10% enquanto mais de 90% do consumo de água é direcionado para a produção de alimentos (ALLAN, 1998).

A contabilização da pegada hídrica é dividida principalmente em três partes, consistindo no volume de água que é aproveitado da chuva (PH verde), necessário para diluir poluentes a níveis aceitáveis (PH cinza) e do volume de água capitada da superfície e do subsolo consumida (evapotranspiração) como resultado da produção de um bem (PH azul). Assim, contabilizou-se a pegada hídrica da produção agrícola global no período de 1996 – 2005, quando foi utilizado mais de 7 bilhões de metros cúbicos de água por ano (78% PH verde, 12% PH azul e 10% PH cinza) (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011).

No Brasil, a preocupação com os recursos hídricos foi formalizada com a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos, em 1989, quando foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, com o objetivo de garantir a disponibilidade e o uso sustentável da água, bem como a prevenção contra eventos hidrológicos críticos (BRASIL, 1997). Nesse sentido, a Agência Nacional de Águas – ANA, entidade responsável pela implementação dessa política busca permanentemente a ampliação do conhecimento sobre o balanço hídrico em todo território nacional para subsidiar a gestão da oferta e demanda dos recursos hídricos (ANA, 2020). A atuação da ANA contempla o sexto objetivo dos dezessete (17) dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável adotados pela assembleia geral da ONU em 2015, visando estimular ações nos próximos quinze (15) anos em áreas de importância crítica para a humanidade e para o planeta (UNITED NATIONS, 2015). O Objetivo sexto desse documento visa garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água, englobando além da água potável para todos, a redução da poluição da água e o aumento da eficiência do uso da água em todos os setores para garantir retiradas sustentáveis.

No contexto de desenvolvimento sustentável a Amazônia requer atenção, pois é um ecossistema importante não somente para a preservação da biodiversidade, mas para a manutenção da estabilidade climática, seja estocando carbono ou ainda como fornecedor de umidade para a atmosfera, contribuindo para o ciclo das chuvas em diversas regiões do país (MARENGO, 2006). O território amazônico tem sido alvo de diversos impactos de origem antrópica devido às mudanças no uso da terra, expansão da fronteira agrícola e aumento da emissão dos gases de efeito estufa; porém pouco se sabe sobre a extensão dessas atividades sobre os recursos naturais, em especial sobre os recursos hídricos. De acordo com levantamento realizado nas principais plataformas de publicações de estudos científicos até o ano de 2016, menos de 3% dos estudos da pegada hídrica haviam sido direcionados à região amazônica (COSTA, 2017).

A PH é um importante indicador para avaliar se a água está sendo utilizada de maneira eficiente, à medida em que correlaciona volumes consuntivos à quantidade de produção de um determinado bem. Entretanto, definir um sistema produtivo como sustentável ou não sustentável em relação a PH deve considerar a disponibilidade hídrica da região avaliada, pois mesmo PH grandes podem ser consideradas sustentáveis em regiões ricas em água (SILVA et al., 2013).

É preciso compreender o impacto da ação antrópica nos ambientes e desenvolver formas mais eficientes e sustentáveis de aproveitamento dos recursos naturais para diminuir o efeito da pegada humana sobre o ecossistema amazônico. O estudo da PH e seus componentes verde, azul e cinza ajudam a avaliar padrões de consumo e produção, podendo direcionar ações estratégicas tanto a níveis regionais, quanto de forma mais abrangente, principalmente diante de cenários de escassez hídrica cada vez mais frequentes no Brasil.

1.2 O contexto da produção agrícola na Amazônia sob a perspectiva da disponibilidade hídrica regional

Na década de 70, políticas governamentais buscaram integrar a Amazônia ao resto do país por meio da construção de estradas e incentivos fiscais, ocasionando fortes ondas migratórias para a região, dando início à exploração intensiva de minérios, madeira e posteriormente, pecuária e agricultura (MARENGO, 2006). Essas mudanças no uso do solo ainda estão ocorrendo de maneira acelerada e em 2021 o acumulado de desmatamento (7.715 km²) se revelou o maior em 10 anos, concentrando-se nos estados do Pará e Amazonas (66%) (FONSECA et al., 2021).

Durante vários anos, os ciclos exploratórios na Amazônia ocasionaram a conversão de milhares de quilômetros quadrados de florestas em não florestas. Em 22 de julho de 2008, com a aprovação do Decreto Federal nº 6.514/2008 (BRASIL, 2008), todo o desmatamento ilegal ocorrido até aquela data foi anistiado, dispensando os infratores da obrigação de reparar os danos causados e reconhecendo as áreas convertidas como aptas ao uso alternativo do solo.

A região amazônica possui cerca de 210 Mha destinadas a agropecuária e apesar de 73% destas áreas estarem destinadas a criações de animais, observamos que o crescimento da agricultura entre os anos 1985 e 2020 foi de 290%, sendo superior ao crescimento da pecuária no mesmo período (PROJETO MAPBIOMAS, 2021). Além de extensas áreas convertidas em não floresta aptas ao desenvolvimento da agricultura, a região amazônica possui solo e clima favoráveis e ainda ampla oferta de recursos hídrico, podendo se configurar região estratégica para uma produção agrícola mais sustentável em relação ao uso da água (SILVA et al., 2013).

Do ano de 1960 a 2017 as áreas irrigadas no Brasil passaram de 0,5 para 6,7 milhões de hectares; em 2017, a região Norte do país representava apenas 5,6% deste percentual. Isto se explica em parte por uma ampla disponibilidade hídrica na região, mas também sugere que ainda há um amplo potencial a ser explorado, pois as demandas por captação de água para lavouras irrigadas chegam a médias de 53% do volume total no restante do país, enquanto que na região Amazônica esse percentual é de apenas 19% (IBGE, 2019 apud ANA, 2021).

O desenvolvimento da agricultura na Amazônia se deve, entre outros fatores, às consolidações de polos de produção de grãos como os de Paragominas, Dom Eliseu, Santarém, Belterra, bem como pela expansão da dendêicultura em municípios como Tailândia, Moju, Acará, Bonito. Além disso, pela criação de polos de fruticultura citrícola em ascensão, como os das regiões Nordeste Paraense e Oeste Paraense; e além de diversas outras culturas em vários municípios.

O polo da citricultura da região nordeste paraense é responsável por cerca de 67% da produção do estado. As condições favoráveis ao desenvolvimento dessas culturas direcionam a expansão acelerada das áreas de produção (ADEPARÁ, 2017; IBGE, 2017). Porém essa produção geralmente é afetada pela redução considerável no volume de chuvas entre os meses de julho e novembro, período menos chuvoso na região. Ocasionalmente assim, crescentes demandas por pomares de limão irrigado, visto que esta técnica tem reconhecida influência no rendimento de frutos durante a entressafra, além de melhorar a qualidade dos frutos, possibilitando melhores rendimentos econômicos (BREMER NETO et al., 2013).

O polo citrícola paraense é composto por cinco municípios: Capitão Poço, Garrafão do Norte, Ourém, Irituia e Nova Esperança do Piriá, estes possuindo amplo potencial de expansão

da irrigação, considerando que dos 119.653 hectares potencialmente irrigáveis apenas 4.748 hectares estão instalados. Entretanto, problemas como baixa qualidade logística de escoamento da produção, baixa oferta de energia elétrica de qualidade e falta de investimentos que garantam a presença de infraestrutura, serviços de apoio, tecnologia e assistência técnica qualificada para gestão dos recursos hídricos fazem com que apenas uma pequena parte desse potencial irrigável seja efetivamente possível de ser instalado (ANA, 2021). Embora a irrigação possa fornecer diversas vantagens para os cultivos, projetos mal dimensionados e gerenciamento inadequados podem ocasionar prejuízos ao solo e contaminação ambiental (SILVA; ALVES; SILVA, 2016).

1.3 A importância dos citros no contexto nacional e regional

Os citros de interesse comercial compreendem a um amplo grupo de plantas do gênero *Citrus* e algumas do gênero *Fortunella* e *Poncirus*, abrangendo laranjas doces e azedas, limas, limões, limas-ácidas, tangerinas, pomelos, cidras e toranjas (MATTOS JUNIOR et al., 2005). São originários do Sul e Sudeste Asiático, expandindo-se pela Europa durante as Cruzadas, chegando mais tarde ao Brasil, trazidos pelos portugueses durante a colonização (LOPES et al., 2011).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de citros (18.584.778 toneladas), tendo como principais produtos a laranja e os limões (limas ácidas e limões verdadeiros) (FAO, 2019). Apesar das frutas cítricas estarem entre as mais consumidas in natura, a produção nacional (cerca de 19 milhões de toneladas) é destinada principalmente à exportação, o que demonstra a amplitude do mercado (KOLLER, 2013; FAO, 2017). O Brasil é o maior produtor mundial de laranja com produção estimada superior a 388 milhões de caixas (40,8 kg), estando bem à frente do segundo maior produtor, os Estados Unidos, com estimativa de produção de 71 milhões de caixas (FUNDECITROS, 2019).

Em relação às limas ácidas e aos limões, a produção brasileira é menos expressiva, detendo a 4ª maior produção mundial, com cerca de 1,5 milhões de toneladas de frutos, em uma área plantada de aproximada de 56 mil hectares (FAO, 2019). Entretanto, as demandas de mercados nacionais e internacionais, por sucos e o uso na culinária, têm provocado boas rentabilidades do produto e estimulado a expansão das áreas plantadas (MATTOS JUNIOR et al., 2005).

Os números da citricultura brasileira são expressivos tanto na produção quanto na geração de emprego e renda, somente no estado de São Paulo, o maior produtor nacional, são

gerados mais de 230 mil empregos diretos e indiretos, além de bilhões de dólares em receitas (NEVES et al., 2010). Demonstrando que estudos nesse setor têm relevância produtiva e social.

O primeiro polo citrícola brasileiro foi implantado em meados de 1920 no estado do Rio de Janeiro, chegando ao estado de São Paulo por volta de 1940, onde se expandiu fortemente. Primeiro por apresentar-se como uma alternativa ao cultivo de café, que na época passava por uma forte crise e posteriormente, pela necessidade de suprir as demandas mundiais originadas por quedas sucessivas de produção nos EUA (SOUZA, 2016), decorrentes principalmente de geadas e da grande ocorrência de furacões, favorecendo a dispersão de pragas e doenças, e contribuindo para reduzir drasticamente sua produção, oportunizando assim, a consolidação da citricultura brasileira (NEVES et al., 2010).

No entanto, em 2004 o estado de São Paulo registrou as primeiras ocorrências de uma doença conhecida como HLB ou Greening (COLETA-FILHO et al., 2004). Nela, um agente etiológico bacteriano chamado *Candidatus liberibacter* sp., associado a um dispersor extremamente eficiente e de difícil controle chamado *Diaphorina citri* são os responsáveis por dizimarem milhares de hectares de pomares cítricos produtivos na região (AYRES et al., 2018).

Ainda segundo Ayres et al. (2018), os talhões com incidência de HLB superior a 28% de plantas com sintomas devem ser totalmente eliminadas. Logo, em muitos casos, os cultivos se tornam antieconômicos, obrigando os produtores a abandonar a atividade ou migrar para novas áreas (NEVES et al., 2010).

Neste contexto, o agravamento de problemas fitossanitários nos principais polos produtivos do país tem criado oportunidades de crescimento de outros polos, nas Regiões Norte e Nordeste (BASTOS et al., 2015). A exemplo, podemos destacar o centro produtivo em ascensão localizado no município de Capitão Poço, estado do Pará. Esse Estado possui clima favorável e grandes extensões de terras, não cobertas por florestas, aptas a expansão da citricultura (ROCHA, 2017). Além disso, a região está livre da ocorrência de pragas e doenças graves como, cancro cítrico, pinta-preta, morte súbita e greening, diminuindo consideravelmente os custos de produção e melhorando a qualidade dos frutos (ADEPARÁ, 2019).

Os primeiros pomares de citros começaram a ser implantados em Capitão Poço na década de 70 e quase cinco décadas depois, grandes, médios e pequenos produtores são os responsáveis por cerca de 67% dos citros produzidos na região Norte do país em uma área de aproximadamente 16 mil hectares (IBGE, 2017). Atualmente, a região passa por um novo ciclo de expansão em suas áreas de plantio, estimulada, principalmente, pela criação do Polo da Citricultura do Nordeste Paraense, o que forneceu segurança jurídica e legitimidade a ações de

fiscalização e controle das agências de reguladoras do setor (ADEPARÁ, 2017); pelo início das operações da “CITROPAR-ZAMPA”, uma indústria de processamento de sucos com alta capacidade de processamento e absorção da produção local. Essa indústria possibilitou a abertura de novos mercados no Brasil e no exterior, pois existem demandas crescentes por sucos cítricos e por frutos de mesa (BARROS; BARROS; CYPRIANO, 2016).

A perspectiva das lideranças de agências de assistência técnica, vigilância fitossanitária (EMATER-PA e ADEPARÁ) e do presidente do Sindicato dos Produtores Rurais de Capitão Poço, concentra-se no fato de que em poucos anos as áreas plantadas com citros poderão ser triplicadas na região, e que a médio e longo prazos, poderão ultrapassar a marca de 200 mil hectares. Um crescimento dessa magnitude demanda uma série de estudos sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais associados ao desenvolvimento da cadeia produtiva citrícola da região, considerando ainda que grande parte dessas áreas demandará irrigação e utilizará grandes volumes de água.

Projetos de irrigação geralmente têm custos de instalação e operação elevados; por utilizar um recurso natural tão importante, devem considerar diversos critérios técnicos que proporcionem a eficiência máxima do sistema. Entre esses critérios estão a correta definição da evapotranspiração cultura (ETc), da capacidade de armazenamento de água no solo e sua fertilidade química, da disponibilidade hídrica da região, da escolha correta do sistema de irrigação a ser adotado e ainda de aspectos vegetais como arquitetura da planta e a densidade do plantio. Também o coeficiente de cultura (Kc) é um índice que juntamente com a evapotranspiração de referência (ETo) podem ajudar a definir a correta lâmina de água a ser aplicada via irrigação, este deve ser definido regionalmente, visto que sofre variações sazonais associadas principalmente ao saldo de radiação (Rn) local (GUERRA; GRAJALES; ROJAS, 2015).

1.4 Justificativa e interdisciplinaridade da proposta

Embora se saiba que o ciclo hidrológico terrestre seja um sistema fechado, a distribuição pluviométrica tem sofrido alterações relacionadas às mudanças climáticas globais. Estas mudanças ocorrem principalmente em resposta à elevação da concentração atmosférica dos gases do efeito estufa (GEE) oriundos da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, induzindo o que se chama efeito estufa, que se caracteriza pela elevação da temperatura média global.

Alterações no uso da terra na Amazônia têm contribuído de forma expressiva para esse cenário: as florestas e savanas na Amazônia brasileira estão sendo alteradas de forma intensa nos últimos anos para a implantação de pastos e zonas agrícolas com sérios impactos sobre a biodiversidade e liberação de grandes quantidades de gases do efeito estufa de diversas formas, a queima da vegetação libera dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), e mais gases são liberados pelo gado (CH₄) e solo da pastagem limpa (N₂O), isso evidencia o potencial de mitigação de aquecimento global através da manutenção da vegetação nessa região (FEARNSIDE et al., 2009).

A agricultura na Amazônia tem se intensificado de maneira cada vez mais acelerada, as áreas triplicaram nas últimas 3 décadas (PROJETO MAPBIOMAS, 2021), e isso se deve, entre outros fatores, à consolidação de polos de produção de grãos como os de Paragominas, Dom Eliseu, Santarém, Belterra, bem como pela expansão da dendêicultura em municípios como Tailândia, Moju, Acará, Bonito. Soma-se a isso, a criação de polos de fruticultura cítrica em ascensão, como os das regiões Nordeste Paraense e Oeste Paraense, além de diversas outras culturas em vários municípios.

Diversos esforços têm sido dispensados para a quantificação da evapotranspiração das florestas em diversas regiões da Amazônia, entretanto pouco se conhece sobre a contribuição da agricultura para este componente do ciclo hidrológico. Essas informações ganham relevância com as perdas substanciais de superfície de água em várias regiões do país e com a expansão da agricultura, correspondendo a grande parcela da demanda por água (PROJETO MAPBIOMAS, 2021; ANA, 2021).

A crescente demanda por alimentos no mundo, impulsionada por crescimento populacional e restrições ao uso da terra nas próximas décadas, abrem o debate sobre a necessidade de melhorar a produtividade das áreas agricultáveis (SAATH; FACHINELLO, 2018). O aumento da produtividade das áreas agrícolas implica em menos áreas desmatadas para este fim. Para que isso ocorra é necessário, entre outros fatores, o aprimoramento dos sistemas de irrigação e da adubação do solo.

A expansão da agricultura no nordeste paraense, em especial da citricultura, cria demandas por pesquisas no sentido de aumentar a produtividade agrícola de forma sustentável, fazendo com que as áreas sejam mais eficientes em relação ao uso de insumos e ao consumo de água.

Em relação à produção de limão tahiti, por exemplo, pouco se sabe sobre a necessidade hídrica na região, podendo levar a uma reposição inadequada de água em fases essenciais da cultura. Estudos como o de Bremer Neto et al. (2013) comprovaram que a irrigação adequada

em *Citrus latifolia* resultaram em incrementos produtivos significativos, além melhorar o rendimento e a qualidade do suco. Sabe-se que o manejo da irrigação deve considerar fatores climáticos, do solo e da planta, específicos para uma determinada região (RESENDE, 2006). E a inobservância destes fatores, geralmente resulta em reposição inadequada e desperdício de água, ocasionando graves prejuízos econômicos, ambientais e sociais (FERREIRA; RODRIGUES; GOMES FILHO, 2010).

Desta maneira, faltam informações consistentes sobre as interações solo-planta-atmosfera em pomares de citros, no município de Capitão Poço, PA, tornando a demanda hídrica dos cultivos incerta, podendo ocasionar desperdícios de água durante a irrigação, perda de produtividade da cultura, aumento do risco de poluição ambiental associados à lixiviação de contaminantes e consequentes aumentos da pegada hídrica da atividade.

Assim, esse trabalho concentra esforços na definição da evapotranspiração (ET_c) em pomares de limão tahiti irrigado em um polo citrícola em expansão e na produção do coeficiente de cultura (K_c), como ferramenta acessória ao uso racional da água na irrigação. Também utiliza a ET_c e dados produtivos para calcular as pegadas hídricas verde, azul e cinza em condições de produção na Amazônia.

Espera-se que os resultados obtidos neste estudo contribuam para que a cadeia produtiva regional possa se desenvolver sobre bases econômicas, sociais e ambientais sustentáveis. E dessa forma, produza informações relevantes para: o aumento da produtividade agrícola; o uso eficiente da água na irrigação; redução da poluição ambiental associada à lixiviação de fertilizantes e defensivos; e em última análise, para melhorar a renda do produtor regional.

1.5 Hipóteses

H1: O manejo da irrigação utilizado (lâmina fixa) na área do estudo ocasiona desperdício de água;

H2: A produção de limão tahiti na Amazônia Oriental pode ser considerada mais sustentável em relação ao uso de água em comparação a centros de produção onde a disponibilidade hídrica é menor.

Essas hipóteses se baseiam em estudos prévios, mostrando que o balanço de energia das culturas deve ser realizado para regiões e geometrias de plantio específicas, sendo determinantes para a compreensão de interações planta-ambiente (SIMON; ANGELOCCI, 2014) e que a quantificação da evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficientes de cultivo (K_c) definidos localmente são um ponto de partida para a gestão sustentável da água (MARRAS

et al., 2016). E que as variações de temperatura, precipitação e luz ocasionadas por mudanças climáticas são utilizadas para classificar regiões em baixo, médio e alto risco para o cultivo de citros (HAILAI et al., 2010), destacando a importância de se compreender as relações regionais entre as mudanças climáticas e a produção de culturas como uma ferramenta estratégica para a definição das futuras adaptações agrícolas de Zhao et al. (2017).

Quanto à pegada hídrica, consideramos que o fator produtividade foi o mais relevante entre fatores climáticos e não climáticos sobre a pegada hídrica de citros, materializando-se como uma importante ferramenta para gerentes e formuladores de políticas na área agrícola, buscando otimizar o consumo de água e o cultivo de citros em escalas regionais (BAZRAFSHANA et al., 2019).

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo Geral

Investigar como interações solo-planta-atmosfera modificam o balanço de energia e a demanda evapotranspiratória em plantios de limão tahiti, e como interferem na sustentabilidade hídrica da cultura na Amazônia oriental.

1.6.2 Objetivos específicos

- I. Avaliar a sazonalidade do balanço de energia e da demanda hídrica do limão tahiti e definir parâmetros que contribuam para o uso eficiente da água de irrigação na Amazônia Oriental;
- II. Calcular o tamanho das pegadas hídricas verde, azul e cinza da produção de citros na região.

1.6 Estrutura da tese

Esta tese está dividida em 4 capítulos, o primeiro capítulo, faz uma contextualização que embasa a formulação dos problemas da pesquisa, objetivos e hipóteses a partir de lacunas do conhecimento sobre a realidade produtiva amazônica, considerando ainda o contexto hídrico nacional e regional e as constantes pressões exploratórias frente ao desenvolvimento acelerado da agricultura.

O segundo e o terceiro capítulo foram redigidos na forma de artigos científicos. O segundo capítulo trata da definição da sazonalidade do balanço de energia e da evapotranspiração em pomares de limão tahiti no nordeste paraense, bem como da produção de coeficientes de cultivo e parâmetros de solo que auxiliem no correto manejo da água na irrigação a partir de interações solo-planta-atmosfera.

No terceiro capítulo, aborda-se a quantificação do volume de água verde, azul e cinza utilizados durante a produção do limão tahiti nas condições amazônicas de produção e nas principais regiões produtoras do país. Seu objetivo é avaliar a sustentabilidade dos cultivos. O quarto capítulo corresponde a uma seção integradora, abordando os impactos e implicações da pesquisa, bem como suas implicações futuras e considerações finais.

CAPÍTULO 2 BALANÇO DE ENERGIA E DEMANDA HÍDRICA DO LIMÃO TAHITI *Citrus latifolia* (Yu. Tanaka) NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Resumo

A dinâmica energética e hídrica são cruciais para o desenvolvimento da citricultura na Amazonia Oriental. O objetivo deste trabalho foi determinar o balanço de energia, a demanda hídrica e o coeficiente de cultura do limão tahiti, na região nordeste paraense. Para tal, uma torre micrometeorológica foi instalada estrategicamente em uma área experimental para o monitoramento de variáveis meteorológicas entre outubro de 2020 a dezembro de 2021. O balanço de energia e a demanda hídrica foram obtidos pelo método de razão de Bowen, já o k_c foi determinado pela razão entre evapotranspiração da cultura e a de referência. Verificou-se que 63% da energia disponível foi utilizada pelo calor latente no período mais chuvoso, enquanto 60% foram utilizados durante o período menos chuvoso. O calor sensível utilizou 32% e 34% durante o período mais e menos chuvoso, respectivamente. Já o calor no solo apresentou pouca variação com média de 5% para todo período. O consumo hídrico do limão durante o experimento foi de 1599 mm, com média diária de 3,70 mm dia⁻¹, enquanto o valor médio do K_c foi de 1,4. Estes resultados permitem projetar de forma adequada protocolos de suprimento hídrico para cultura no principal polo citrícola da região amazônica.

Palavras-chave: razão de Bowen, evapotranspiração da cultura, coeficiente da cultura, sazonalidade

Abstract

Energy and water dynamics are crucial for the citrus development in the Eastern Amazon. This study aimed to determine the energy balance, water demand and crop coefficient of limon tahiti in the northeast region of Pará. Thus, a micrometeorological tower was installed in the center of the experimental area to monitor meteorological variables between October 2020 and December 2021. The energy balance and water demand were obtained by the Bowen ratio method. On the other hand, k_c was determined by the ratio between crop and reference evapotranspiration. The results obtained indicate that 63% of the available energy was used by latent heat in the rainiest period, while 60% was used during the less rainy period. Sensible heat used 32% and 34% during the most and least rainy period, respectively. Soil heat presented a

low variation, with an average of 5% for the entire period. The water consumption of the acid lime during the experiment was 1,599 mm, with a daily mean of 3.70 mm day⁻¹, while the mean value of Kc was 1.4. These results allow the design of adequate water supply protocols for the crop in the main citrus pole in the Amazon region.

Keywords: Bowen ratio, crop evapotranspiration, crop coefficient, seasonality

2.1 Introdução

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de citros; grande parte da produção está voltada para a indústria de sucos destinados à exportação, todavia os frutos cítricos estão entre os mais demandados para o consumo *in natura*, logo, existe um grande mercado a ser explorado dentro e fora do país (KOLLER, 2013; FAO, 2017).

As principais áreas de produção de citros nacionais estão concentradas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Entretanto, a elevação dos custos de produção nessas áreas, aliados à manutenção da alta produtividade para atender o mercado nacional e internacional, têm proporcionado o surgimento de novos polos citrícolas (NEVES et al., 2010). Um deles é o do Nordeste Paraense, que estimulado por políticas públicas, pela abertura de indústrias de processamento de sucos, baixa incidência de pragas e doenças graves e pela abertura de novos mercados, vêm ampliando, substancialmente as áreas de cultivos (BARROS; BARROS; CYPRIANO, 2016; IBGE, 2017; ADEPARA, 2019).

A citricultura paraense está situada, na faixa equatorial do globo terrestre e diferente das demais regiões produtoras no Brasil, está sujeita a condições específicas de produção em ambientes amazônicos. Desta maneira, as interações solo-planta-atmosfera locais apresentam variáveis respostas desconhecidas para a cultura dos citros em termos de balanço de energia e atendimento da demanda hídrica.

Para a obtenção da produtividade potencial em cultivos de limão tahiti deve-se levar em consideração o suprimento hídrico para atendimento da demanda atmosférica local, o manejo nutricional, o tipo do material genético e a densidade das plantas (PORTELA et al., 2016). Soma-se a isso, a oferta de energia da região e a arquitetura da planta, pois a radiação solar absorvida pelas plantas está diretamente relacionada com a eficiência desta em interceptar a luz solar, tornando a densidade de folhas do dossel determinante (PILAU; ANGELOCCI, 2015). A quantidade de interceptação de radiação solar pelas folhas pode resultar ainda, no aumento

da temperatura foliar, ocasionando por vezes fotoinibição (VALLADARES; PEARCY, 1997), o que pode comprometer a produtividade da cultura.

Controles vegetais em resposta às condições ambientais específicas foram constatadas por Coelho Filho et al. (2005), que observaram a falta de correspondência entre o fluxo de seiva e a transpiração do limão em Piracicaba (SP). Segundo esses autores a transpiração no período da manhã acompanha o saldo de radiação disponível (R_n), utilizando parcialmente a água armazenada nos tecidos; enquanto no final do dia e à noite, quando transpiração diminui, o fluxo da seiva continua a ocorrer a uma taxa que tende a substituir a perda de água dos tecidos durante o dia.

Simon e Angelocci (2014) destacaram que os estudos de balanço energético, por vezes, impõem dificuldades experimentais. Por isso, esses autores propuseram o uso de equações físico-matemáticas capazes de correlacionar o balanço de radiação da copa das árvores (R_{nc}) ao saldo de radiação de gramado (R_{ng}) e a radiação solar global (R_g), pois essas variáveis são mais facilmente monitoráveis e disponíveis.

As especificidades regionais do balanço de energia são inerentes à geografia terrestre, logo, ao estudá-la, não é possível realizar grandes generalizações, visto que solo, planta e atmosfera interagem constantemente (FISHER et al., 2008). Neste contexto, Angelocci et al. (2004) observaram que em latitudes mais elevadas, os altos valores de saldo de radiação (R_n) estavam correlacionados à radiação de onda curta em horários próximos ao meio-dia em plantios de limão tahiti e que a radiação entre as diferentes posições ao redor do dossel durante o dia era determinante para a interceptação luminosa.

A dinâmica energética no interior do dossel das plantas precisa ser melhor investigada, pois sua variação depende da cultura e da região, podendo ser afetada por diversos fatores ambientais e intrínsecos da planta (GRAAMANS et al., 2017). Essa dinâmica energética vem sendo amplamente estudada por meio do método do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB), principalmente por apresentar praticidade e confiabilidade em seus resultados, possibilitando inclusive a determinação da E_{Tc} (PEREZ et al., 1999; WIJEWARDANA et al., 2019; SOUSA et al., 2021).

Quando se compara o BERB com o método da covariância de vórtices turbulentos verifica-se que os resultados de ambos apresentam valores muito próximos como já verificado nos estudos de Billesbach e Arkebauer (2012) e Gavilán e Berengena (2007), que concluíram assim, o BERB apesar de ser um método bem menos oneroso e simples, por exigir poucos parâmetros de entrada, demonstra elevado grau de acurácia e robustez na determinação da dinâmica energética em diversos cultivos.

Entender a dinâmica energética é fundamental para que se possa conhecer a demanda hídrica vegetal, as quais variam sazonal e fenologicamente (SOUSA et al., 2021). Por isso, é importantíssimo determinar a correta lâmina de água a ser aplicada nas diferentes fases da planta, podendo assegurar a floração, o pegamento e o crescimento dos frutos, bem como a sua qualidade; além disso pode-se reduzir a concentração de sólidos solúveis totais, aumentando tanto a acidez total como as concentrações de açúcares do suco de plantas cítricas (PEREIRA; VILLA NOVA; ALFARO, 2009). O conhecimento sobre a demanda de água da cultura também pode reduzir o seu desperdício durante sua reposição por meio da irrigação, logo, a sua determinação é uma ferramenta indispensável para uma produção sustentável (PEDDINTI; KAMBHAMMETTU, 2019).

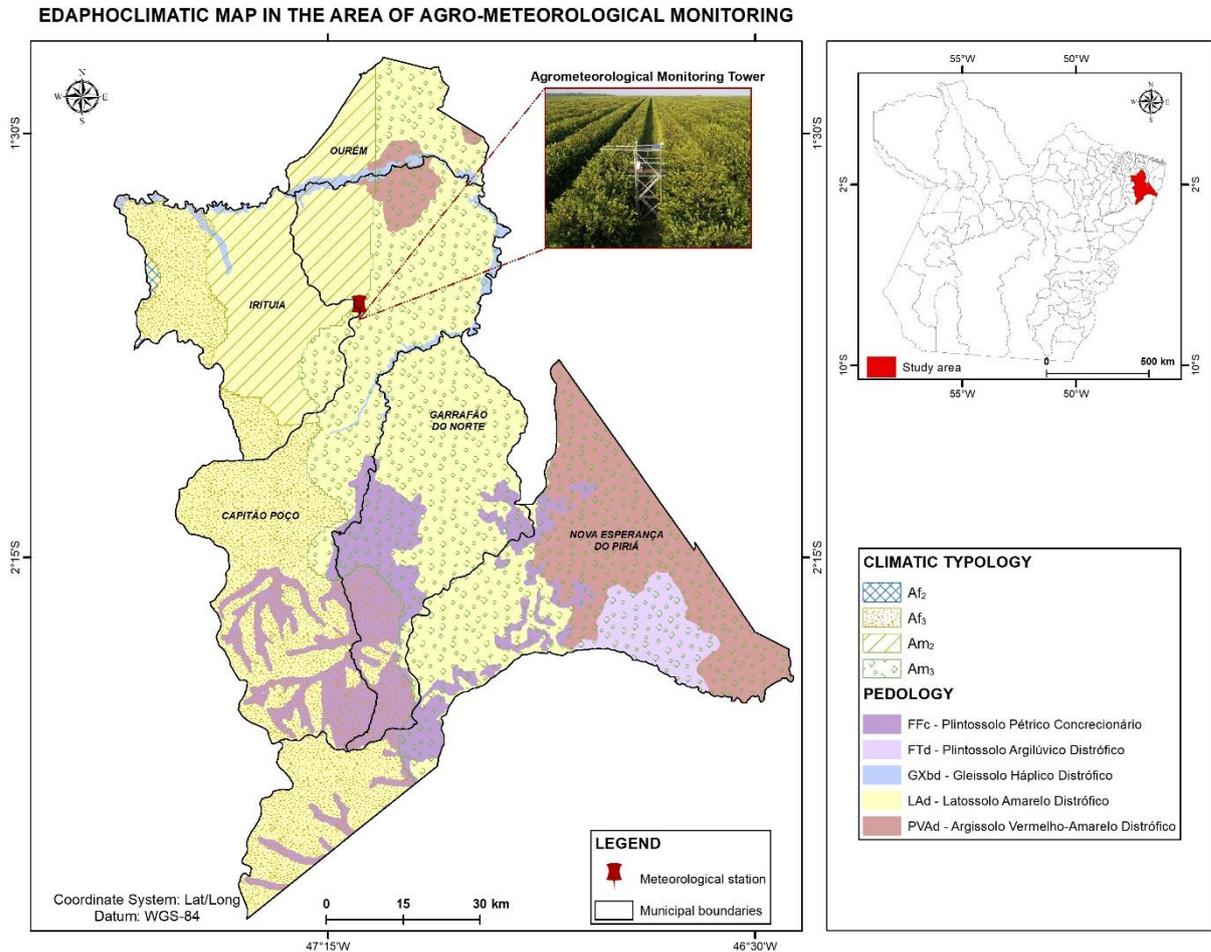
Portanto, o objetivo deste estudo é determinar o balanço de energia, a demanda de água e o coeficiente de cultura em cultivos de limão, na região nordeste paraense.

2.2 Materiais métodos

2.2.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido de outubro de 2020 a dezembro de 2021, em um plantio comercial de limão tahiti (*Citrus latifolia*), cultivar Tanaka enxertada sobre citromelo (*Poncirus trifolia*, L.) localizado no município de Capitão Poço – PA (1°48'20,4" sul e 47°11'53" oeste, 68 m de altitude) (Figura 2). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 1999) com textura média. O clima local é caracterizado como tropical (Am) com estação seca moderada e média anual de precipitação de 2500-3000 mm (SOUSA et al., 2021). A área experimental possui 12,5 ha, com plantas espaçadas de 2 x 6,8 m, com 10 anos de idade.

Figura 2 - Localização da estação agrometeorológica da área experimental no município de Capitão Poço, região nordeste Paraense.

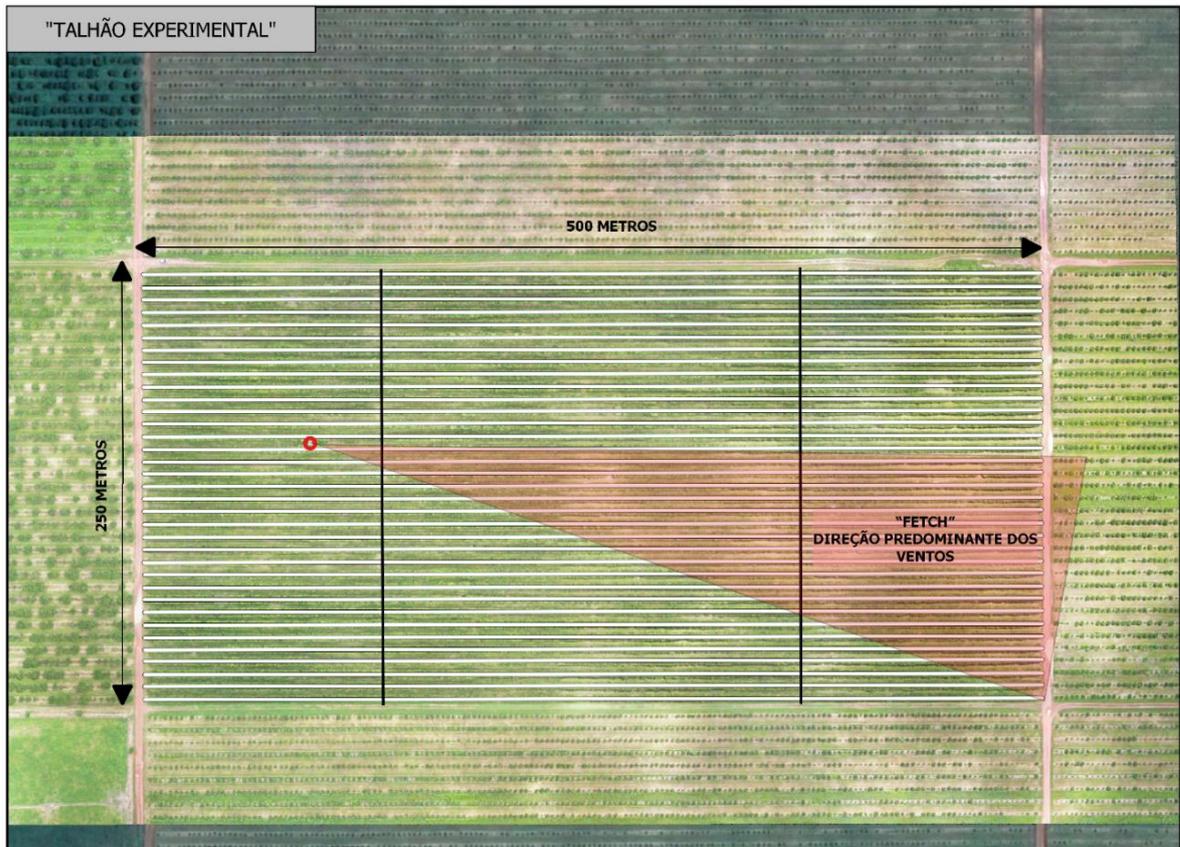


Fonte: Do autor.

Na área de estudo um sistema de irrigação por gotejamento garante a reposição de água no solo em períodos de déficits hídricos. Os emissores autocompensantes mantêm a vazão de 4,5 L h⁻¹ cada, sendo quatro emissores por planta distribuídos de forma equidistante entre si e localizados a 0,5 m do tronco das plantas.

Quando necessária as irrigações são realizadas aplicando-se uma lâmina líquida de 5 mm com turno de rega diário.

Figura 3 - Croqui do talhão experimental em um plantio comercial de limão (*Citrus latifolia*), destacando dimensões do talhão (setas pretas), sistema de irrigação (linhas brancas), “fetch” (rachura vermelha) e localização da torre experimental (círculo vermelho).



Fonte: Do autor.

2.2.2 Determinação do índice de área foliar (IAF) e do percentual de cobertura do solo (PCS)

Para a obtenção do IAF utilizou-se o método dos discos foliares proposto por Benincasa (1988); as folhas foram perfuradas com o auxílio de um vazador com área de 2,84 cm², sendo destacados discos foliares com limbo foliar, incluindo as nervuras. Os discos foliares de área conhecida de cada folha e o restante das folhas foram acondicionados em sacos de papel separadamente, em seguida levados para estufa com circulação de ar a 65°C até atingir peso constante para a obtenção da matéria seca (g). Foram selecionadas aleatoriamente 3 plantas para a coleta das folhas e dos discos foliares.

Utilizou-se o método dos discos foliares proposto por Benincasa (1988), onde as folhas foram perfuradas com o auxílio de um vazador com área de 2,84 cm², sendo destacados discos foliares com limbo foliar, incluindo as nervuras (Figura 4 -A). Os discos foliares de área conhecida de cada folha e o restante das folhas foram acondicionados em sacos de papel separadamente, em seguida levados para estufa com circulação de ar a 65°C (Figura 4-B) até atingir peso constante para a obtenção da matéria seca (g) (Figura 4-C).

Figura 4 - Procedimentos para determinação do índice de área foliar pelo método dos discos. Destacando a retirada das folhas na planta de limão (A), discos foliares frescos de área conhecida (B), material vegetal em estufa de secagem (C) e discos foliares após a secagem (D).



Fonte: Do autor.

Posteriormente, os discos secos e o resto das folhas foram pesados em uma balança eletrônica de precisão com quatro casas decimais. A área foliar (AF) foi determinada por meio da correlação entre o peso seco das folhas (g), peso médio dos discos foliares (g) e área foliar (cm²) dos discos, calculada através da (Eq. 1).

$$AF = \left(\frac{MSf \times ATd}{MSd} \right) \quad (1)$$

Em que MSd: massa seca dos discos (g); ATd: área total dos discos (cm²); e MSf: massa seca das folhas (g).

Por ocasião da área experimental ter elevado adensamento de plantio não foi possível retirar todas as folhas de uma única planta (Figura 4-D), pois folhas e galhos de plantas vizinhas se entrelaçavam, por isso amostrou-se um determinado volume de copa correspondente a 25%,

utilizado para estimar o volume total de copa na área inteira. O IAF foi calculado relacionando-se a área foliar total com a área total do talhão experimental.

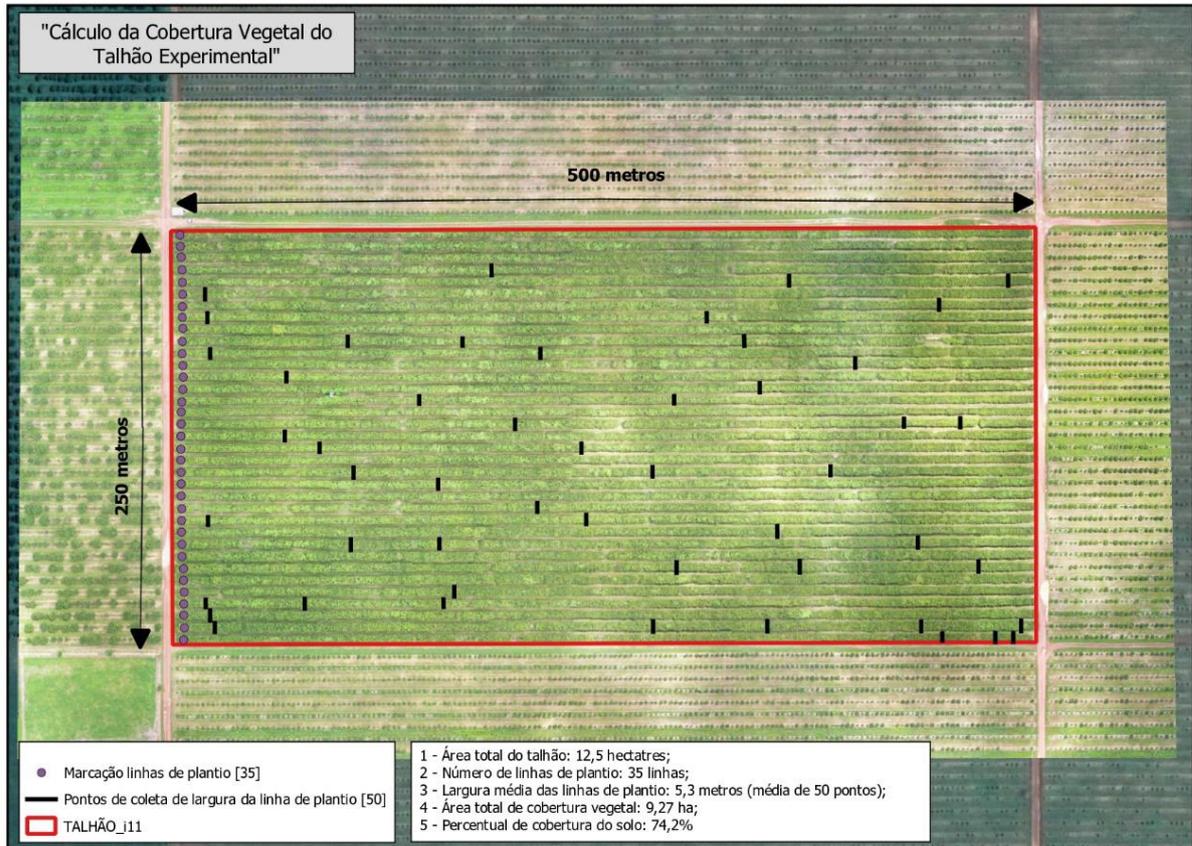
O percentual total de cobertura do solo ocupado pela cultura foi obtido em 50 pontos aleatórios dentro da área experimental (Figura 5), conforme a metodologia proposta por Bordignon et al. (2003), através da média entre o percentual de cobertura da copa na linha e na entre linha, calculado a partir das equações 2 e 3, respectivamente:

$$PCCL = \left(\frac{DL}{EP} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$PCCE = \left(\frac{DE}{EL} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que PCCL: Percentual de cobertura da copa na linha de plantio (%); PCCE: Percentual de cobertura da copa na entrelinha de plantio (%); DL: Diâmetro da copa na direção da linha de plantio (m); DE: Diâmetro da copa na direção da entrelinha de plantio (m); EP: Espaçamento entre as plantas (m); e EL: Espaçamento entrelinhas (m).

Figura 5 – Distribuição dos 50 pontos utilizados no cálculo do percentual de cobertura do solo pela cultura do limão Tahiti na área experimental.

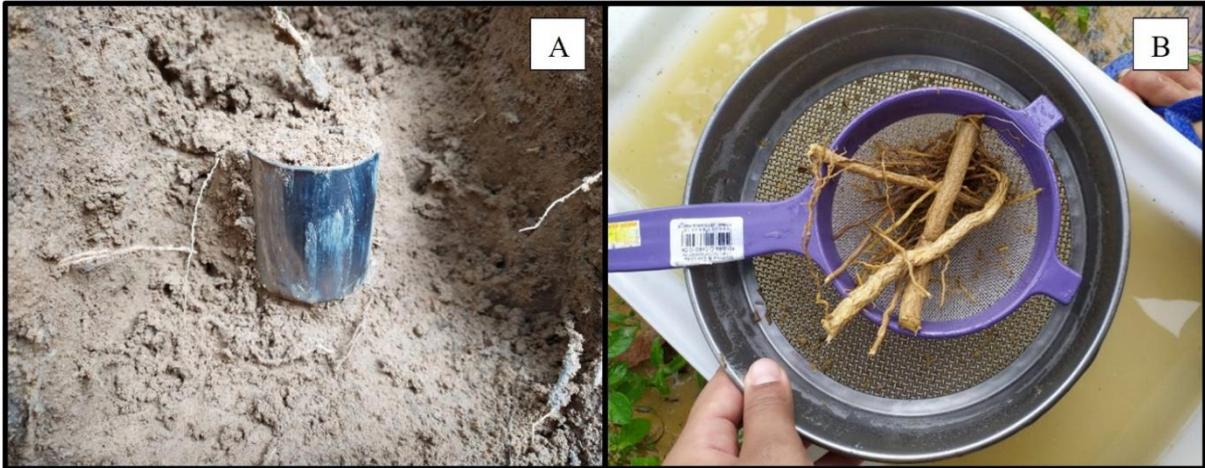


Fonte: Do autor.

2.2.3 Determinação da profundidade efetiva do sistema radicular

Foi realizada a abertura de quatro trincheiras na área experimental em pontos aleatórios, posteriormente foram retiradas amostras de raízes a cada 10 cm (quatro repetições de cada profundidade) nas profundidades de 0 a 110 cm (Figura 6). Posteriormente as amostras foram peneiradas para separação de raízes grossas e finas. Em seguida realizou-se a secagem do material para determinação da quantidade de raízes a cada extrato de profundidade, a fim de determinar a profundidade efetiva de raízes.

Figura 6 - Procedimentos para determinação da profundidade efetiva do sistema radicular evidenciando o cilindro coletor (A) e as peneira de separação de raízes grossas e finas (B).



Fonte: Do autor.

2.2.4 Conteúdo volumétrico de água no solo

O conteúdo volumétrico de água no solo foi determinado em função do potencial matricial, obtido com o uso de tensiômetros, instalados abaixo da copa a uma distância de 1m do tronco e a 0,3m de profundidade. Foram obtidas amostras de solo indeformadas a cada 0,1m até a profundidade de raiz efetiva da cultura conforme demonstrado na tabela 1.

Tabela 1- Coeficientes da equação de van Genuchten ajustados até a profundidade de raiz efetiva do Limão Tahiti em Capitão poço.

Profundidade	$\theta_r = \theta_{pm}$ ($m^3 m^{-3}$)	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	α	n	m	θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)	Densidade aparente (g cm^{-3})
0,0 m - 0,1 m	0,103	0,380	0,116	5,673	0,824	0,247	1,634
0,1 m - 0,2 m	0,130	0,367	0,125	6,784	0,853	0,245	1,663
0,2 m - 0,3 m	0,148	0,373	0,128	6,142	0,837	0,272	1,696

As amostras indeformadas foram submetidas a tensões de 1, 2, 4, 6, 10, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa e posteriormente, foram pesadas para determinação da umidade remanescente com o auxílio de uma balança de alta precisão. Os dados obtidos foram ajustados à equação de van Genuchten (1980), por meio da equação 4, onde os coeficientes da equação estão presentes na tabela 1.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (4)$$

Em que h : potencial matricial do solo; α , n e m : coeficientes da equação; θ : umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{cc} : umidade do solo na capacidade de campo; θ_{pm} : umidade do solo no ponto de murcha; θ_r e θ_s : umidade volumétrica residual e saturada do solo, respectivamente.

2.2.5 Medições das variáveis meteorológicas

Na área experimental (Figura 3), instalou-se uma torre metálica de 5,6 metros de altura; nela acoplou-se uma estação meteorológica automática com um datalogger CR1000 (Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA). Na Tabela 2 estão listados os sensores instalados na estação meteorológica automática utilizadas no experimento, bem como sua disposição em relação ao solo ou ao dossel.

Tabela 2 - Variáveis e instrumentos utilizados no experimento, assim como, a disposição dos sensores em relação ao solo e o dossel vegetal.

Variáveis meteorológicas	Instrumento, fabricante, modelo	Nível dos sensores (m)
Saldo de radiação	Saldo radiômetro (CRN4, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Velocidade do vento	Anemômetro (05106, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Chuva	Pluviômetro (TB4, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,5 acima do dossel
Temperatura do ar	Termohigrômetro (MX2301A, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Umidade relativa do ar	Termohigrômetro (MX2301A, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Fluxo de calor no solo	Placa de fluxo de calor (HFP01SC, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,08 de profundidade

Fonte: Do autor.

Os sensores utilizados no experimento foram programados para fazerem leituras a cada dez segundos, e médias totais a cada 20 minutos. A localização da torre obedeceu às exigências mínimas de bordadura da área, apresentando “*fetch*” disponível (superior a razão 1:100) para que as medidas obtidas fossem representativas da área experimental sem a influência de energia advectiva (RANA; KATERJI, 2000).

2.2.6 Balanço de energia pelo método da razão de Bowen

Os valores do fluxo de calor latente foram determinados pela lei de conservação de energia para superfície vegetada, utilizando a seguinte expressão com base na razão de Bowen:

$$Rn = LE + H + G + Sdv + F \quad (5)$$

Em que Rn : saldo de radiação; LE e H : são os fluxos verticais de calor latente e sensível, respectivamente; G : fluxo de calor no solo; Sdv : energia armazenada no sistema solo dossel vegetativo; F : energia utilizada no processo fotossintético.

O componente G foi estimado a partir de duas placas de fluxo de calor no solo instaladas horizontalmente a 0,08 m de profundidade em ambos os lados da linha de plantio (uma abaixo da linha de plantio e a outra entre as linhas de plantio), de onde se obteve a energia média transportada para o solo. Os componentes Sdv e F não foram considerados neste estudo, por representarem menos de 2% do saldo de radiação (HEILMAN et al., 1994).

A razão proposta por Bowen (1926), entre as densidades dos fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE) é amplamente difundida no estudo do particionamento da energia disponível, isto é:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (6)$$

O fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente podem ser obtidos dentro da camada limite superficial em função dos gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor, em dois níveis (0,5 e 2,0 metros acima do dossel), através das seguintes equações:

$$H = -k_h \rho_a c_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

e

$$LE = -k_v \rho_a \lambda \frac{\partial q}{\partial z} \quad (8)$$

Em que k_h e k_v : são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água, respectivamente ($m^2 s^{-1}$); ρ_a : é a densidade do ar ($kg m^{-3}$); C_p : é o calor específico do ar à pressão constante ($MJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$); λ : é o calor latente de evaporação da água ($MJ kg^{-1}$); T é a temperatura do ar ($^\circ K$); q : é a umidade específica do ar ($kg kg^{-1}$).

Reunindo a equação 6 juntamente com a equação 7 e a equação 8, tem-se que:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{P_o c_p k_h}{\lambda \varepsilon k_v} \frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z} \quad (9)$$

Assumindo a igualdade entre os coeficientes K_h e K_v nos processos de difusivos de calor sensível e vapor d'água (GAVILAN; BERENGENA, 2007) e, considerando que $(\partial T / \partial z) / (\partial e / \partial z) \cong \Delta T / \Delta e$, a equação 9 pode ser simplificada para:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (10)$$

Em que γ : é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); $\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$ diferenças de temperatura do ar acima do dossel; $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$ diferenças de pressão de vapor d'água na camada de ar acima do dossel.

Com base na razão de Bowen, obteve-se o fluxo de calor latente segundo a expressão 11:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (11)$$

2.2.7 Critérios de rejeição de dados inconsistentes do método de razão de Bowen

Para rejeitar valores inconsistentes, adotou-se os critérios descritos por Perez et al. (1999), onde os dados fornecidos pelo método da razão de Bowen são consistentes quando atenderam aos critérios da Tabela 3. A análise e a exclusão de valores de β inconsistentes, foram realizadas de acordo com as condições da Tabela 4.

Tabela 3 - Condições adequadas para que os dados gerados pelo método da razão de Bowen sejam, são considerados consistentes, sob condições não advectivas.

Energia disponível	Gradiente de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor
Rn - G > 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H ≤ 0 para $-1 < \beta \leq 0$ ou H > 0 para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H > 0
Rn - G < 0	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	LE > 0 e H < 0
	$\Delta e < 0$	$\beta > -1$	LE < 0 e H ≥ 0 para $-1 < \beta \leq 0$ ou H < 0 para $\beta > 0$

Fonte: Perez et al. (1999).

Os dados de LE e H gerados pelo método da razão de Bowen devem apresentar consistência na relação fluxo-gradiente entre os componentes, onde valores de β próximos de -1 podem ser rejeitados em função da precisão considerada para os sensores; nesta pesquisa foi de 0,2 °C para a temperatura do ar e de 2% para a umidade relativa do ar. Esses valores foram utilizados para obtenção do erro – ε (equação 12), com o intuito de se determinar o intervalo próximo de -1 a ser excluído.

$$\varepsilon = \frac{(\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T)}{\Delta e} \quad (12)$$

Tabela 4 - Tipos de erros (equação 9) em que o método da razão de Bowen é considerado inconsistente.

Tipo de erro	Condição
A	Rn - G > 0, $\Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \varepsilon $
B	Rn - G > 0, $\Delta e < 0$ e $\beta > -1 - \varepsilon $
C	Rn - G < 0, $\Delta e > 0$ e $\beta < -1 - \varepsilon $
D	Rn - G < 0, $\Delta e < 0$ e $\beta > -1 - \varepsilon $
E	Mudança rápida de temperatura e pressão de vapor

Fonte: Perez et al. (1999).

Posterior ao controle de qualidade e exclusão dos dados inconsistentes, realizou-se o preenchimento de falhas dos dados de fluxos de energia, correlacionando (H + LE) e (Rn - G) para cada mês de avaliação (TEIXEIRA; BASTIAANSSEN, 2012), utilizando os dados dos coeficientes de correlação obtidos mensalmente conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficiente da análise de regressão da correlação entre H + LE (coordenada Y) e Rn - G (coordenada X), ambos em W m⁻², durante os meses de outubro de 2020 e dezembro de 2021 em Capitão Poço - PA.

Meses	Coeficientes lineares		
	A	B	R ²
Janeiro	0,9689	3,0041	0,997
Fevereiro	0,9762	-1,4033	0,999
Março	0,9667	0,5605	0,998
Abril	0,9661	2,3443	0,999
Mai	0,9627	4,1186	0,998
Junho	0,9707	4,4476	0,999
Julho	0,9708	5,1420	0,999
Agosto	0,9711	5,3684	0,999
Setembro	0,9718	5,3904	0,999
Outubro	0,9745	6,0228	0,999
Novembro	0,9686	6,7263	0,999
Dezembro	0,9714	5,4151	0,999

Fonte: Do autor.

2.2.8 Estimativa do fator de desacoplamento, da evapotranspiração e do coeficiente da cultura

A evapotranspiração dos citros (ET_c) foi obtida por meio do método da razão de Bowen, utilizando os valores diurnos e positivos do fluxo de calor latente (LE). Neste caso, valores de LE obtidos entre as 6:00 e as 18:00 h, foram utilizados neste estudo enquanto houvesse energia disponível (Rn-G >0) (PEREZ et al., 1999). Os valores de ET_c foram estimados da seguinte forma:

$$ET_c = \sum_{i=1}^{n=36} \frac{LE_i}{\lambda} \quad (13)$$

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi obtida de acordo com a equação 14, pelo método micrometeorológico de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998), onde os dados climáticos utilizados na estimativa foram obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada a aproximadamente à 7 km da área experimental.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{ar} + 273} \right) u_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (14)$$

Em que ET_0 : é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); R_n : é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G : é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T_{ar} : é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 : é a velocidade do vento (m s^{-1}); e_s : é a pressão de saturação do vapor (kPa); e_a : é a pressão de vapor de ar (kPa); Δ : é a declividade da curva de pressão de vapor vs temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ : é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Posteriormente à determinação da evapotranspiração da cultura e da evapotranspiração de referência, obteve-se o coeficiente da cultura simples (K_c), por meio da razão entre a ET_c e a ET_0 , conforme equação 15:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (15)$$

O fator de desacoplamento - Ω foi obtido por meio da equação 16 (MCNAUGHTON ; JARVIS, 1983), baseado na equação de Penman-Monteith, onde valores variam entre 0 e 1. Valores de Ω mais próximos de 0 indicam que as variáveis de u_2 , UR e DPV estão controlando a transferência de vapor d'água para a atmosfera, denominando nesse caso a superfície vegetada como acoplada com a atmosfera, enquanto valores mais próximos de 1 designam que a maior contribuição no processo de evapotranspiração está ligada a energia na forma de radiação solar, caracterizando a superfície como desacoplada com a atmosfera.

$$\Omega = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{\gamma}{\Delta \times \gamma} \right) \times \left(\frac{g_a}{g_s} \right) \right]} \quad (16)$$

Em que g_a e g_s : são as condutâncias aerodinâmicas e da superfície (s m^{-1}), respectivamente.

Para determinação da g_a levou-se em consideração fatores microclimáticos, considerando a equação 17:

$$g_a = \frac{0.4^2 u(z)}{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} + \phi_m \right) \right]^2} \quad (17)$$

Em que u : é a velocidade do vento (s m^{-1}) na altura de medição z (m); d : o deslocamento do plano zero (m); z_0 : a rugosidade da superfície (m) e Φ_m : corresponde ao fator de correção do perfil do vento, conforme Fraga et al. (2015).

Para determinação da g_s , levou-se em consideração a equação invertida de Penman-Monteith (equação 18), conforme a metodologia descrita por Fraga et al. (2015).

$$g_s = (r_s)^{-1} = \left[\frac{\rho_a c_p DPV}{\gamma LE} - \frac{1}{g_a} \left(1 - \frac{\Delta H}{\gamma LE} \right)^{-1} \right] \quad (18)$$

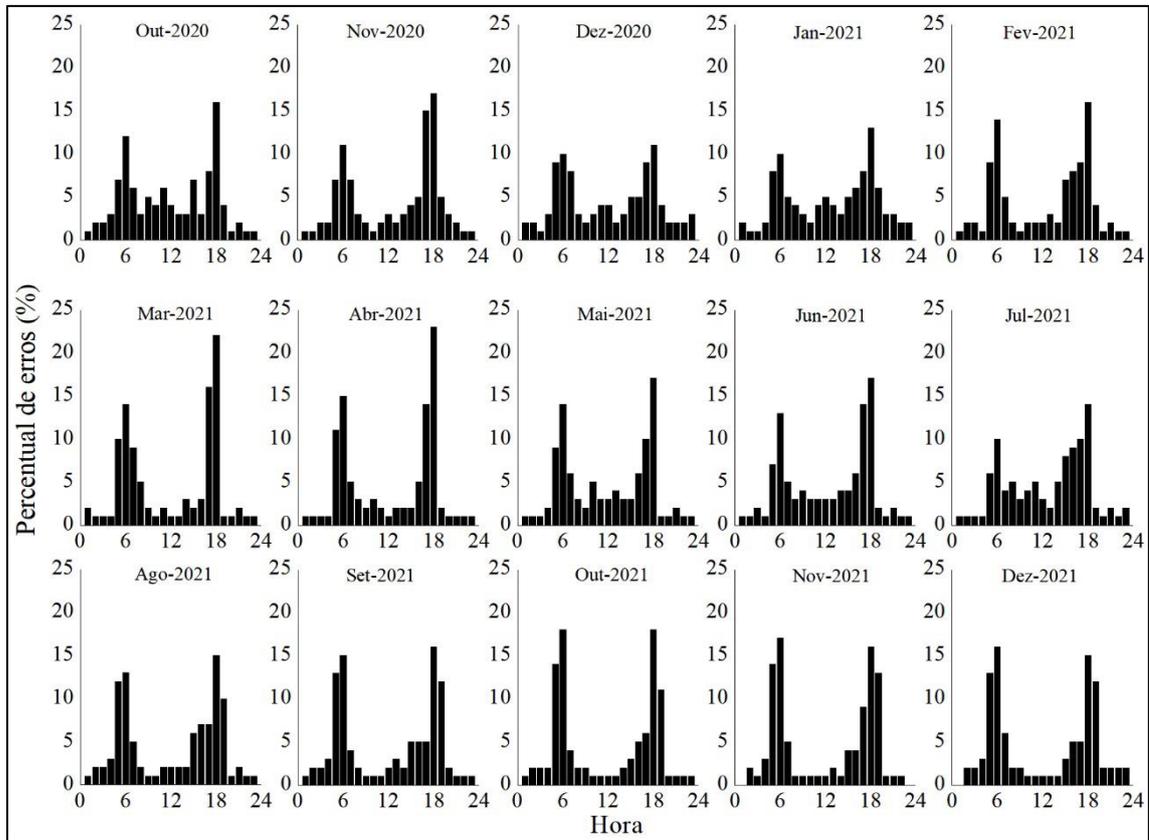
Em que g_s : é a resistência da superfície ($s\ m^{-1}$); ρ_a : é a densidade do ar ($kg\ m^{-3}$); c_p : é o calor específico do ar úmido ($1013\ J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) e H e LE: os valores obtidos pelo método da razão de Bowen.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Controle de qualidade dos dados obtidos pelo método da razão de Bowen

Os resultados da análise do controle de qualidade dos dados horários utilizados no balanço de energia pelo método da razão de Bowen são apresentados na Figura 7. Observa-se que 67,58% dos dados coletados durante o experimento apresentaram-se consistentes conforme a metodologia descrita por Perez et al. (1999).

Figura 7 - Porcentagem de erros horários do método de razão de Bowen em diferentes meses do ano em Capitão Poço – PA.



Fonte: Do autor.

Ao longo do experimento verificou-se que em todos os horários e meses foram observadas inconsistências nos dados gerados pelo método de razão de Bowen, em função da baixa variabilidade nos gradientes de temperatura e umidade do ar, com predominância no início da manhã entre 05h00min e 07h00min e no final da tarde entre 16h00min e 18h00min (figura 7).

Durante o período mais chuvoso observou-se uma maior homogeneização dos dados inconsistentes, principalmente durante os meses de fevereiro, março e abril quando se verifica aumento de erros entre os horários das 11h00min e 15h00min, em função da maior incidência de chuvas nesses horários que ocasionam redução nos gradientes de temperatura e umidade que não são favoráveis para aplicação da metodologia de razão de Bowen.

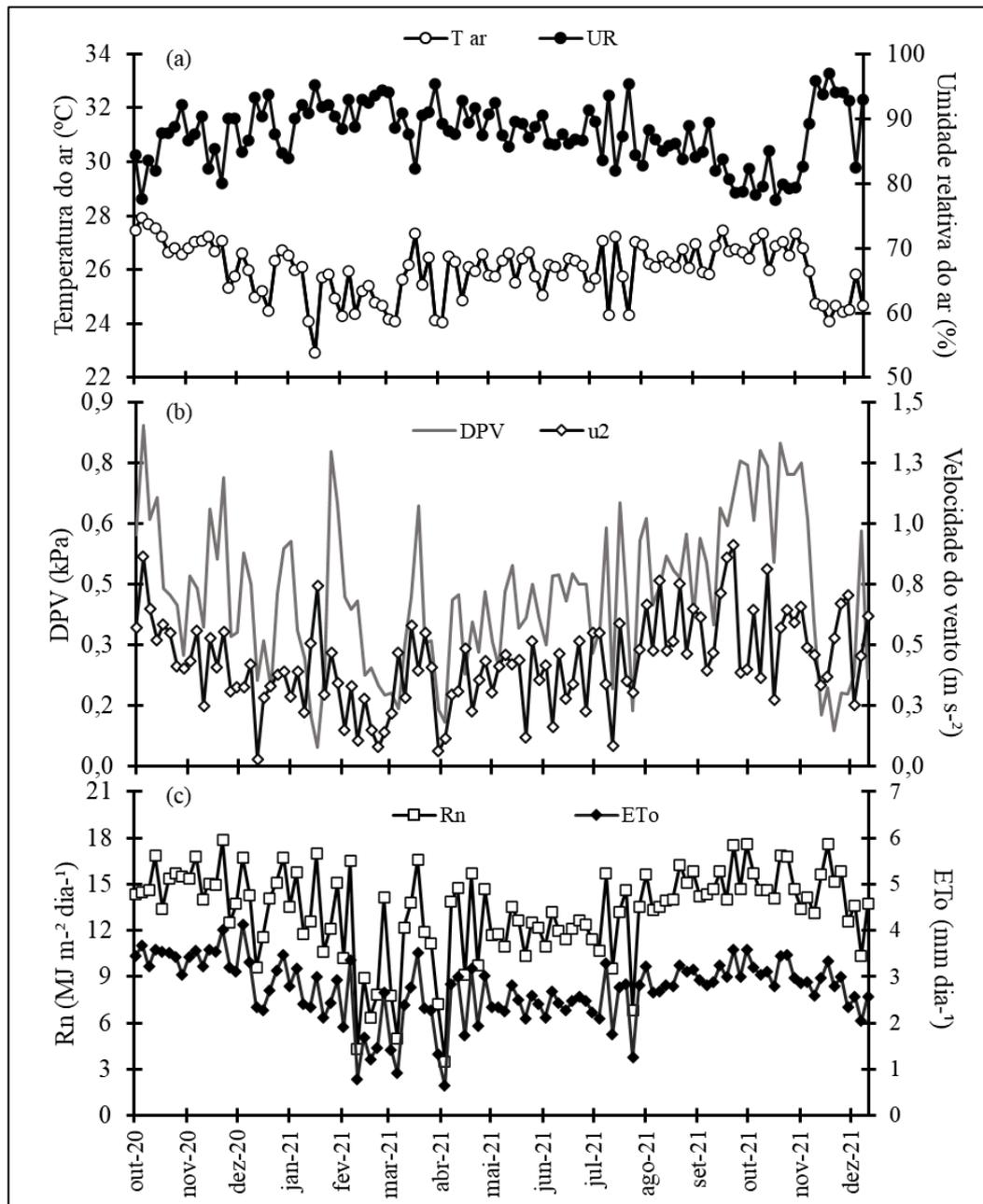
2.3.2 Condições ambientais e variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo

Na figura 8, as curvas que evidenciam a variabilidade das condições meteorológicas, explicando a evapotranspiração de coberturas vegetais. A temperatura média do ar durante o

período mais chuvoso foi de 25,6°C, enquanto durante o período menos chuvoso a temperatura média do ar foi de 26,4°C, com máxima (outubro) e mínima (janeiro) absolutas variando entre 36,5°C e 19,9°C, respectivamente, durante o período avaliado. Já a umidade relativa apresentou variação média de 1,1% entre os períodos mais e menos chuvosos com média diária de 86,9% e 85,8%, respectivamente.

A variabilidade da temperatura observada na área de estudo é considerada ótima para o desenvolvimento do limão Tahiti (ALVARENGA; NOGUEIRA, 1978), haja vista que temperaturas variando de 13°C a 38°C são consideradas favoráveis ao crescimento vegetativo dos citros, pois nessa faixa de temperatura, as plantas cítricas conseguem emitir novas brotações não sendo limitadas pelo estresse térmico (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Figura 8 - Variação dos elementos climáticos de temperatura e umidade relativa do ar (a) e do saldo de radiação e da evapotranspiração de referência (b) ao longo de 15 meses de experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.



Fonte: Do autor.

Os valores máximos de déficit de pressão de vapor (DPV) e de velocidade do vento (u_2) observados no experimento durante o período mais chuvoso foram de 0,78 kPa e $1,11 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, enquanto para o período menos chuvoso os valores máximos observados foram de 0,83 kPa e $1,36 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 8 - b).

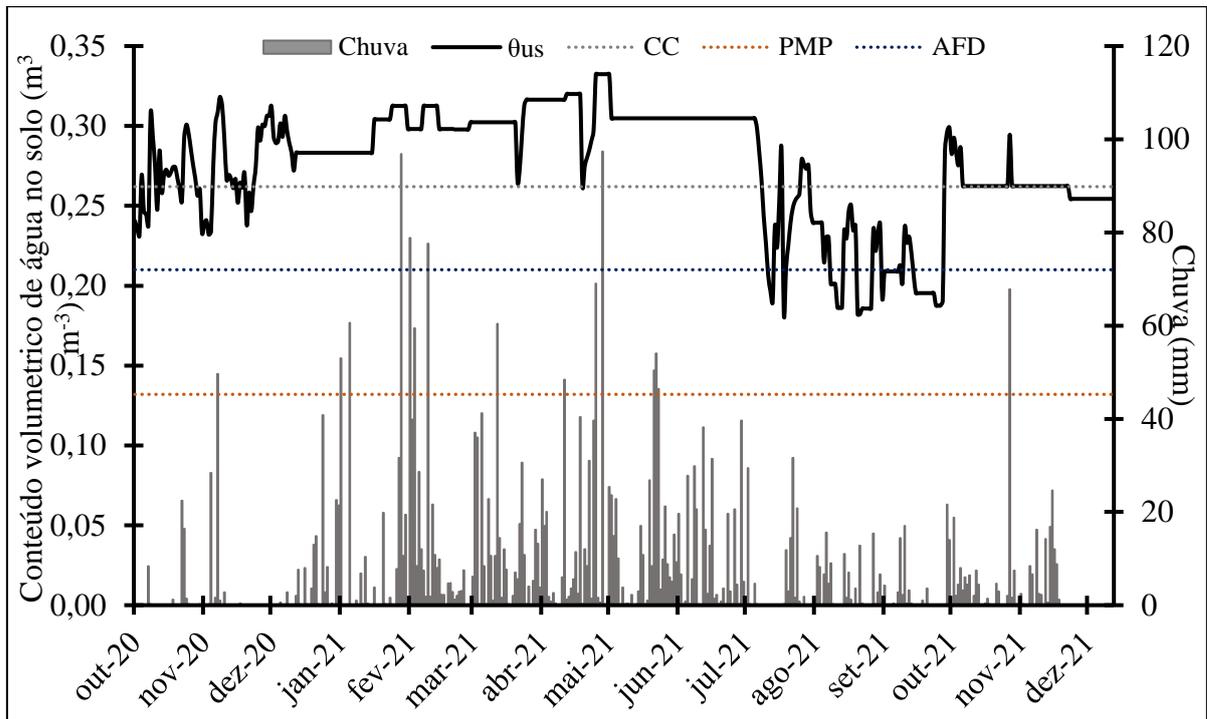
Ao longo de todo o experimento, verificou-se uma relação inversa na variabilidade dos elementos climáticos DPV, u_2 e Tar quando comparados aos dados de UR. Essa relação foi influenciada pelas condições atmosféricas, em razão de que quando se tinha uma demanda de

vapor d'água mais elevada pela atmosfera, como no período menos chuvoso, os valores da UR reduziam à medida que os valores de DPV, u_2 e Tar aumentavam. Tal variabilidade pode induzir a uma troca gasosa entre a copa do limão tahiti cada vez maior, desde que o plantio apresente conteúdo de água no solo em condições adequadas, o qual depende do manejo de irrigação instalado na área, conforme notado nos valores expressos pela ETo.

Durante o período mais chuvoso no experimento os valores médios observados do Rn e da ETo foram de $12,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $2,49 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente, enquanto no período menos chuvoso a média do Rn foi de $14,03 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e da ETo foi de $2,90 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 8 - c). O valor de Rn superior no período menos chuvoso se dá em decorrência da redução da radiação difusa, favorecida pela maior quantidade de dias de céu claro, que por sua vez culminam no aumento da incidência da radiação direta que aumenta a demanda atmosférica uma vez que eleva os valores da Tar, DPV e u_2 ocasionando também o incremento nos valores da ETo.

A variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo e da chuva ao longo dos 15 meses de experimento são observados na figura 9. Verifica-se que durante o período compreendido entre os meses de dezembro de 2020 e julho de 2021 o conteúdo volumétrico de água no solo apresentou condições satisfatórias para o desenvolvimento da cultura, mantendo-se acima dos $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ correspondentes ao limite de água facilmente disponível – AFD. Essa condição foi influenciada principalmente pelo fato de o período em questão ter concentrado 78% dos 3148 mm de chuva que ocorreram ao longo do período experimental.

Figura 9 - Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo e da precipitação ao longo de 15 meses de experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.



Fonte: Do autor

Entre os meses de agosto e novembro de 2021, a quantidade de chuvas correspondeu a 22% do total observado durante o experimento (Figura 9). Apesar deste período ter proporcionado redução no conteúdo volumétrico de água no solo, verificou-se que o nível hídrico continuava próximo do limite de água facilmente disponível para as plantas (figura 9) motivo pelo qual não se realizou o suprimento hídrico por meio da irrigação. Observa-se que a redução moderada na água disponível no experimento durante o período menos chuvoso, pode ter contribuído com o florescimento da cultura (TAIZ; ZEIGER, 2009), uma vez que os citros de modo geral, têm sua floração condicionada não somente a estímulos internos, mas também a influências ambientais (CRUZ et al., 2006), como verificado no estudo de Alves Junior et al. (2011), que ao atender 25% da demanda hídrica da limão na fase que antecede a floração da cultura verificaram aumento na quantidade de flores, número de frutos por árvore e consequentemente em sua produtividade..

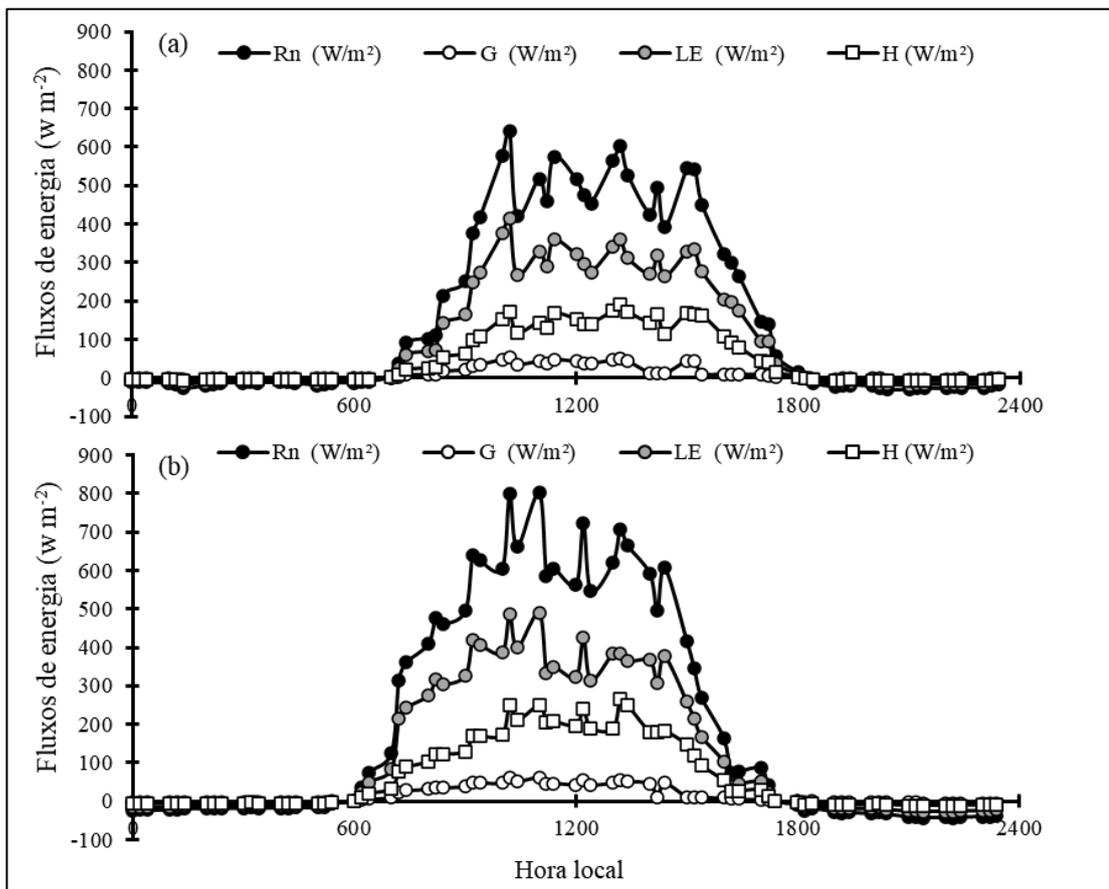
A reposição de água por irrigação é uma prática agrícola que pode melhorar o rendimento para os produtores de citros quando realizado da forma correta (PIRES et al., 2011), entretanto, a falta do conhecimento acerca da necessidade de água das culturas pode resultar no uso ineficiente da água. Isso, além do desperdício, acarreta prejuízos para a cultura (MARIN et al., 2002). Muitos produtores de citros têm adotado a irrigação para melhorar a produção, no

entanto, um dos entraves para o aumento da eficiência no uso de água é a restrição de informações sobre o adequado manejo da irrigação (BARBOZA JUNIOR et al., 2008).

2.3.3 Sazonalidade do balanço de energia

As variações horárias do saldo de radiação e dos fluxos de calor são apresentadas na figura 10. Observa-se que durante o período noturno todos os componentes do balanço de energia são negativos ($LE < H < G$), tornando-se positivos à medida que surgem os primeiros raios solares e o R_n começa a se elevar. Tal inversão ocorreu na área, em média, a partir das 7h00min durante o período mais chuvoso (figura 10-a) e a partir das 6h20min durante o período menos chuvoso (figura 10-b).

Figura 10 – Variabilidade média horária dos componentes do balanço energético diário durante o período mais chuvoso (a) e o período menos chuvoso (b) em experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.



Fonte: Do autor.

Durante o período mais chuvoso o saldo de radiação atingiu valores máximos em torno das 10h00min, com picos instantâneos de até 641 W m^{-2} (figura 10-a), enquanto no período

menos chuvoso os picos instantâneos chegaram a 802 W m^{-2} por volta das 11h00min (figura 10-b).

A redução média de 20% nos valores horários do R_n durante o período mais chuvoso, se dá em função do aumento da nebulosidade em razão da sazonalidade da precipitação pluviométrica, a qual ocorre na região do nordeste paraense de um modo geral. Isso foi evidenciado nos estudos de Farias et al. (2017) em Castanhal; Souza et al. (2018) em Salinópolis; e de Sousa et al. (2021), no município de Capitão Poço, os quais observaram que a distribuição irregular das chuvas ao longo dos anos, influencia diretamente na variação da quantidade de energia que incide diretamente no sistema.

Verificou-se durante o experimento que o fluxo de calor latente apresentou uma diferença média de 15% entre os períodos de maior e de menor pluviosidade, sendo que no período menos chuvoso apresentou pico instantâneo de 490 W m^{-2} , e no período mais chuvoso o pico instantâneo verificado foi de 415 W m^{-2} . Apesar do período mais chuvoso apresentar maior quantidade de água disponível para as plantas, a menor demanda de água da atmosfera, influenciada pela redução nos valores de DPV, Tar e u_2 e aumento da UR acabou limitando o poder evapotranspirativo nesse período. Aliado a isto, nota-se que a oferta hídrica em função do conteúdo de água no solo elevado em alguns horários pode também ter contribuído para um maior uso instantâneo da energia na forma de LE durante o período menos chuvoso.

O fluxo de calor sensível - H, apresentou valores energéticos menores que o de LE, com máximos de energia em ambos os períodos ocorrendo as 13h40 min com 267 W m^{-2} (figura 10-a) durante o período mais chuvoso e de 290 W m^{-2} (figura 10-b) durante o período menos chuvoso. O H por ser influenciado não só pela radiação solar, mas também pela interação de variáveis como UR, u_2 , nebulosidade e precipitação (SANTOS et al., 2010) apresentando maior quantidade de utilização da energia disponível no período menos chuvoso, em função da redução quantidade de água disponível (figura 9), ocasionando aumento da energia utilizada no aquecimento do ar.

Já para o fluxo de calor no solo - G, a energia máxima foi verificada após as 14h00min em função da energia ser utilizada primeiramente para aquecer o ar acima da superfície do solo e somente posterior a isso o solo se aquece provocando alterações no valor de G. Os valores instantâneos máximos de G observados foram de 44 W m^{-2} (figura 10-a) e 56 W m^{-2} (figura 10-b) para o período mais e menos chuvoso, respectivamente.

A elevada quantidade de água observada durante o experimento influenciou diretamente nos valores de H e G quando comparados com o LE, os quais foram relativamente mais baixos, confirmando, portanto, que a maior parte da energia disponível no plantio de limão tahiti é

predominantemente utilizada no processo de evapotranspiração. Resultados semelhantes foram observados por Marin et al. (2002) em estudo com limão na cidade de Piracicaba, onde verificou-se mais de 65% da energia disponível sendo utilizada pelo fluxo de calor latente.

Ao longo do experimento observou-se que a energia disponível no sistema é particionada em sua maioria para o fluxo de calor latente (tabela 6), sendo utilizada na evapotranspiração, apresentando percentuais médios (LE/Rn) durante o período mais chuvoso e menos chuvoso correspondentes a 63 e 60%, respectivamente. Verifica-se que a ligeira superioridade no percentual de partição do LE/Rn para o período mais chuvoso está relacionada com a menor resistência do dossel em transportar o vapor d'água neste período (ORTEGA-FARIAS et al., 2004), devido apresentar maior disponibilidade hídrica e conseqüentemente maior conteúdo volumétrico de água no solo, em função da maior pluviosidade (figura 9).

Isto é constatada principalmente nos primeiros meses do ano na região (SOUSA et al., 2021), apesar de ter apresentado casos instantâneos de menor energia na forma de calor latente em alguns horários. A maior cobertura foliar (IAF) observada durante o período mais chuvoso pode também ter contribuído para o aumento do consumo da energia na sua forma latente durante o período mais chuvoso em termos percentuais (Tabela 6), uma vez que quanto maior a área foliar, menor a resistência da planta ao transporte de vapor desde que haja suprimento de água (ORTEGA-FARIAS et al., 2004).

Tabela 6 – Índice de área foliar, fator de desacoplamento e média diária dos componentes do balanço de energia e partição diurna durante o período mais chuvoso e menos chuvoso no experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.

Período	IAF	Ω	Energia (MJ m ⁻² d ⁻¹)				Partição de energia		
			Rn	LE	H	G	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
Mais Chuvoso	2,12	0,74	11,84	7,43	3,83	0,63	0,63	0,32	0,05
Menos Chuvoso	1,91	0,81	13,69	8,35	4,65	0,82	0,60	0,34	0,06

Fonte: Do autor.

A energia disponível, particionada para H, demonstra um padrão contrário aos valores de LE durante os dois períodos avaliados, verificando-se menores percentuais durante o período mais chuvoso e maiores durante o período menos chuvoso. No primeiro período (mais chuvoso) em que as condições hídricas do solo são satisfatórias (conteúdo volumétrico de água no solo superior ao limite de água facilmente disponível), 32% da energia disponível foi utilizada para o aquecimento diurno do ar, enquanto para o período seguinte observou-se aumento de 2%.

O fluxo de calor no solo (G) demonstrou padrão de particionamento da energia disponível similar ao H, mas de menor magnitude, com percentual ligeiramente inferior no primeiro período (mais chuvoso) quando comparado ao período seguinte (menos chuvoso) (tabela 6). Um possível motivo para o aumento nos valores de G entre os períodos, é que o controle de plantas daninhas é realizado com maquinário pesado, prioritariamente durante o período com menor incidência de chuvas (Figura 9) para que se evite alterações drásticas em propriedades físicas do solo (como a densidade global) acarretando sua maior exposição durante o segundo semestre, aumentando nesse período a incidência da radiação direta ao solo, provocando maior aquecimento e aumento do fluxo de energia em direção ao solo.

As respostas de partição de energia para o cultivo de limão Tahiti encontradas neste estudo, corroboram os resultados das pesquisas realizadas na região do nordeste paraense sobre o balanço de energia em cultivos perenes, como o de Souza et al. (2016), para um pomar de manga em cultivo de sequeiro e o de Sousa et al. (2021) para um plantio de açaizeiro irrigado, onde ambos verificaram o mesmo padrão sazonal de particionamento da energia disponível, sendo $LE > H > G$.

2.3.4 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo

Ao converter os valores de LE diurnos em lâmina de água, observou-se que o consumo total de água pelo limão tahiti durante os 15 meses avaliados (de 20/10/2020 a 31/12/2021) foi de 1599 mm (tabela 7), havendo no período menos chuvoso um consumo hídrico médio mensal de 18% superior à média durante o período mais chuvoso. Apesar de existir uma partição maior de energia para a sua forma latente durante o período mais chuvoso, em termos absolutos esta energia usada na evapotranspiração é superior no período de estiagem devido ao aumento na oferta do saldo de energia.

A diferença encontrada entre os períodos também é reflexo da variabilidade da demanda atmosférica, altamente influenciada pela redução de 77% no total de chuvas durante o segundo semestre do ano (período menos chuvoso) e por fatores meteorológicos que incrementam os valores de consumo hídrico, à medida que se eleva os valores da velocidade do vento, do déficit de pressão de vapor e da temperatura (ZHAO; LIU, 2018).

Tabela 7 - Variabilidade mensal da chuva, consumo hídrico, evapotranspiração da cultura (ETc) e do coeficiente de cultivo (kc) ao longo de 15 meses de experimento com limão Tahiti em Capitão Poço – PA.

Ano	Meses	Precipitação (mm)	Consumo hídrico (mm)	ETc (mm dia ⁻¹)			kc		
				Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín
2020	Outubro	9	50	4,2	4,7	3,6	1,2	1,3	1,1
	Novembro	126	131	4,4	5,3	2,6	1,3	1,6	1,1
	Dezembro	6	122	3,9	5,1	2,6	1,2	1,4	1,0
2021	Janeiro	276	107	3,5	4,7	1,7	1,2	1,4	1,1
	Fevereiro	506	91	3,3	4,8	0,8	1,3	1,4	1,2
	Março	320	86	2,8	4,3	1,2	1,2	1,3	1,4
	Abril	276	104	3,5	4,9	1,1	1,5	1,4	1,4
	Mai	431	103	3,3	4,6	1,5	1,5	1,6	1,4
	Junho	408	100	3,3	3,9	1,7	1,5	1,6	1,3
	Julho	237	106	3,4	4,2	2,6	1,4	1,6	1,3
	Agosto	141	120	3,9	4,5	1,9	1,4	1,6	1,3
	Setembro	104	119	4,0	4,5	3,0	1,4	1,5	1,3
	Outubro	99	126	4,2	5,0	3,3	1,4	1,5	1,3
	Novembro	132	120	4,0	4,8	2,3	1,3	1,5	1,2
	Dezembro	78	113	3,7	4,7	1,9	1,5	1,6	1,3
Total/Média		3148	1599	3,7	4,7	2,1	1,4	1,6	1,2

Fonte: Do autor.

Média (Méd)¹; Máxima (Máx)²; Mínima (Mín)³

A partir do conhecimento dos valores particionados dos fluxos de energia utilizados pelo limão tahiti, verifica-se a possibilidade da adoção de estratégias sazonais na região para a cultura, cuja finalidade principal é atenuar os valores dos fluxos destinados para o aquecimento do ar e do solo. Considerando que o regime pluviométrico na Amazônia como um todo, se concentra durante o primeiro semestre do ano (tabela 7), o que influencia diretamente na redução do conteúdo volumétrico de água no solo no período seguinte (figura 9), o desconhecimento da necessidade real de água pela cultura dos citros, favorece o aumento de H e G neste 2º período do ano. Portanto, a mensuração e reposição da quantidade total de água utilizada pela cultura é imprescindível para que o fluxo de calor latente seja a principal e maior parte da energia disponível para o processo de evapotranspiração.

Verifica-se que os valores da ETc do limão tahiti são menores durante o período mais chuvoso (Tabela 7), apesar de apresentar condição hídrica do solo satisfatória para o crescimento e desenvolvimento da cultura e o IAF ter sido superior em 10% quando comparado ao período menos chuvoso (tabela 6). Tal resultado pode ser interpretado pelo fato do fator de desacoplamento da cultura (Ω) apresentar valor mais próximo de 1 (Tabela 6) neste período

mais chuvoso, indicando uma condição de desacoplamento da superfície vegetada com a atmosfera, o que significa que a ET_c deixou de responder diretamente à cobertura foliar, passando a ser influenciada principalmente pela disponibilidade energética (radiação solar e R_n). O elevado fator de desacoplamento (0,81) também obtido durante o período menos chuvoso sugere que as maiores trocas gasosas entre a atmosfera e as plantas se deram em razão da boa condição hídrica do solo (umidade próxima do limite de água facilmente disponível), dos menores valores de UR e do aumento do DPV, u_2 e T_{ar} devido ao incremento do R_n (ALLEN et al., 1998), o qual neste caso também foi o principal controlador do processo de troca gasosa entre a copa e a atmosfera.

A variabilidade de 0,8 a 5,3 mm da ET_c encontrada nesse estudo (Tabela 7) está próximo dos resultados encontrados nas pesquisas de Barboza Junior et al. (2008) com lisímetro de pesagem e de Marin et al. (2002) com o método da razão de Bowen em estudos sobre a necessidade hídrica do limão no Brasil, onde os autores constataram a ET_c variando entre 1,2 a 5,6 mm e entre 1,04 a 6,59 mm, respectivamente. Isso demonstra a precisão do método de razão de Bowen na determinação da evapotranspiração das culturas, a qual já foi comprovada em diversos estudos anteriores como os de Sousa et al. (2011), Rana e Katerji (1996) e Billesbach e Arkebauer (2012).

Observa-se que ao longo dos 15 meses de experimento, a demanda hídrica da atmosférica sempre foi menor que a demanda hídrica da cultura ($K_c > 1$), o que está relacionado com o fato do plantio ser altamente adensado e possuir maior área foliar, quando comparado a grama, a cultura padrão no cálculo da ET_o , promovendo superioridade nas taxas das trocas gasosas do limão Tahiti, acarretando maior superfície evapotranspirável.

Os valores de K_c encontrados nesta pesquisa (Tabela 7), diferem de diversos outros estudos que objetivaram determinar o K_c para a cultura da limeira ácida. Guerra; Grajales e Rojas (2015) encontraram o valor de K_c de 1,0 para as regiões de El Espinal e Tolima. No município de Piracicaba, São Paulo, Marin e Angelocci (2011) obtiveram as médias de K_c de 0,65 para o verão e 0,24 para o inverno, enquanto Barboza-Junior et al. (2008) que estudaram a limão na mesma região encontraram o K_c médio de 0,98. Todos os autores ressaltaram, que esses valores fornecem uma base útil para o projeto e operação de sistemas de irrigação, entretanto, a variabilidade dos resultados demonstra a importância de estudos específicos para uma dada localidade.

Os tipos de manejo e tratos culturais adotados, diferentes métodos usados na obtenção tanto da ET_c como também de ET_o ou na determinação do próprio K_c (simples ou dual) são fatores a serem considerados, podendo explicar as diferenças obtidas entre as diferentes regiões.

A elevada diferença encontrada entre os valores de K_c entre os estudos, está relacionada principalmente com as condições climáticas dos experimentos como também às características da área de estudo como a densidade de plantio (DS), e conseqüentemente o percentual de cobertura do solo (PCS). Barboza-Junior et al. (2008) realizaram estudos em uma área cuja DS era de 360 plantas por hectare com PCS de 69,49% enquanto em Capitão Poço a DS foi de 735 plantas por hectare com PCS correspondente a 74,2%.

As diferenças evidenciadas entre a PCS e a DS nos estudos, implicam sobretudo na maior quantidade de área foliar disponível no experimento de Capitão Poço, acarretando maiores taxas de transpiração que é o principal processo de transferência de água para a atmosfera (ALLEN et al., 1998) e conseqüentemente em uma maior demanda de água da cultura.

O K_c por ser um coeficiente altamente influenciado pelas características do dossel vegetativo e das condições climáticas locais, deve sempre ser adaptado por meio de pesquisas para cada região, a fim de aumentar a eficiência no manejo da irrigação e reduzir as superestimativas ou subestimativas que podem ser geradas com a utilização do K_c de outras regiões.

Os estudos sobre consumo hídrico e K_c para a limão Tahiti ainda são incipientes, dada a importância econômica da cultura para o Brasil e para o mundo, esbarrando muitas vezes na dificuldade de instalação dos equipamentos capazes de monitorar com precisão a demanda hídrica da cultura e da atmosfera, além da onerosidade para aplicação de alguns métodos. Logo, os achados nesse estudo são importantíssimos para nortear o manejo hídrico da cultura no único polo citrícola presente na região amazônica.

2.4 Conclusão

O particionamento da energia disponível no pomar de limão tahiti no polo citrícola da Amazônia Oriental apresenta reduzida variabilidade sazonal ao comparar os períodos mais pluviosos com o de baixa oferta de chuva na região estudada, pois em média 61,5% da energia é utilizada no processo de evapotranspiração, 33% são destinados para o aquecimento do ar e 5,5% para o aquecimento do solo.

O balanço de energia pelo método da razão de Bowen é indicado para estimar o consumo hídrico do limão tahiti no polo citrícola da Amazônia Oriental, sendo que no período menos chuvoso há aumentos em 20% do consumo médio mensal no período mais chuvoso.

O principal elemento climático que influencia a evapotranspiração do pomar irrigado de limão Tahiti no polo citrícola da Amazônia Oriental é a radiação solar, enquanto o índice de área foliar apresenta importância secundária, dado o desacoplamento da cultura com a atmosfera.

Os coeficientes de cultivo simples mensais obtidos neste estudo para o limão Tahiti são indicados para subsidiar o planejamento da irrigação de acordo com a necessidade hídrica da cultura, permitindo também aumentar a eficiência de uso da água e consequentemente os lucros do produtor.

Os ajustes para os parâmetros variam com a estação do ano e são específicos para as condições de crescimento e geometria de plantio onde o experimento foi conduzido.

Referências

- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ-ADEPARÁ. **Controle das pragas quarentenárias dos citros**. 2019. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/artigos/agricultura-%C3%A9-respons%C3%A1vel-por-quase-40-da-economia-do-par%C3%A1>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO. **Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome, 1998. 300p.
- ALVES JÚNIOR, J.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C. R.; SILVA, T. J. A.; EVANGELISTA, A. E. P. Response of young ‘tahiti’ lime trees to different irrigation levels. **Engenharia Agrícola**, São Paulo, SP, v. 31, n. 2, p. 303-304. 2011.
- ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A.; COELHO, M. A.; MARIN, F. R. Measurements of net radiation absorbed by isolated acid lime trees (*Citros latifolia* Tanaka). **The Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, v. 79, p. 699-703, Nov. 2004.
- BARBOZA JUNIOR, C. R. A.; FOLEGATTI, M. V.; ROCHA, F. J.; ATARASSI, R. T. Coeficiente de cultura da limão tahiti no outono-inverno determinado por lisimetria de pesagem em Piracicaba – SP. **Engenharia Agrícola**, São Paulo, SP, v. 28, n. 4, p. 691-698, 2008.
- BARROS, J. R. M.; BARROS, A. L. M.; CYPRIANO, M. P. **O mercado da citricultura no Brasil e as suas novas perspectivas**. 2016. Disponível em: http://www.citrosbr.com/download/biblioteca/CitrosBR_Livro_Concecitros_2016.pdf. Acesso em 10 de julho de 2019.
- BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: FUNEP, 1988.

BILLESBACH, D. P.; ARKEBAUER, T. J. First long-term, direct measurements of evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 156, p. 104-110, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001>

BILLESBACH, D. P.; ARKEBAUER, T. J. First long-term, direct measurements of evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 156, p. 104-110, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001>

BORDIGNON, R.; MEDINA FILHO, H. P.; SIQUEIRA, W. J.; PIO, R. M. Características da laranjeira Valência sobre clones e híbridos de porta-enxertos tolerantes à tristeza. **Bragantia**, v.62, p. 381-395, 2003.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review, Ithaca**, v.27, p.779-787, 1926.

COELHO FILHO, M. A.; ANGELOCCI, L. R.; VASCONCELOS, M. R. B.; COELHO, E. F. Estimativa da área foliar de plantas de limão ‘tahiti’ usando métodos não-destrutivos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 27, n.1, p.163-167, abr. 2005.

CRUZ, M. C. M.; SIQUEIRA, D. L.; SALOMÃO, L. C. C.; CECON, P. R. Florescimento da tangerineira ‘Ponkan’ e da limeira ácida ‘Tahiti’ submetidas ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.360-364, 2006.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua en rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 21 2p. (Riego y Drenaje, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.

FARIAS, V. D. S.; LIMA, M. J. A.; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. P., SOUZA, P. J. O. P. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of Cowpea in the Eastern Amazon. **Revista Caatinga**, Mossoró, RN, v. 30, n. 1, p. 190–200, jan/mar. 2017.

FISHER, R. A.; WILLIAMS, M.; RUIVO, M. L.; COSTA, A. L.de; MEIR, P. Evaluating climatic and soil water controls on evapotranspiration at two Amazonian rainforest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 850-861, jun. 2008.

FRAGA, C.I.M.; SANCHES, L.; PINTO JUNIOR, O.B.; CURADO, L.F.A.; GAIO, D.C. (2015) Condutância do dossel, condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia divergens* Pohl (vochysiaceae) no pantanal brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, p.275–284, 2015. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130102>.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0040-1>.

GRAAMANS, L.; DOBBELSTEEN, A. V. D.; MEINEN, E.; STANGHELLINI, C. Plant factories; crop transpiration and energy balance. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 138–147, mai. 2017.

GUERRA, D.; GRAJALES, L. C.; ROJAS, L. R. Effect of irrigation and fertilization on crop yield and fruit quality of the Tahiti lime *Citros latifolia* Tanaka (Rutaceae). **Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 16, n. 1, p. 79-85, jun. 2015.

HEILMAN, J. L.; MCINNES, K. J.; SAVAGE, M. J.; GESH, R. W.; LASCANO, R. J. Soil and canopy energy balance in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 71, p. 99-114, 1994. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90102-3)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. **Produção agrícola**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa>. Acesso em 20 de maio de 2019.

KOLLER, O. L. (org.) **Citricultura catarinense**. Florianópolis: Epagri, 2013. 319 p.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1091–1096, abr. 2011.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; VILLANOVA, N. A. Balanço de energia e consumo hídrico em pomar de limão Tahiti. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, SP, v.17, n.2, p.219-228, 2002.

MCNAUGHTON, K. G.; JARVIS, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: KOZLOWSKI, T.T. (ed). **Water deficit and plant growth**. New York: Academic Press, 1983. p 1–47. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-424157-2.50007-0>.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; MILAN, P.; LOPES, F. F.; CRESSONI, F. KALAKI, R. **O retrato da citricultura brasileira**. 2010. Disponível em: http://www.citrosbr.com/download/biblioteca/Apresentacao_Marcos_Fava_evento_valor.pdf. Acesso em 10 de julho de 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA - FAO. **Produção de limão e limas**. Produção de laranjas. 2017. Disponível em: www.fao.org/faostat/en/#data/QC. Acesso em 30 de jun. de 2019.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; OLIOSO, A.; ANTONIOLETTI, R.; BRISSON, N. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, v. 23, p. 1-9, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0087-1>.

PEDDINTI, S. R.; KAMBHAMMETTU, B. V. N. P. Dynamics of crop coefficients for citrus orchards of central India using water balance and eddy covariance flux partition techniques. **Agricultural Water Management**, v. 212, p. 68–77, fev. 2019.

PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; ALFARO, A. T. Necessidades hídricas de citros e macieiras a partir da área foliar e da energia solar. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 31, n. 3, p. 671-679, set. 2009.

PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agric For Meteorol**, v.97, p.141-50. 1999. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5).

PILAU, F.G.; ANGELOCCI, L.R. Leaf area and solar radiation interception by orange tree top. **Bragantia**, v.74, n.4, p.476-482, mai. 2015.

PIRES, R. C. M.; BODINE JUNIOR, D.; SAKAI, E.; VILLAR, H. L.; SILVA, T. J. A.; ARRUDA, F. B. Effect of trickle irrigation on root development of the wet bulb and 'pera' orange tree yield in the state of São Paulo, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1096-1103, dez. 2011.

PORTELA, C. R.; MARINHO, C. S.; AMARAL, B. D.; CARVALHO, W; S. G.; CAMPOS, G. S.; SILVA, M. P. S.; SOUSA, M. C. Desempenho de cultivares de citros enxertadas sobre o trifoliato 'Flying Dragon' e limoeiro 'Cravo' em fase de formação do pomar. **Bragantia**, Campinas, SP, v.75, n.1, p.70-75, jan/mar. 2016.

RANA, G.; KATERJI, N. Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: The sweet sorghum case. **Theor Appl Climatol**, v.54, p.187-200, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF00865161>.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review. **Eur J Agron**, v.13, p.125-153, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8).

SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 488-496, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-04X2010000500008>.

SIMON, J.; ANGELOCCI, L. R. Saldo de radiação em cafeeiros e limeiras: Relações com saldo de radiação de gramado e radiação global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.18, n.12, p.1218-1227, dez. 2014.

SOUSA, D.D.P. *et al.* Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrig Sci**, v.39, n. 1, p.5-22. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; BOTELHO, M. D. N.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E. B.; FARIAS, J. R. B. Impacts of soyabean expansion on the Amazon energy balance: a case study. **Experimental Agriculture**, v. 47, p. 553-567, 2011. <https://doi.org/doi:10.1017/s0014479711000391>.

SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L.; LIMA, R. T.; ROCHA, E. J. P.; Ortega-Farias, S. Water requirement estimate for the reproductive period of mango orchards in the Northeast of the state of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 3, e311, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016311>.

SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E. B. Diurnal Energy Balance in a Mango Orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 537-546, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333012>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: [s.n], 2009.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M. Five methods to interpret field measurements of energy fluxes over a micro-splinkerirrigated mango orchard. **Irrigation Science**, v.30, p.13-28, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>.

VALLADARES, F.; PEARCY, R. W. Interactions between water stress, sun-shade acclimation, heat tolerance and photoinhibition in the sclerophyll *Heteromeles arbutifolia*. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, p. 25-36, 1997.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. Available at: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Accessed on: 20 April 2022.

WIJewardana, C.; ALSAJRI, F.A.; IRBY, J.T.; KRUTZ, L.J.; GOLDEN, B.; HENRY, W.B.; GAO, W.; REDDY, K.R. Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **J Plant Interact**, v.14, p.533-543, 2019. <http://dx.doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>.

ZHAO, X.; LIU, Y. Variability of surface heat fluxes and its driving forces at different time scales over a large ephemeral lake in China. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 123, n. 10, p. 4939–4957, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JD027437>.

CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DA PRODUÇÃO DE LIMÃO NAS PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DO BRASIL

Resumo

As crescentes demandas por alimentos, a necessidade de melhorar a produtividade dos plantios, a pressão exploratória sobre os recursos naturais, o avanço da agricultura na Amazônia, as limitações de acesso à terra e os cada vez mais frequentes eventos extremos climáticos evidenciam a necessidade de adotar índices de sustentabilidade capazes de contribuir para uma boa gestão dos recursos naturais, em especial a água. Neste estudo, utilizamos dados Evapotranspiratórios de agências públicas, assim como dados produtivos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística para calcular o tamanho das pegadas hídricas verdes, azuis e cinzas da cultura do limão e ainda correlacionar nossos resultados com índices de segurança hídrica e com parâmetros como tipo de captação do sistema produtor de água dos municípios e redução das águas superficiais para avaliar de maneira mais abrangente a sustentabilidade da produção em 48 municípios de dos 4 estados com maior produção a nível nacional. Os resultados mostram que a produtividade foi o principal fator que determinou o tamanho das Pegadas Hídricas nas áreas avaliadas e que existe ampla variabilidade da PH entre as áreas estudadas, sendo que os municípios paulistas e mineiros se demonstraram mais eficientes em relação a eficiência no uso da água e ainda ISH elevados. Também se observou que os cenários nos estados do Pará e Bahia divergem dos encontrados na região sudeste principalmente por baixas produtividades, mas também por questões ligadas a oferta hídrica nas regiões.

Palavras-chaves: pegada hídrica; segurança hídrica; citrus

Abstract

The growing demands for food, the need to improve the productivity of plantations, the exploratory pressure on natural resources, the advance of agriculture in the Amazon, the limitations of access to land and the increasingly frequent extreme climatic events show the need to adopt sustainability indices that are capable of contributing to a good management of natural resources, especially water. In this study, we used evapotranspiratory data from public agencies, as well as production data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics to calculate the size of the green, blue and gray water footprints of the lemon crop and also to

correlate our results with water security indices and parameters as a type of capture of the water producing system of the municipalities and reduction of surface water to assess in a more comprehensive way the sustainability of production in 48 municipalities in the 4 states with the highest production at the national level. Our results show that productivity was the main factor that determined the size of the Water Footprints in the evaluated areas and that there is wide variability of the PH between the studied areas, with the São Paulo and Minas Gerais municipalities being more efficient in relation to the efficiency in the use of water. water and still high ISH. We also observed that the scenarios in the states of Pará and Bahia differ from those found in the Southeast region mainly due to low productivity, but also due to issues related to water supply in the regions.

Keywords: water footprint; water security; citrine

3.1 Introdução

A intensificação das discussões em torno de indicadores de sustentabilidade, a partir da década de 1990, ajudou a evidenciar que a humanidade estava vivendo para além das capacidades do planeta (GALLI et al., 2012). Estamos em face de um dos maiores desafios a nível global: atender às crescentes necessidades alimentares da sociedade e reduzir os danos ambientais da agricultura, reduzindo o uso insustentável de água, nutrientes e produtos químicos agrícolas (FOLEY et al., 2011).

Neste contexto, surgem os conceitos de “Pegada Ecológica”, “Pegada Hídrica” e “Pegada de Carbono”, ambos contabilizam a medida da apropriação humana sobre recursos naturais como a terra, a água e emissões de gases do efeito estufa, respectivamente, quantificando os limites de consumo da população considerando a oferta presente e futura de recursos (WACKERNAGEL et al., 2004; REES; WACKERNAGEL, 1996).

A Pegada Hídrica (PH) adota o conceito de “água virtual” para expressar o volume de água por unidade de produto (m^3/ton) utilizada direta ou indiretamente em todas as etapas da produção (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011). Este indicador pode ser calculado em seus componentes verde, azul e cinza. A componente verde se refere à quantidade de águas pluviais utilizada; a componente azul contabiliza a água de irrigação capitada de reservatórios artificiais ou subterrâneos em determinado processo produtivo; a componente cinza considera o volume de água necessário para diluir poluentes a níveis aceitáveis (HOEKSTRA et al., 2011).

A PH de produtos agrícolas é a mais representativa, podendo corresponder a cerca 90% do consumo de água é direcionado para a produção de alimentos (ALLAN, 1998). Por isso essa

atividade requer atenção especial em relação à sustentabilidade, especialmente nas regiões onde a disponibilidade hídrica é reduzida, pois mesmo PH's pequenas podem ser pouco sustentáveis em regiões de escassez (SILVA et al., 2013a).

Neste sentido, regiões como a Amazônia, detentora de cerca de 80% de toda a água superficial do Brasil e baixa densidade populacional (ANA, 2019), com vastas áreas as quais podem ser destinadas ao uso agrícola (cerca de 210 Mha), sem que seja necessário avançar sobre áreas de floresta (MAPBIOMA, 2021b), podem representar áreas estratégicas para produção de alimentos de maneira sustentável a nível nacional. Mesmo assim, poucos estudos com indicadores de sustentabilidade, como a pegada hídrica, têm sido direcionados a região amazônica e nenhum deles avaliou culturas perenes (COSTA, 2017).

A agricultura é fundamental para sustentabilidade ambiental, social e econômica (ZHANG et al., 2021; FAO, 2020). Por isso inovações tecnológicas que visem a racionalidade no uso da água na agricultura contribuem para segurança hídrica das populações em diferentes dimensões (ANA, 2019a).

Estudos recentes têm se dedicado à contabilização da pegada hídrica com ampla escala temporal, entretanto, seus resultados têm pouca abrangência espacial (FERRERO et al., 2022; BAZRAFSHAN et al. 2019; MUNRO et al. 2016). O cálculo da pegada hídrica verde é particularmente relevante para produtos baseados em culturas agrícolas, devido à evapotranspiração, e a distinção entre a PH azul e a verde é muito importante em razão dos impactos hidrológicos, ambientais e sociais, tal como os custos e impactos do uso da água superficial e do subsolo (SILVA et al., 2013). É preciso compreender melhor a magnitude dos impactos da expansão da agricultura na região amazônica em relação aos recursos hídricos e fazer comparações com outros centros produtivos, como uma importante ferramenta, para que tomadores de decisões possam direcionar ações de maneira mais assertiva e sustentável.

Avaliou-se de forma pioneira a variabilidade da pegada hídrica de limão tahiti na região amazônica e em outras regiões produtoras, considerando a relevância econômica, ambiental e social da cultura, pois o limão está entre as frutas com maiores demandas por irrigação (BARBOZA JUNIOR, 2008). Possui com expansão acelerada das áreas de plantio principalmente no estado do Pará, impulsionadas geralmente por demandas crescentes nos mercados nacional e internacional, gerando rentabilidades também crescentes a milhares de produtores (IBGE, 2017).

O objetivo geral desse capítulo é avaliar a sustentabilidade das PH's verde, azul e cinza nas principais regiões produtoras do país. Para isso, foram utilizados dados de índices de segurança hídrica multidimensionais da Agência Nacional de Águas do Brasil, a fim de se obter uma

avaliação mais holística sobre a sustentabilidade da produção de limão nas regiões estudadas; desta forma responder às seguintes perguntas de pesquisa: 1) Qual a variabilidade da pegada hídrica entre os principais estados produtores de limão tahiti; 2) Quais variáveis mais influenciam na variabilidade das componentes da pegada hídrica entre as áreas avaliadas; 3) Quais regiões produtoras se destacam quanto a sustentabilidade da pegada hídrica; 4) Que fatores podem comprometer a sustentabilidade da pegada hídrica a nível municipal dentro dos estados avaliados.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Fontes de dados para os cálculos de pegada hídrica

Utilizou-se a base de dados do painel interativo de coeficientes técnicos para agricultura irrigada do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) para simular a variabilidade média mensal da demanda hídrica suprida por águas pluviais (evapotranspiração verde) e do déficit de consumo (evapotranspiração azul) da cultura do limão em 48 municípios de 4 estados com as maiores produções a nível nacional (ANA, 2019). Os dados produtivos, extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística para o ano de 2017, permitiram avaliar padrões de produção e produtividade em todos os municípios avaliados representando uma amostra de cerca de 64% da produção total do país (IBGE, 2017).

Os locais avaliados no estudo contemplaram os 4 estados com maior produção a nível nacional (respectivamente, São Paulo, Pará, Bahia e Minas Gerais) e dentro destes selecionamos os 12 municípios mais representativos com o mesmo critério. Posteriormente, estes municípios foram organizados em ordem de produtividade para que os resultados fossem melhor expressados graficamente.

Para realizar uma avaliação mais abrangente sobre a sustentabilidade da produção de limão nas regiões estudadas, utilizou-se o Índice de Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano (ISH-U) desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para cada município estudado. O ISH-U classifica os municípios de acordo com os seguintes graus de segurança: 1-Máxima; 2-Alta; 3-Média; 4-Baixa e 5-mínima. Estas classificações do ISH consideram as dimensões humanas, econômicas, ecossistêmicas e de resiliência em cada município. Nas dimensões do ISH são considerados os seguintes aspectos: 1-dimensão humana: garantia de acesso a água para atender às necessidades básicas e o bem estar das populações; 2-dimensão econômica: garantia de suprimento de água para atividades produtivas ligadas prioritariamente à produção de alimentos e à indústria; 3-dimensão ecossistêmica: garantia de

água para preservação dos ecossistemas em benefício da natureza e das pessoas e 4-dimensão de resiliência: capacidade dos ambientes de resistir a eventos extremos, como secas e inundações. Além das dimensões citadas, o ISH-U também avalia a eficiência dos mananciais e dos sistemas produtores de água adotando 4 categorias quanto ao sistema produtor de água: 1- Manancial Não Vulnerável; 2- Manancial com Média Vulnerabilidade; 3- Manancial com Baixa Vulnerabilidade e 4- Manancial com Alta Vulnerabilidade e 4 categorias quanto a eficiência do sistema de distribuição de água, sendo: 1-Alta; 2-Média; 3-Baixa e 4-Mínima.

Retirou-se também dos relatórios da ANA o tipo de captação predominantes nos municípios (superficial ou subterrânea) para avaliar o impacto das alterações na superfície de água para um período de 35 anos de observações a partir de imagens de satélite (PROJETO MAPBIOMAS, 2021a).

Tabela 8 – Condições médias anuais da temperatura máxima, mínima e temperatura para 48 municípios avaliados.

Município	UF	Temperatura mín. média (°C)	Temperatura máx. média (°C)	Precipitação média anual (mm)	Município	UF	Temperatura mín. média (°C)	Temperatura máx. média (°C)	Precipitação média anual (mm)
Irapuã	SP	19.42	29.17	1405	Sátiro Dias	BA	17.58	26.92	1036
Pindorama	SP	18.83	28.75	1539	Ituaçu	BA	18.67	28.58	1497
Itajobi	SP	18.83	28.75	1539	Bom Jesus da Lapa	BA	21.50	32.33	739
Marapoama	SP	19.08	29.17	1440	Iaçu	BA	20.58	30.42	476
Taquaritinga	SP	18.42	28.25	1541	Tanhaçu	BA	18.92	29.00	679
Urupês	SP	19.08	29.17	1440	Itaberaba	BA	21.08	30.75	566
Itápolis	SP	18.58	28.58	1471	Inhambupe	BA	21.33	29.75	649
Palmeira d'Oeste	SP	20.25	29.92	1378	Rio Real	BA	21.58	29.58	723
Fernando Prestes	SP	18.58	28.50	1560	Jaguaripe	BA	22.92	32.83	783
Cândido Rodrigues	SP	18.58	28.50	1560	Muritiba	BA	21.75	28.08	1201
Monte Alto	SP	18.42	28.33	1529	Sapeaçu	BA	20.75	28.67	899
Mogi Mirim	SP	17.00	27.17	1646	Cruz das Almas	BA	21.75	28.08	1201
Capitão Poço	PA	22.75	31.33	1849	Verdelândia	MG	20.50	31.00	841
Garrafão do Norte	PA	22.75	31.25	1747	Alfenas	MG	17.83	27.50	1412
Alenquer	PA	24.75	31.08	2599	Botelhos	MG	15.00	23.83	1977
Ourém	PA	23.00	31.17	1987	Iturama	MG	20.42	29.92	1453
Prainha	PA	24.33	31.08	2008	Luz	MG	17.42	27.58	1468
Monte Alegre	PA	24.67	31.25	1866	Matias Cardoso	MG	20.58	31.08	787
Cametá	PA	24.25	31.50	2378	Janaúba	MG	19.58	30.50	787
Tomé-Açu	PA	22.83	32.08	1910	Guaranésia	MG	16.50	25.83	1943
Santarém	PA	24.67	29.75	3219	Uberaba	MG	18.58	28.33	1756
Abaetetuba	PA	24.50	29.92	1927	Jaíba	MG	20.58	31.33	850
Acará	PA	22.83	31.83	1956	Campina Verde	MG	19.42	29.67	1474
Igarapé-Miri	PA	23.83	30.83	2262	Palma	MG	19.58	28.42	1401

Fonte: Adaptada de INMET (2022).

Tabela 9 – Fontes de dados para as estimativas das demandas evapotranspirométricas verdes e azuis para cultura do limão utilizadas nos cálculos de pegada hídrica dos 48 municípios analisados.

VARIÁVEL/PARÂMETRO	FONTE DE DADOS
Precipitação Total	Dados da rede Hidroweb/ANA: 10.083 estações com disponibilidade acima de 60 meses (dados até dezembro de 2017)
Culturas	Limão
Evapotranspiração Potencial (ETo)	Dados da rede INMET: 524 estações meteorológicas, sendo 261 automáticas (dados até dezembro de 2017) Método Penman-Monteith: Boletim FAO 56
Evapotranspiração real da cultura (ETrc)	ETo x kc x ks
Coefficientes de cultura (kc)	Kc médio para o limão = 0,8 (Boletim FAO 56)
Capacidade de água disponível (CAD)	Adaptado de: Rossato, 2001; Rossato; Alvalá.; Tomassela, (2004); Tomassela; Hodnett; Rossato, (2000).
Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (Z)	Z = 1,2 metros (Boletim FAO 56)
Fator de disponibilidade de água (f)	f = 0,5 (Boletim FAO 56)
Coefficiente de umidade do solo (ks)	Função da CAD, da profundidade radicular (Z) e do fator de disponibilidade (f)
Eficiência do sistema de irrigação (%)	Valores de referência do Manual de Outorga da ANA: 80 a 95% para sistemas mecanizados

Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Para os cálculos das pegadas hídricas azul, verde e cinza foram seguidos os procedimentos e a metodologia descrita Hoekstra (2011). As equações estão descritas abaixo:

$$PH_{verde} = \frac{DHC_{verde}}{Prtv} \quad (1)$$

$$DHC_{VERDE} = 10 \cdot \sum_{d=1}^{pdc} ET_{verde} \quad (2)$$

$$PH_{azul} = \frac{DHC_{azul}}{Prtv} \quad (3)$$

$$DHC_{azul} = 10 \cdot \sum_{d=1}^{pdc} ET_{azul} \quad (4)$$

A componente verde da pegada hídrica do processo de crescimento da cultura (PH verde, $m^3 \cdot t^{-1}$) é calculada como a Demanda Hídrica verde da Cultura (DHCverde, $m^3 \cdot t^{-1}$) dividida pela produtividade da cultura (Prtv, $t \cdot ha^{-1}$). A componente azul (PH azul, $m^3 \cdot t^{-1}$) é calculada de forma parecida:

Onde, ET verde representa a evapotranspiração da água verde e ET azul a evapotranspiração da água azul. O fator 10 visa converter a unidade da água de milímetros em volumes de água por superfície terrestre ($m^3 \cdot ha^{-1}$). O somatório é feito ao longo do período, desde o dia do plantio ($d=1$) até o dia da colheita (pdc , refere-se à duração do período de desenvolvimento da cultura em dias).

$$PH_{cinza} = \frac{(\alpha \cdot TAQ)/(c_{max} - c_{nat})}{Prtv} \quad (5)$$

A componente cinza da pegada hídrica do crescimento de uma plantação ou floresta (PH cinza, $m^3 \cdot ton$) é calculada multiplicando-se a taxa de aplicação por hectare dos agroquímicos no campo (TAQ, $kg \cdot ha^{-1}$), pela fração de lixiviação / escoamento (α), dividida pela concentração máxima aceitável (C_{max} , $kg \cdot m^3$), menos a concentração natural do poluente em questão (C_{nat} , $kg \cdot m^3$), divididas então pela produtividade da cultura ($Prtv$, $t \cdot ha^{-1}$).

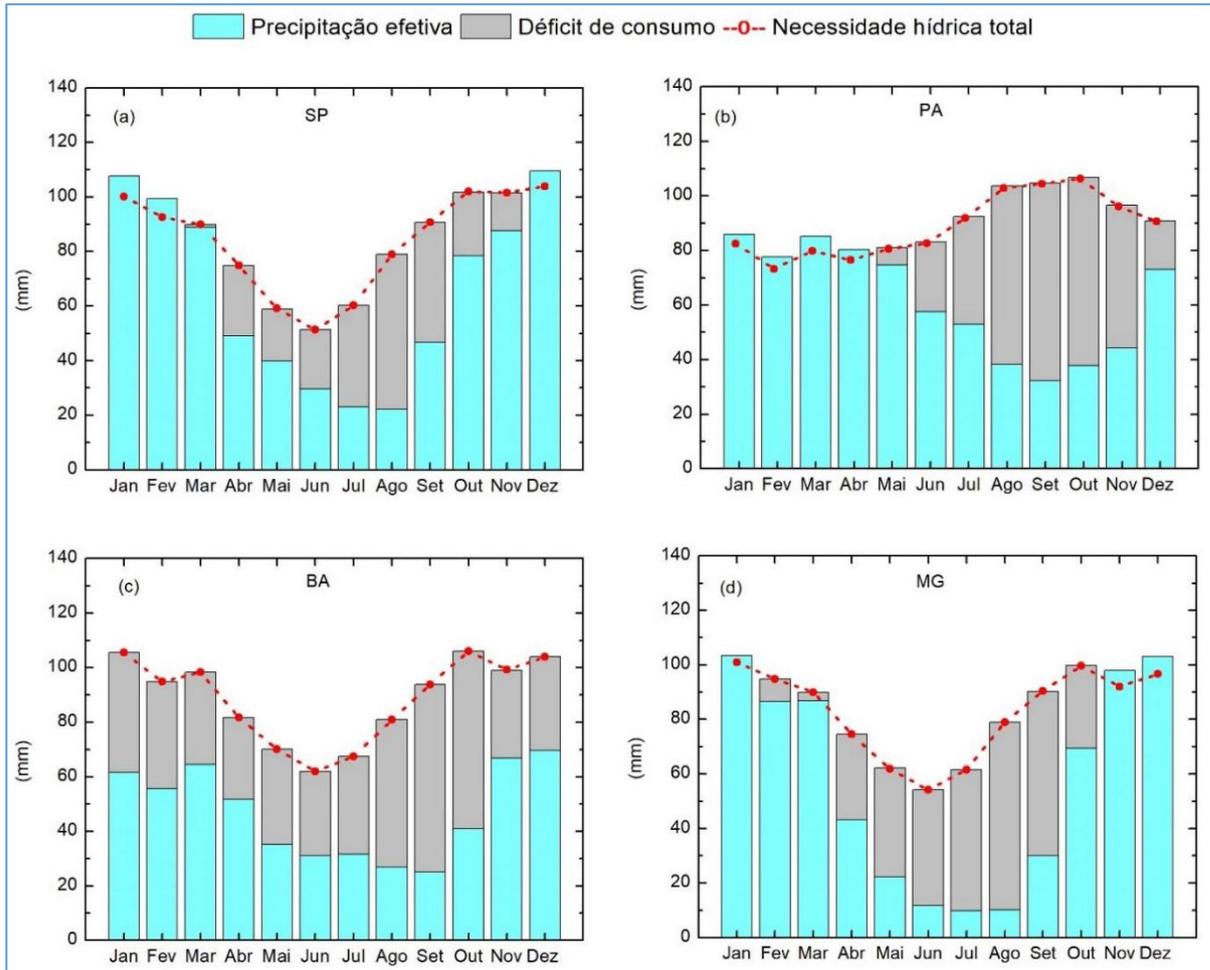
Neste trabalho atribuiu-se o valor de 10% para a fração de lixiviação do fertilizante nitrogenado, recomendado por HOEKSTRA et al. (2011). O valor limite aceitável dos fertilizantes nitrogenados seguiu o padrão da legislação CONAMA 357/2005, classe 3 para águas doces que é de 10 mgL^{-1} . Atribuiu-se o valor 0 (zero) para a concentração natural do nitrogênio no corpo hídrico, pois nesse estudo não houve avaliações, análise e espacialização de corpos hídricos ao entorno das áreas agrícolas. Para taxa de aplicação de fertilizantes foram categorizadas faixas de aplicação em função da produtividade média das áreas estudadas, baseadas em recomendações médias do Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas (Citar boletim 100 do IAC).

A pegada hídrica total ($m^3 \cdot t^{-1}$) foi calculada a partir do somatório das componentes verde, azul e cinza para cada município avaliado. A equação está descrita abaixo:

$$PH_{total} = PH_{verde} + PH_{azul} + PH_{cinza} \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (7)$$

3.3 Resultados e Discussão

Figura 11 – Variabilidade média mensal da precipitação efetiva, do déficit de consumo e da necessidade hídrica total da cultura do limão tahiti nos principais estados produtores do país.

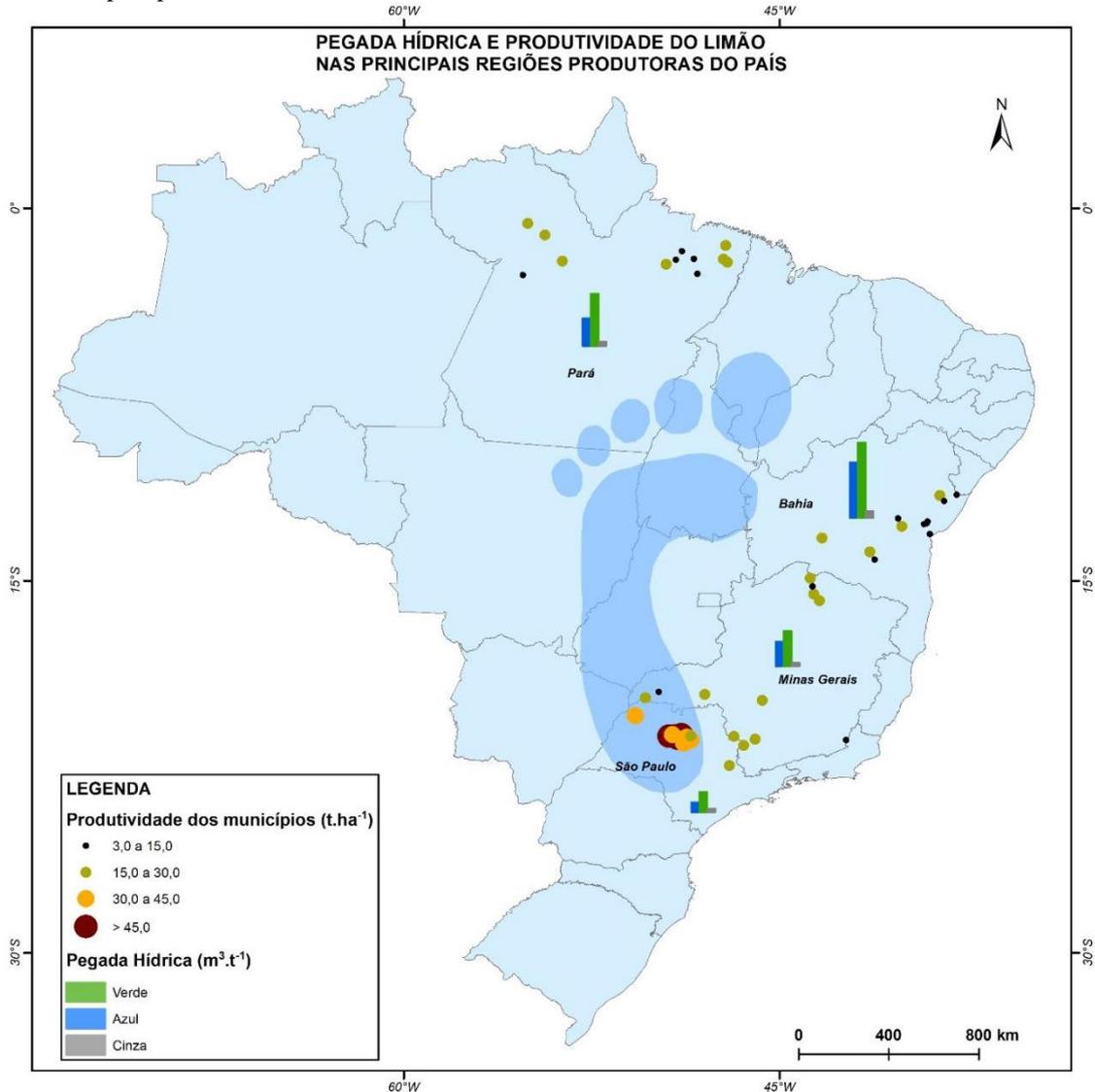


Fonte: Do autor.

A variação média das demandas evapotranspirométricas para cultura do limão tahiti nos estados de São Paulo, Pará, Bahia e Minas Gerais estão expressos na figura 11, (a), (b), (c) e (d), respectivamente. Observa-se que no estado de São Paulo existe o menor déficit hídrico anual acumulado ($2429 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) quando comparado aos demais, logo existe menor dependência de reposição de água para os cultivos. No Pará e em Minas Gerais existem respectivamente 8 e 9 meses em que a oferta pluvial não atende plenamente a demanda hídrica da cultura do limão, entretanto quando se analisa o déficit acumulado os valores estão próximos (respectivamente 3483 e $3364 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$). No estado da Bahia, identificou-se um cenário mais crítico em relação às ofertas pluviais, fazendo com que todos os meses do ano tenham ofertas aquém da necessidade da cultura com déficit acumulado de até $5028 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, demonstrando que a produção neste estado é mais dependente de reposição de água por irrigação, podendo contribuir para maiores pegadas hídricas da componente azul. É importante

ressaltar que o monitoramento da sazonalidade da oferta hídrica pluvial é uma importante ferramenta para gestão dos recursos hídricos, pois os momentos de maiores déficits na agricultura, com forte dependência de reposição de água, geram concorrência com o a pecuária e com os centros urbanos (ANA, 2019b).

Figura 12 – Componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica do limão tahiti em 4 estados e produtividade em 48 municípios produtores.



Fonte: Do autor.

O estado de São Paulo é a grande referência mundial do setor citrícola, ele possui instituições de referência, que se dedicam exclusivamente ao desenvolvimento da citricultura, combinando atividades de pesquisa e transferência de tecnologias em favor da promoção de práticas para melhoria da produtividade, qualidade e longevidade dos pomares (FUNDECITROS, 2021). Isso corrobora com os resultados deste estudo, visto que, somente neste estado foram observadas produtividades superiores a 30 t.ha⁻¹, resultando por consequência nas menores pegadas hídricas em todas a componentes avaliadas (figura 12 e 13).

Em Irapuã e Pindorama encontramos os maiores destaques, onde as PH's totais de 230 e 250 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ respectivamente, estiveram associadas as maiores produtividades (61,54 e 51,74 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ respectivamente). Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Munro et al. (2016), entretanto a baixa disponibilidade hídrica da região do estudo supracitado (média anual de 404mm) contribuiu para uma elevada representatividade da PH azul (50%), sugerindo que em SP a produção de limão é mais sustentável em relação ao uso da água azul (29%) (tabela 10). Neste sentido, são necessários esforços no sentido de diminuir esta componente de PH, pois certas bacias hidrográficas podem exceder sua capacidade produtiva gerando insustentabilidade (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2020).

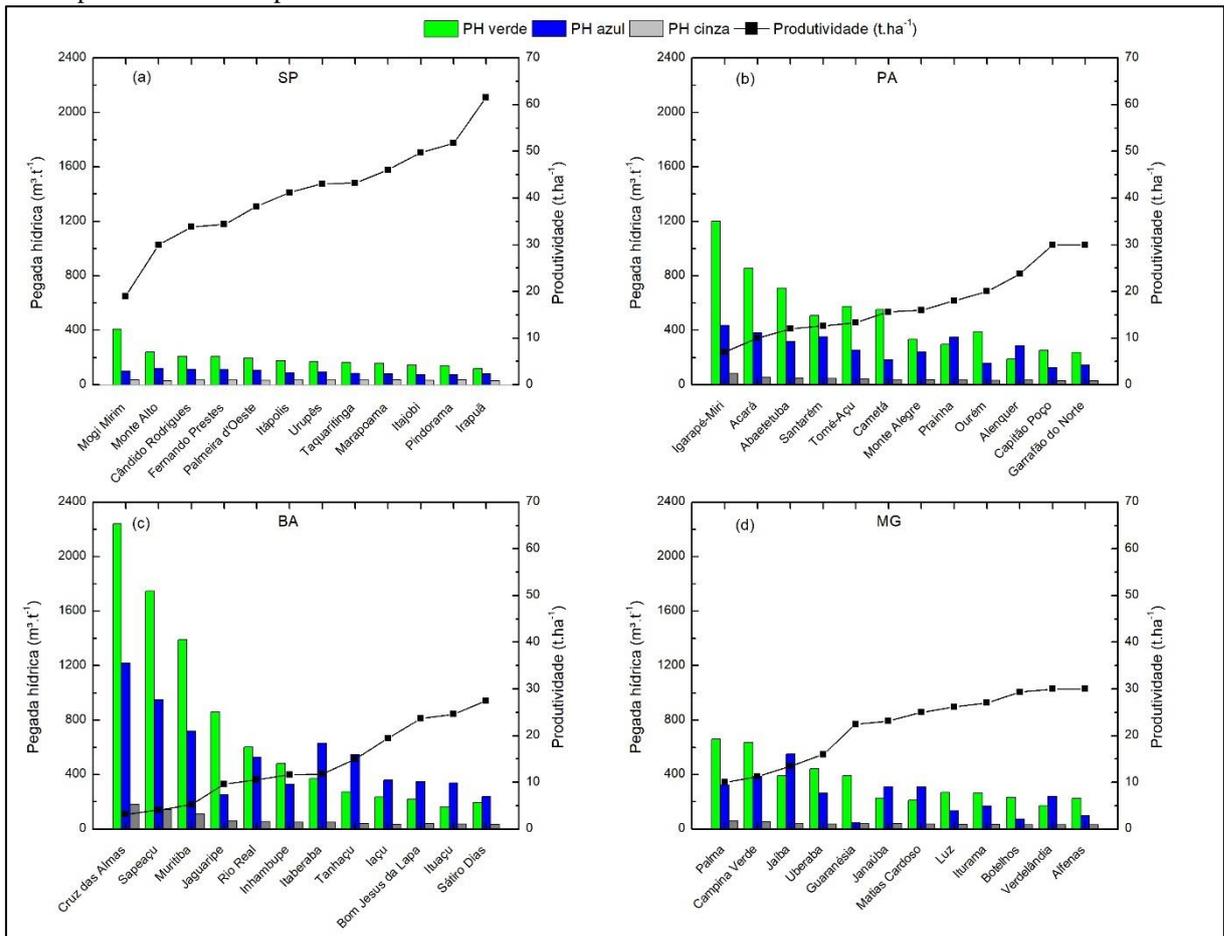
De maneira geral, SP além de ter uma componente azul com baixa representatividade, também tem as componentes verdes e cinza abaixo da média global (tabelada 11). Para componente cinza, foi possível observar a nível nacional, que mesmo com a maior taxa de aplicação de fertilizantes nitrogenados do estado de SP (média de 143,6 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), foram registrados os menores valores absolutos de PH cinza (35 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Na Argentina, a taxa média de aplicação de fertilizantes foi superior à média paulista em mais de 100 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, entretanto isso não foi o suficiente para fazer com que eles obtivessem maiores produtividades, sugerindo que outras tecnologias produtivas tornam a produção em São Paulo mais eficiente (FERRERO et al., 2022).

No estado de Minas Gerais, poucos municípios estão na menor faixa de produtividade e apesar desse não possuir municípios com grande destaque, ele tem performances produtivas satisfatórias, quando comparadas aos resultados na região norte e nordeste. Em MG a PH total variou de 339,4 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ em Botelhos a 1044,2 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ em Palma (figura 13), demonstrando ampla variabilidade entre o municípios avaliados. Apesar disso, os valores médios da estratificação da pegada hídrica no estado estiveram próximos das médias globais (MEKONNEM; HOEKSTRA; 2011).

No estado da Bahia a eficiência no uso da água na cadeia produtiva do limão tahiti tem os piores resultados deste estudo, sendo que todas as componentes da PH foram significativamente superiores. Esses resultados têm explicação tanto por condições climáticas severas, quanto por baixas produtividades em grande parte dos municípios produtores (66,6% na faixa mínima de produtividade). As menores produtividades deste estudo foram encontradas em Cruz das Almas e Sapeaçu (3,18 e 4,08 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); neles a PH total foi de 3642 e 2838 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente, e estes valores são elevados a nível global e podem estar associados a insustentabilidade caso não sejam tomadas as devidas medidas. Neste estado também encontramos a menor precipitação média anual (870 mm) para os municípios avaliados,

entretanto observamos extremos de 1497 mm em Ituaçu e 476 mm em Iaçú (tabela 08). Embora a oferta pluvial seja muito superior no primeiro caso podemos observar a sensibilidade da PH ao associar o uso da água a produtividade, pois mesmo com uma oferta de chuvas três vezes menor o município de Iaçú obteve uma PH total apenas cerca de 15% superior. Esses resultados evidenciam a estreita relação entre a PH e a produtividade (figura 13), que também foi constatada em outros estudos (BAZRAFSHANA et al., 2019; FERRERO et al., 2022).

Figura 13 – Variabilidade da produtividade e das componentes da pegada hídrica verde, azul e cinza para 48 municípios em 4 estados produtores de limão tahiti.



Fonte: Do autor.

O cenário mais restritivo de ofertas pluviiais da maioria dos municípios baianos avaliados denota a necessidade de atenção especial, principalmente pelas elevadas PH azuis. Estudos recentes revelam, pois, que cerca de 59% das PH's desta componentes na produção de citros são insustentáveis a nível global, visto que elas se somam a outros usos consultivos e tendem a superar a vazão de água azul em muitas bacias hidrográficas (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2020).

Dentre as áreas avaliadas, o estado do Pará tem as maiores médias de oferta pluvial, porém não apresentou bons resultados em relação a eficiência da PH, principalmente por possuir vários municípios com baixíssima produtividade (figura 12). Esse fato torna-se especialmente relevante em ambientes sensíveis a mudanças no uso da terra como a Amazônia, pois a crescente rentabilidade econômica da cultura pode favorecer a expansão dos cultivos sobre áreas de floresta, podendo implicar em impactos relativos a poluição e ao uso da água no futuro (MIGUEL AYALA et al., 2016). Por exemplo, a expansão agrícola ocorrida entre 2000

e 2015 levou a condições sob as quais a escassez de água verde criou a condição de “ameaça” a produção, enquanto os recursos de água azul permaneceram dentro de limites sustentáveis, evidenciando a importância das políticas de uso da terra para reduzir ainda mais o desmatamento como um fator de intensificação da produção agrícola no nível de bacia hidrográfica na Amazônia (LATHUILLIÈRE et al., 2018).

Apesar de haver abundância relativa de água verde e azul na Amazônia, estudos identificaram dinâmicas complexas na região, onde o prolongamento atípico de períodos mais secos têm provocado importantes variações sazonais que limitam a evapotranspiração (LATHUILLIÈRE; COE; JOHNSON, 2016). Entre os anos de 2010 e 2015, a redução de 26% na precipitação induziu reduções semelhantes na disponibilidade de água azul e verde (CAVIGLIA-HARRIS et al., 2021). Isso sugere que variações climáticas na Amazônia acrescentam desafios adicionais à expansão agrícola na medida em que podem levar bacias hidrográficas a limites insustentáveis no futuro. Por isso, Lathuillière et al. (2018) destacam a importância de se compreender o papel de reservatórios artificiais e da irrigação para o abastecimento regional de águas subterrâneas, e para a reciclagem de umidade em grande escala no balanço hídrico atmosférico.

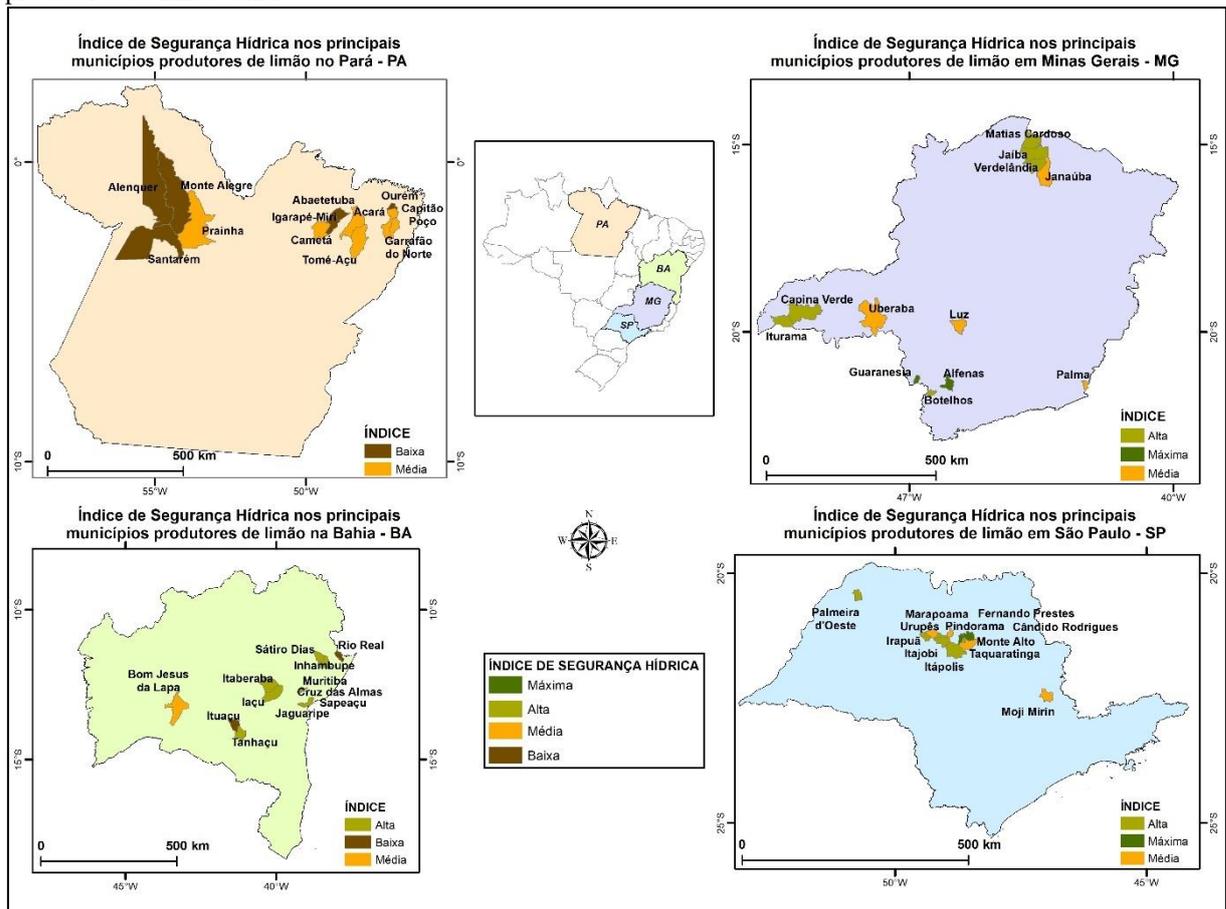
As baixas médias de produtividade encontradas no PA foram influenciadas pelo elevado número de municípios pouco eficientes, entretanto em Capitão Poço e Garrafão do Norte observou-se valores de PH reduzidos que estão associadas a produtividades elevadas, estando próximos aos melhores resultados encontrados a nível nacional e internacional, como na Argentina, África do Sul e Chile (tabela 11). Apesar disso, nos municípios paraenses citados acima as ofertas pluviais são mais elevadas, ocasionando uma importante parcela de contribuição da PH verde (61,9% e 57,4% respectivamente) no processo produtivo, sendo semelhantes aos resultados encontrados por Ferrero et al. (2022), mas divergentes aos encontrados por Munro et al. (2016) e Novoa et al. (2019), onde a PH azul tem maior representatividade durante a produção.

Outro importante aspecto da produção de citros nos municípios de Capitão Poço e Garrafão do Norte é representarem mais de 56% da produção do estado, e estarem inseridos na Região Nordeste paraense, a mais antropizada do PA. Logo existem extensas áreas de uso consolidado que favorecem a expansão da citricultura sobre áreas não florestadas (Cordeiro et al., 2017). Esta informação ganha relevância ao constatarmos que a área produzida com limão na região Norte foi ampliada em mais de 420%, no período compreendido entre 2001 e 2017, enquanto que nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste houve redução de áreas.

Para que houvesse uma abordagem mais abrangente sobre a sustentabilidade da produção do limão nas regiões estudadas, adicionou-se o ISH-U às discussões, pois é um importante indicador. Ele avalia como as dimensões humanas, econômicas, ecossistêmicas e de resiliência interagem com a capacidade produtiva dos mananciais e com a eficiência de distribuição de água para garantir o abastecimento das populações.

Desta maneira, plotou-se a geoespacialização do ISH-U (figura 14) e se identificou que do total de municípios avaliados, 52,8% têm ISH-U com grau máximo e alto. Eles correspondem a 44% da produção total de limão do período avaliado (569316 toneladas), evidenciando que parcela significativa da cadeia produtiva oferece pequenas contribuições para gerar riscos associados ao abastecimento das populações.

Figura 14 – Índice de segurança hídrica do abastecimento urbano (ISH-U) para 48 municípios em 4 estados produtores de limão tahiti.



Fonte: Do autor.

Observou-se, além disso, que nem um dos 48 municípios do estudo tem o grau mínimo de segurança hídrica e que o grau máximo de segurança foi encontrado somente em 4 municípios, dois em São Paulo (Fernando Prestes e Monte Alto) e dois em Minas Gerais (Alfenas e Guaranesia). Essas localidades também representam as mais elevadas

sustentabilidades de nosso estudo, pois incorporam os graus máximos de ISH-U a baixas pegadas hídricas. Na tabela 10, reuniu-se informações que permitem a observação clara de que os elevados ISH-U estão associados a mananciais de alta eficiência do sistema produtor e de distribuição de água, e que as baixas PH estão relacionadas a altas produtividades. Na tabela 11 é possível comparar estes resultados a outros estudos realizados a nível mundial.

Contraditoriamente, identificou-se que o Pará, mesmo com ampla oferta de águas verdes e azuis, com mais de 83% de mananciais sem qualquer tipo de vulnerabilidade, é o único estado que não contém municípios com elevados graus de ISH-U, sendo que todos eles têm classificações médias ou baixas (figura 14 e tabela 10). Isso está relacionado principalmente ao baixo investimento nos sistemas de distribuição de água (75% dos municípios avaliados na região com eficiência mínima). Logo, garantir a sustentabilidade da produção de limão na região demanda investimentos públicos e privados, transcendendo a adoção de tecnologias inerentes à produção.

Nos municípios baianos, apesar da menor oferta hídrica pluvial, verificou-se 75% dos municípios classificados com alto índice de segurança hídrica, pois ao longo dos anos, muitos investimentos em infraestrutura foram direcionados para corrigir problemas históricos de abastecimento e distribuição de água (75% dos mananciais com classificação alta para eficiência do sistema de distribuição), sendo que a região Nordeste foi a que mais recebeu intervenções em diversas regiões identificadas como críticas no Programa Nacional de Segurança Hídrica do governo federal (ANA, 2019 citar PNSH). Assim, infere-se que os investimentos governamentais em infraestrutura, aliados ao desenvolvimento tecnológico apropriado à situação específica de cada região, pode ser capaz de garantir a elevação das produtividades na agricultura, oferecendo o mínimo de risco ao meio ambiente (PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000).

Tabela 10 – Pegada hídrica total e distribuição percentual das componentes verde, azul e cinza por municípios, além dos índices de segurança hídrica, eficiência da distribuição de água, tipo de captação e perdas de superfície de água.

(continua)

Município	UF	PH total (unidade)	PH verde (%)	PH azul (%)	PH cinza (%)	Produtividade (T/ha)	TAQ nitrogenado (kg/ha)	ISH-U	ISH - quantitativo manancial	Eficiência da Distribuição de Água	Tipo de manancial	Perdas e ganhos relativos de superfície de água (%)
Irapuã	SP	230,7	51,9	35,4	12,7	61,5	181	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	subterrânea	-29.5
Pindorama	SP	249,8	56,0	30,0	14,0	51,7	181	média	não vulnerável com ampliação do sistema	média	subterrânea	22.2
Itajobi	SP	256,0	57,4	29,9	12,8	49,7	162.5	alta	não vulnerável com sistema satisfatório	média	subterrânea	-25.0
Marapoama	SP	276,3	57,4	29,9	12,8	46,1	162.5	alta	não vulnerável com sistema satisfatório	média	subterrânea	63.6
Taquaritinga	SP	286,2	57,9	29,0	13,1	43,2	162.5	média	não vulnerável com ampliação do sistema	média	superficial/ subterrânea	-48.8
Urupês	SP	301,8	56,6	30,9	12,5	43,1	162.5	média	não vulnerável com ampliação do sistema	média	subterrânea	-45.5
Itápolis	SP	306,7	57,7	29,4	12,9	41,2	162.5	alta	não vulnerável com sistema satisfatório	média	subterrânea	-59.7
Palmeira d'Oeste	SP	338,2	58,5	31,5	10,0	38,2	129.1	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	superficial/ subterrânea	-71.8
Fernando Prestes	SP	356,3	58,3	31,1	10,6	34,3	129.1	máxima	não vulnerável com sistema satisfatório	alta	subterrânea	-56.3
Cândido Rodrigues	SP	362,2	58,3	31,1	10,6	33,8	129.1	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	subterrânea	-66.7
Monte Alto	SP	393,0	60,9	31,2	7,9	30,0	93.3	máxima	não vulnerável com sistema satisfatório	alta	subterrânea	-62.8
Mogi Mirim	SP	544,9	75,2	18,2	6,6	19,0	68.3	média	baixa vulnerabilidade	média	superficial	-13.9

(continuação)

Município	UF	PH total (unidade)	PH verde (%)	PH azul (%)	PH cinza (%)	Produtividade (T/ha)	TAQ nitrogenado (kg/ha)	ISH-U	ISH - quantitativo manancial	Eficiência da Distribuição de Água	Tipo de manancial	Perdas e ganhos relativos de superfície de água (%)
Capitão Poço	PA	410,1	61,9	30,5	7,6	30,0	93,3	média	não vulnerável com sistema satisfatório	mínima	subterrânea	16,0
Garrafão do Norte	PA	414,7	57,4	35,1	7,5	30,0	93,3	média	não vulnerável com adequação do sistema	mínima	subterrânea	7,2
Alenquer	PA	515,6	36,6	55,8	7,6	23,8	93,3	baixa	baixa vulnerabilidade	mínima	subterrânea	74,6
Ourém	PA	583,0	67,0	27,1	5,9	20,0	68,3	baixa	não vulnerável com ampliação do sistema	mínima	subterrânea	-8,7
Prainha	PA	683,9	43,5	51,0	5,5	18,0	68,3	média	não vulnerável com adequação do sistema	baixa	subterrânea	25,7
Monte Alegre	PA	609,9	54,9	39,1	6,0	16,0	58,3	baixa	baixa vulnerabilidade	mínima	subterrânea	-0,6
Cametá	PA	772,5	71,4	23,8	4,8	15,7	58,3	média	não vulnerável com ampliação do sistema	média	subterrânea	-17,1
Tomé-Açu	PA	876,3	65,8	29,2	5,0	13,3	58,3	média	não vulnerável com ampliação do sistema	baixa	subterrânea	29,1
Santarém	PA	906,3	56,1	38,8	5,1	12,6	58,3	baixa	não vulnerável com ampliação do sistema	mínima	subterrânea	-2,1
Abaetetuba	PA	1075,8	65,9	29,6	4,5	12,0	58,3	baixa	não vulnerável com ampliação do sistema	mínima	subterrânea	26,3
Acará	PA	1295,7	66,0	29,5	4,5	10,0	58,3	média	não vulnerável com adequação do sistema	mínima	subterrânea	-4,5
Igarapé-Miri	PA	1721,0	69,8	25,3	4,8	7,0	58,3	baixa	não vulnerável com ampliação do sistema	mínima	superficial	0,5

(continuação)

Município	UF	PH total (unidade)	PH verde (%)	PH azul (%)	PH cinza (%)	Produtividade (T/ha)	TAQ nitrogenado (kg/ha)	ISH-U	ISH - quantitativo manancial	Eficiência da Distribuição de Água	Tipo de manancial	Perdas e ganhos relativos de superfície de água (%)
Sátiro Dias	BA	467,5	41,8	50,9	7,3	27,5	93.3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	subterrânea	50.0
Ituaçu	BA	538,9	30,5	62,5	7,0	24,6	93.3	baixa	alta vulnerabilidade	média	superficial	-62.9
Bom Jesus da Lapa	BA	606,6	36,0	57,5	6,5	23,7	93.3	média	não vulnerável com ampliação do sistema	média	superficial	-35.4
Iaçu	BA	631,5	37,4	57,0	5,6	19,4	68.3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	superficial	-62.4
Tanhaçu	BA	859,5	31,8	63,6	4,5	15,0	58.3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	superficial/ subterrânea	-20.8
Itaberaba	BA	1050,1	35,2	60,0	4,7	11,8	58.3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	superficial	-68.8
Inhambupe	BA	857,3	56,0	38,2	5,8	11,7	58.3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	subterrânea	-33.3
Rio Real	BA	1182,3	50,8	44,5	4,7	10,6	58.3	baixa	alta vulnerabilidade	média	superficial/ subterrânea	-64.2
Jaguaripe	BA	1169,4	73,4	21,4	5,2	9,6	58.3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	superficial/ subterrânea	-39.2
Muritiba	BA	2216,6	62,6	32,4	5,0	5,2	58.3	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	superficial	-37.0
Sapeaçu	BA	2837,9	61,5	33,4	5,0	4,1	58.3	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	superficial	0.0
Cruz das Almas	BA	3642,0	61,5	33,4	5,0	3,2	58.3	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	superficial	77.8

(conclusão)

Município	UF	PH total (unidade)	PH verde (%)	PH azul (%)	PH cinza (%)	Produtividade (T/ha)	TAQ nitrogenado (kg/ha)	ISH-U	ISH - quantitativo manancial	Eficiência da Distribuição de Água	Tipo de manancial	Perdas e ganhos relativos de superfície de água (%)
Verdelândia	MG	442,3	38,7	54,3	7,0	30,0	93,3	alta	baixa vulnerabilidade	média	superficial	-88,1
Alfenas	MG	353,1	63,4	27,8	8,8	30,0	93,3	máxima	baixa vulnerabilidade	alta	superficial/ subterrânea	-25,1
Botelhos	MG	339,4	68,8	21,9	9,4	29,3	93,3	alta	baixa vulnerabilidade	alta	superficial	-50,2
Iturama	MG	468,4	56,4	36,2	7,4	27,0	93,3	alta	não vulnerável com sistema satisfatório	baixa	superficial	-6,1
Luz	MG	438,5	61,2	30,7	8,1	26,2	93,3	média	baixa vulnerabilidade	média	superficial/ subterrânea	-37,7
Matias Cardoso	MG	557,8	37,8	55,6	6,7	25,0	93,3	alta	não vulnerável com ampliação do sistema	alta	superficial	-45,4
Janaúba	MG	578,0	39,2	53,8	7,0	23,1	93,3	média	baixa vulnerabilidade	alta	superficial	-53,1
Guaranésia	MG	478,4	81,9	9,4	8,7	22,5	93,3	máxima	não vulnerável com sistema satisfatório	alta	superficial	14,5
Uberaba	MG	742,3	59,6	35,5	4,9	16,0	58,3	média	não vulnerável com ampliação do sistema	média	superficial/ subterrânea	-11,2
Jaíba	MG	986,4	39,8	55,8	4,4	13,4	58,3	alta	não vulnerável com sistema satisfatório	média	superficial	-68,6
Campina Verde	MG	1075,7	59,2	36,0	4,8	11,3	58,3	alta	não vulnerável com sistema satisfatório	média	superficial/ subterrânea	-45,8
Palma	MG	1044,2	63,3	31,1	5,6	10,0	58,3	média	não vulnerável com sistema satisfatório	alta	superficial/ subterrânea	-43,3

Fonte: Do autor.

Tabela 11 – Comparações da PH do limão obtida por diferentes autores.

Autores	Este trabalho	Este trabalho	Este trabalho	Este trabalho	Ferrero et al. (2022)	Mekonnen e Hoekstra (2011)	Munro et al. (2016)	Novoa et al. (2019)	Bazrafshan et al. (2019)
Produção	limão	limão	limão	limão	limão	Limão e limas	Limão	citros	citros
Local	São Paulo (Brasil)	Pará (Brasil)	Bahia (Brasil)	Minas Gerais (Brasil)	Tucumán (Argentina)	Média Global	Lower Sundays River Valley (África do sul)	Cachapoal River Middle Basin (Chile)	Iran
Precipitação média anual (mm)	1504	2142	870	1345	1153	-	404	854	195
Produtividade média (t.ha ⁻¹)	40,1	17,36	13,86	21,99	32,9	-	52	28,2	11,12
Uso médio fertilizante nitrogenado	143,6	68,7	67,9	81,6	253,2	-	310	-	-
PH verde (m ³ .t ⁻¹)	195 (60%)	509 (62%)	731 (55%)	344 (55%)	234 (69%)	432 (67%)	62 (28%)	23 (7%)	130 (9%)
PH azul (m ³ .t ⁻¹)	94 (29%)	269 (33%)	537 (40%)	242 (39%)	30 (8%)	152 (24%)	113 (50%)	205 (66%)	1110 (78%)
PH cinza (m ³ .t ⁻¹)	35 (11%)	44 (5%)	70 (5%)	39 (6%)	82 (23%)	58 (9%)	50 (22%)	82 (26%)	180 (13%)
PH total (m ³ .t ⁻¹)	325	822	1338	625	346	642	225	310	1420

Fonte: Do autor.

Em última análise, comparou-se o tipo de captação do sistema produtor de água (superficial, subterrâneo ou misto) de todos os municípios avaliados para entender como as alterações na superfície de água em nosso país, numa escala temporal de 35 anos, podem afetar a cadeia produtiva do limão (PROJETO MAPBIOMAS, 2021a; ANA, 2019).

Nas informações destacadas na tabela 10, pode-se notar que a maior parte dos municípios avaliados (54,16%) tem abastecimento urbano com captação do tipo superficial ou misto. Em Minas Gerais, todos as localidades avaliadas têm este tipo de captação e na Bahia apenas um município tem captação subterrânea. Esses resultados se tornam relevantes quando comparados às informações de redução na superfície de água, onde observou-se que dos 26 municípios os quais têm abastecimento com captação superficial, 23 sofreram reduções na superfície de água, variando de 0,6% a 88,1%, no período de 1985 a 2021. Esses dados sugerem que estas mudanças podem ocasionar riscos tanto à cadeia de produção do limão, quanto ao abastecimento urbano como um todo, pois ambos concorrem pela oferta de água em suas respectivas bacias hidrográficas.

Neste estudo, os municípios localizados na região Sudeste reuniram os melhores resultados de sustentabilidade hídrica. Entretanto em SP e MG, respectivamente 83,3% e 91,6% dos municípios experimentaram reduções na superfície de água ao longo de 35 anos de avaliação. Em SP, este cenário é relevante, mas observamos que 11 dos 12 municípios avaliados possuem sistema de captação subterrâneo, logo estas variações tendem a interferir de maneira menos significativa no abastecimento urbano. Contrariamente, no estado de MG todos os municípios têm captação superficial ou mista, sugerindo que as reduções na superfície de água podem contribuir, para que a região caminhe na direção de cenários de insustentabilidade hídrica, principalmente associados a eventos extremos climáticos como o ocorrido nos anos de 1999 e 2015, onde respectivamente e 50% e 70% do território nacional foram afetados (NDEHEDEHE et al., 2020).

Estas observações são especialmente importantes, tanto pela representatividade da região Sudeste frente ao cenário produtivo da citricultura, quanto pela alta densidade populacional. Podem, assim, indicar a necessidade de incorporação do uso de tecnologias de imagens de satélite para avaliar o balanço hídrico climatológico em uma escala temporal mais longa, contribuindo para mensurar a magnitude dos danos associados a variações no conteúdo de águas superficiais de maneira mais assertiva.

Na Bahia, identificou-se também vários municípios com redução superficial de água, reduzindo nossa percepção de sustentabilidade hídrica na região, pois foi neste estado que residiram os piores resultados de PH, sugerindo um cenário produtivo bastante crítico.

No estado do Pará esta abordagem foi relevante de maneira inversa ao encontrado nas demais regiões, pois foi observado aumento de superfície hídrica na maioria dos municípios avaliados, agregando sustentabilidade à região, neste quesito, principalmente porque mais de 90% deles têm sistema de captação do tipo subterrâneo.

3.4 Conclusão

A análise da pegada hídrica dos principais centros produtores de limão do Brasil nos permitiu identificar que a produtividade é o principal fator limitante para o uso eficiente da água, estando diretamente ligada a maior sustentabilidade hídrica da produção, sendo necessário, em especial os estados da Bahia e do Pará avançarem neste quesito.

Além disso, identificou-se que o estado de São Paulo é um exemplo a ser seguido na cadeia produtiva dos citros, pois ele combinou alta eficiência produtiva e baixas PH's á elevados ISH-U, comparando-se aos melhores resultados encontrados a nível global.

Nesta avaliação, o estado do Pará merece atenção especial, em primeiro momento pelo potencial produtivo ocioso na maioria dos municípios avaliados, principalmente, em função da grande disponibilidade de água, bem como pela sensibilidade da região na qual está inserida frente às alterações no uso da terra, e consequentes mudanças no ciclo hidrológico.

A pegada hídrica foi capaz de monitorar o impacto da apropriação humana sobre os recursos hídricos e a analisá-la em conjunto com o ISH-U, permitindo um direcionamento mais claro rumo a sustentabilidade.

Apesar de resultados indicarem que a maioria dos municípios produtores de limão têm relativa segurança hídrica é preciso monitorar cuidadosamente as variações no conteúdo água superficial, pois grande parte dos municípios avaliados está sujeito a drásticas alterações.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS -ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. Brasília,DF: ANA, 2019. 100 p. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/acervo/livros/conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-2019-informe-anual>. Acesso em 20 fev. 2022.

ALLAN, J. A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. **Ground Water**, Guelph, v. 36, n. 4, p. 545–546, jul./ago. 1998. Disponível em: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>. Acesso em 20 de mar. 2022.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56).

ALVES JÚNIOR, J.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C. R.; SILVA, T. J. A.; EVANGELISTA, A. E. P. Response of young ‘tahiti’ lime trees to different irrigation levels. **Engenharia Agrícola**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 303-304, mar./abr. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/q9QbCmJdGpcBrBqJdnpCmSG/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 14 de dez. 2021.

AYALA, L.M.; EUPEN, M.V.; ZHANG, G.; PEREZ-SOBA, M.; MARTORANO, L.G.; LISBOA, L.S.; BELTRAO, N.E. Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, v.569-570, p.1159-1173. 2016.

BARBOZA JUNIOR, C. R. A.; FOLEGATTI, M. V.; ROCHA, F. J.; ATARASSI, R. T. Coeficiente de cultura da lima-ácida tahiti no outono-inverno determinado por lisimetria de pesagem em Piracicaba – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 691-698, out./nov. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/hWCPFtmWzMbsCYqtzGBw78P/?lang=pt>. Acesso em: 10 de jan. 2022.

BAZRAFSHANA, O.; ZAMANIB, H.; ETEDALIC, H. R.; DEHGHANPIRA, S. Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 344–351, mai. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423819301517>. Acesso em: 05 de fev. 2022.

CAVIGLIA-HARRIS, J. *et al.* The color of water: The contributions of green and blue water to agricultural productivity in the Western Brazilian Amazon. **World Development**, v. 146, p. 105607, out. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X21002229>.

COSTA, D. C. **Pegada hídrica como indicador de sustentabilidade ambiental em sistemas de produção agrícola na Amazônia**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/13460/COSTA_Douglas_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em 20 de fev. 2021.

FERRERO, L. M. Machin ; ARAUJO, P. Z.; VALDEON, D. H.; HUN, A. L. N.; MELE, F. D. Water footprint of lemon production in Argentina. **Science of the Total Environment**, v. 816, 2022. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721066900>. Acesso em 04 de junho de 2022.

FOLEY, J. A. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature10452>. Acesso em 15 de maio de 2022.

GALLI, A.; WIEDMANN, T.; ERCIN, E.; KNOBLAUCH, D. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 100–112, mai. 2012.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X11001889?via%3Dihub>.

Acesso em: 10 de dez. 2021.

HOEKSTRA, A. Y; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M.

Manual de avaliação da pegada hídrica. Tradução Solução Supernova. Network : Water Footprint, 2011. 216 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil**. 2021. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101854>.

Acesso em: 26 de set.2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. **Produção agrícola**.

2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa>. Acesso em 20 de maio de 2019.

LATHUILLIÈRE, M. *et al.* Evaluating water use for agricultural intensification in Southern Amazonia using the water footprint sustainability assessment. **Water**, v. 10, n. 4, p. 349, 21 mar. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/349>. Acesso em 20 de maio de 2022.

LATHUILLIÈRE, M. J.; COE, M. T.; JOHNSON, M. S. A review of green- and blue-water resources and their trade-offs for future agricultural production in the Amazon Basin: what could irrigated agriculture mean for Amazonia? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 6, p. 2179–2194, 7 jun. 2016. Disponível em:

<https://hess.copernicus.org/articles/20/2179/2016/>. Acesso em 02 de maio de 2022.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Sustainability of the blue water footprint of crops. **Advances in Water Resources**, v. 143, n. June, p. 103679, set. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170820300221>. Acesso em 03 de maio de 2022.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 5, p. 1577–1600, mai. 2011. Disponível em: <https://waterfootprint.org/media/downloads/Mekonnen-Hoekstra-2011-WaterFootprintCrops.pdf>. Acesso em 17 de dez. 2021.

MUNRO, S. A.; FRASER, G. C. G.; SNOWBALL, J. D.; PAHLOW, M. Water footprint assessment of citrus production in South Africa: A case study of the Lower Sundays River Valley. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 668–678, 2016. Disponível em:

<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163310022>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

NDEHEDEHE, C. E.; AGUTU, N.O.; FERREIRA, V. G.; GETIRANA, A.; OKWUASHI, O. Hydrological hotspots of climatic influence in Brazil: A two-step regularization approach.

Atmospheric Research, v. 246, n. 1, dez. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809520302052>. Acesso em: 28 de jun. 2022.

NOVOA, V.; AHUMADA-RUDOLPH, R. ROJAS, O.; SÁEZ, K.; BARRERA, F.; ARUMÍ, J. L. Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile. **Science of The Total Environment**, v. 670, p. 188–199, jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971931109X>. Acesso em 04 de junho de 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA - FAO. **Produção de limão e limas**. Produção de laranjas. 2017. Disponível em: www.fao.org/faostat/en/#data/QC. Acesso em 30 de jun. 2019.

PROJETO MAPBIOMAS. **A dinâmica da superfície de água do território brasileiro**.

2021a. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/MapBiomias_Água_Agosto_2021_22082021_OK_v2.pdf.

Acesso em 20 de set. de 2021.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 6.0 da série anual de mapas de uso e cobertura da**

terra do Brasil. 2021b. Disponível em: <https://mapbiomas.org/infograficos-1>. Acesso em: 24 de set. 2020.

REES, W.; WACKERNAGEL, M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 16, n. 4–6, p. 223–248, jul. 1996. Disponível em:

<http://www.zo.utexas.edu/courses/thoc/Cities1997.pdf>. Acesso em: 17 de nov. 2021.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**.

2001. 139 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASSELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, p.113 - 122, 2004.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, 64, 327-338, 2000.

WACKERNAGEL, M.; MONFREDA, C.; ERB, H.; HABERL, H.; SCHULZ, N. B.

Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961-1999: Comparing the conventional approach to an “actual land area” approach. **Land Use Policy**, v. 21, n. 3, p. 261–269, jul. 2004. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837703000875>. Acesso em: 16 de dez. 2021.

ZHANG, L. H.; CHEN, Y. N.; ZHAO, R. F.; LI, W. H. Quantitative assessment of agricultural sustainability reveals divergent priorities among nations. **One Earth**, v. 4, n. 9, p. 1262–1277, set. 2021. Disponível em: [https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(21\)00473-](https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(21)00473-)

5?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2590332221004735%3Fshowall%3Dtrue. Acesso em: 04 julho de 2022.

CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL

4.1 Resultados chaves: Impactos e Implicações

Esta pesquisa interdisciplinar forneceu informações relevantes que permitiram importantes avanços no entendimento da variação sazonal do particionamento de energia e da Evapotranspiração da cultura do limão a nível regional. Nossos resultados demonstraram que na região do estudo existe uma diferença menos marcante entre o particionamento da energia em comparação a outras regiões, sugerindo mais homogeneidade dos fluxos de energia ao longo do ano, onde em média 61,5% da energia é utilizada no processo de evapotranspiração, 33% é destinada para o aquecimento do ar e 5,5% para o aquecimento do solo.

O método do balanço de energia obtido por razão de Bowen estimou satisfatoriamente o consumo hídrico da cultura e pode representar uma importante ferramenta para realização de pesquisas futuras em diferentes arranjos espaciais em pomares na região, oportunizando importantes avanços do conhecimento. O consumo médio mensal de 100mm com incremento de 20% no período menos chuvoso, evidencia o papel da abundância de chuvas na região, bem como a capacidade de armazenamento nos solos e ressalta as particularidades da produção em ambientes amazônicos, onde o saldo de radiação solar foi o fator mais importante mesmo em períodos de menor oferta pluvial.

Os coeficientes de cultivo encontrados para limão tahiti neste estudo sofrem variação sazonal ao longo do ano e são específicos para a região e para a geometria espacial onde o experimento foi conduzido, mas fornecem uma importante ferramenta para ajustar os protocolos de irrigação, contribuindo para racionalizar o uso dos recursos hídricos e consequentemente possibilitando melhores rendimentos econômicos aos produtores.

De maneira geral, nossos resultados de coeficientes de cultivo foram superiores aos encontrados na literatura científica atual e podem representar importantes ajustes para os cálculos de contabilização do uso da água ao longo da cadeia produtiva e isso pode contribuir para o correto dimensionamento da extensão dos impactos inerentes a expansão acelerada das áreas de cultivo que vem ocorrendo na região.

Nós também realizamos uma importante abordagem sobre aspectos de sustentabilidade da produção de limão nas principais regiões produtoras do país. O indicador PH se demonstrou uma ferramenta sutil ao correlacionar o uso da água a produtividade, evidenciando que a abundância relativa deste recurso não necessariamente resulta em sustentabilidade.

Nosso estudo foi pioneiro ao avaliar a Pegada Hídrica (PH) em conjunto com o Índice de Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano (ISH-U) para aprimorar nosso entendimento na direção da sustentabilidade na cadeia produtiva de uma importante cultura a nível nacional.

Por meio desta análise foi possível identificar que a adoção de tecnologias produtivas eficientes permitiu que o estado de São Paulo obtivesse os melhores resultados deste estudo, tornando-se uma referência na eficiência do uso da água. Estes resultados são especialmente importantes por ocasião de fornecer parâmetros produtivos e de sustentabilidade que podem apontar direções a serem seguidas para uma utilização mais consciente deste importante recurso.

Em estados como Minas Gerais e Bahia, apesar de termos encontrado elevados ISH-U, também observamos reduções drásticas de superfície de água que nos colocam em alerta, pois tanto a cadeia produtiva de alimentos, quanto o abastecimento urbano pode caminhar rumo a insustentabilidade. Isto demonstra que as avaliações de sustentabilidade precisam ser constantemente reavaliadas e lançar mão de técnicas e tecnologias robustas que possam garantir segurança efetiva ao abastecimento das populações.

4.2 Prioridades para Pesquisas futuras

Notadamente esta pesquisa demonstrou robustez do método da Razão de Bowen em estimar a variação sazonal das demandas evapotranspirométricas da cultura do limão, entretanto nossos resultados são específicos para a região do estudo e para o arranjo espacial do plantio da área experimental. Por isso, esforços devem ser direcionados para determinar estes parâmetros em diferentes geometrias de plantio, visto que elas têm ampla variabilidade na região.

Ainda existe uma grande diversidade de manejos produtivos a serem monitorados no polo da citricultura do nordeste paraense nos demais regiões produtoras do estado e somente o preenchimento dessas lacunas no conhecimento fornecerão uma boa dimensão dos impactos relacionados a expansão da atividade.

Nossos resultados da variação sazonal das taxas evapotranspiratórias são importantes em pesquisas futuras com testes de diferentes lâminas a serem aplicadas a partir da ETc, podendo fornecer importantes ajustes que permitam aumento da rentabilidade econômica dos cultivos.

Ademais, podemos destacar que apesar de nossos resultados terem fornecido importantes avanços na compreensão da PH na região, ainda existem muitas etapas da cadeia produtiva que ainda não foram consideradas, pois o limão é um produto de exportação para

outros estados e para diversos países como Portugal, Alemanha, Espanha, Reino Unido e Holanda.

Também existe a necessidade de ajustes regionais para o fator de lixiviação (10%) comumente utilizado para os cálculos da PH cinza, pois este fator é generalista e muito provavelmente subestima a contaminação ambiental em regiões de altas pluviosidades.

4.3 Considerações Finais

Esta pesquisa preencheu uma lacuna do conhecimento que contribui de maneira significativa para o manejo de uma cultura de importância econômica, social e ambiental e que está em acelerado processo de expansão no estado do Pará, impulsionados pelas crescentes rentabilidades econômicas ocasionadas pela abertura de mercados dentro e fora do país.

Por isso, nossos resultados ganham relevância na medida em que podem ocasionar mais racionalidade no uso da água, oportunizando melhores rendimentos ao produtor, tanto pela possibilidade de melhorar a produtividade, quanto pelo potencial de economia de água.

Em relação a Pegada Hídrica, esta pesquisa forneceu avanços pioneiros no sentido de quantificar o tamanho da apropriação humana sobre este recurso durante a produção de limão. Entretanto este foi apenas o primeiro passo em direção a uma cadeia produtiva dos citros realmente sustentável, pois muitas etapas relativas à colheita, lavagem, beneficiamento e transporte ainda precisam ser contabilizadas, visto que a grande maioria da produção nacional é exportada para outros estados e para diversos países.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ -ADEPARÁ. **Agricultura é responsável por quase 40% da economia do Pará.** Belém, 2017. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/artigos/agricultura-%C3%A9-respons%C3%A1vel-por-quase-40-da-economia-do-par%C3%A1>. Acesso em: 26 de set. 2021.
- ADEPARÁ. AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ - **Controle das pragas quarentenárias dos citros.** 2019. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/artigos/agricultura-%C3%A9-respons%C3%A1vel-por-quase-40-da-economia-do-par%C3%A1>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.
- ALLAN, J. A. Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. **Ground Water**, Guelph, v. 36, n. 4, p. 545–546, jul./ago. 1998. Disponível em: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>. Acesso em 20 de mar. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS -ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual.** Brasília: ANA, 2019. 100 p. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/acervo/livros/conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-2019-informe-anual>. Acesso em 20 fev. 2022.
- ATLAS DE IRRIGAÇÃO. **Uso da água na agricultura irrigada.** 2 ed. Brasília,DF: ANA, 2021. 130 p. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>. Acesso em 20 de set. de 2021.
- AYRES, J.; SALA, I.; MIRANDA, M. P.; WULFF, N.; BASSANEZI, R. B.; LOPES, S. A. **Manejo do Greening. 10 mandamentos para o sucesso do controle da doença.** 2018. 64 p. Disponível em: https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual_detalhes/manejo-do-greening/64. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- BARROS, J. R. M.; BARROS, A. L. M.; CYPRIANO, M. P. **O mercado da citricultura no Brasil e as suas novas perspectivas.** 2016. 34 p. Disponível em: http://www.citrusbr.com/download/biblioteca/CitrusBR_Livro_Concecitrus_2016.pdf. Acesso em 10 de julho de 2019.
- BASTOS, D. C.; PASSOS, O. S.; TAÍDE, E. M.; SÁ, J. F.; GIRARD, E. A.; AZEVEDO, C. L. L. **Cultivo de citros no semiárido brasileiro.** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2015. 30 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 266). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1038255/cultivo-de-citros-no-semiarido-brasileiro>. Acesso em: 10 de jan. 2021.
- BAZRAFSHANA, O.; ZAMANIB, H.; ETEDALIC, H. R.; DEHGHANPIRA, S. Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 344–351, mai. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423819301517>. Acesso em: 05 de fev. 2022.

BORDALO, C. A. O paradoxo da água na região das águas: o caso da Amazônia brasileira. **Geosp – Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 120-137, abril. 2017. Disponível em: https://redib.org/Record/oai_articulo2513611-o-paradoxo-da-%C3%A1gua-na-regi%C3%A3o-das-%C3%A1guas-o-caso-da-amaz%C3%B4nia-brasileira. Acesso em 20 jan. 2021.

BRASIL. **Decreto nº 6.514**, de 22 de julho de 2008. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 23 julho 2008. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6514.htm. Acesso em 20 de agosto de 2021.

BREMER NETO, H. B.; MOURÃO FILHO, F. A. A.; STUCHI, E. S.; ESPINOZA-NUNEZ, E.; CANTUARIAS-AVILÉS, T. The horticultural performance of five ‘Tahiti’ lime selections grafted onto ‘Swingle’ citrumelo under irrigated and non-irrigated conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 150, p. 181-186, fev. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423812004967>. Acesso: 20 de jan. 2021.

COLETA-FILHO, H. D.; TAKITA, M. A.; TARGON, M. L. P. N.; CARLOS, F. E.; MACHADO, M. A. A bactéria *Candidatus Liberibacter* em plantas com Huanglongbing (ex-grenning) no Estado de São Paulo. **Laranja**, Cordeirópolis, SP, v. 25, n. 2, p. 367-374, 2004. Disponível em: https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/22_Coletta_04.pdf. Acesso em: 20 de jan. 2021.

COSTA, D. C. **Pegada hídrica como indicador de sustentabilidade ambiental em sistemas de produção agrícola na Amazônia**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) - Universidade Federal de São Carlos, Campus Araras, Araras, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/13460/COSTA_Douglas_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em 20 de fev. 2021.

FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P.M.L.A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R.I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil’s Amazonian “arc of deforestation”: The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 9, p. 1968–1978, out. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112709005180?via%3Dihub>. Acesso em: 08 de jan., 2021.

FERREIRA, S. C. G.; LIMA, A. M. M.de; CORRÊA, J. A. M. Indicators of hydrological sustainability, governance and water resource regulation in the Moju river basin (PA) – Eastern Amazonia. **Journal of Environmental Management**, v. 263, n. 1, mar. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32174519/>. Acesso em: 02 de abr. de 2022.

FERREIRA, T. S.; RODRIGUES, D. N. B.; GOMES FILHO, R. R. Demanda hídrica de fruteiras utilizando coeficiente de redução da evapotranspiração adequado a região do baixo Jaguaribe no Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, v. 4, n. 4, p. 217–225, 2010. Disponível em: <https://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/55>. Acesso em: 10 de mar. de 2021.

FONSECA, A.; AMORIM, L.; RIBEIRO, J.; FERREIRA, R.; MONTEIRO, A.; SANTOS, B.; SOUZA JR.C.; VERÍSSIMO, A. Sistema de alerta de desmatamento. **Boletim do Desmatamento da Amazônia Legal**. 2021. Disponível em: https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2021/09/SAD_Agosto21.pdf. Acesso em 10 de set. de 2021.

FUNDECITRUS. **Citricultura brasileira é a maior do mundo**. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/especial-publicitario/fundo-de-defesa-da-citricultura/unidos-contr-o-greening/noticia/citricultura-brasileira-e-a-maior-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 10 de junho de 2019.

GALLI, A.; WIEDMANN, T.; ERCIN, E.; KNOBLAUCH, D. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 100–112, mai., 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X11001889?via%3Dihub>. Acesso em: 10 de dez., 2021.

GUERRA, D.; GRAJALES, L. C.; ROJAS, L. R. Effect of irrigation and fertilization on crop yield and fruit quality of the Tahiti lime *Citrus latifolia* Tanaka (Rutaceae). **Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, Caribe, v. 16, n. 1, p. 79-85, jun. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v16n1/v16n1a08.pdf>. Acesso em: 10 de dez. 2020.

HAILAI, D.; HUAISUI, Q.; MINGXIA, L.; YAODONG, D. Changes of citrus climate risk in subtropics of China. **Journal Geography Science**, v. 20, n. 6, p. 818-832, out. 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11442-010-0813-6>. Acesso em: 07 de fev. 2021.

HOEKSTRA, A. Y; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **Manual de avaliação da pegada hídrica**. Tradução Solução Supernova. Network: Water Footprint 2011. 216 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101854>. Acesso em: 26 de set.2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. **Produção agrícola**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa>. Acesso em 20 de maio de 2019.

KOLLER, O. L. (org.) **Citricultura catarinense**. Florianópolis: Epagri, 2013. 319 p.

LAURANCE, W. F.; WILLIAMSON, G. B. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. **Conservation Biology**, v. 15, n. 6, p. 1529–1535, dez. 2001. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3061252>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

- LOPES, J. M. S.; DÉO, T. F. G.; ANDRADE, B. J. M.; GIROTO, M.; FELIPE, A. L. S.; JUNIOR, C. E. I.; BUENO, C. E. M. S.; SILVA, T. F.; LIMA, F. C. C. Importância econômica dos citros no Brasil. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, n. 20, p. 1-3, dez. 2011. Disponível em: http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/RtmuqxyLi4i5jUH_2013-5-17-17-13-31.pdf. Acesso em 20 de mar. 2021.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, São Paulo, SP, v. 22, n. 63, p. 83–96, jan. 2008.
- MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current State-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, SP, v. 21, n. 3., jan. 2006. Disponível em: www.researchgate.net/publication/228647135_On_the_hydrological_cycle_of_the_Amazon_Basin_A_historical_review_and_current_state-of-the-art. Acesso em 02 de jul. 2021.
- MARRAS, S.; ACHENZA, F.; SNYDER, R.L.; DUCE, P.; SPANO, D.; SIRCA, C. Using energy balance data for assessing evapotranspiration and crop coefficients in a Mediterranean vineyard. **Irrigation Science**, v. 34, n. 5, p. 397- 408, mai. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-016-0510-z>. Acesso em 08 de nov. 2021.
- MATTOS, J. B.; SILVA, K. B.; SILVA, R. J.; ALMEIDA, T. H. M.; POVOAS, H. S. S.; SILVA, P. V. R.; GOES, I. M. A.; MATOS, I, S. Natural factors or environmental neglect? Understanding the dilemma of a water crisis in a scenario of water plenty. **Land Use Policy**, v. 82, p. 509–517, mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837718312158>. Acesso em: 07 de nov. 2021.
- MATTOS JUNIOR, D.; NEGRI, J. D.de; FIGUEIRO, J. O.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros: principais informações e recomendações de cultivo**. 2005. Disponível em: http://www.iac.sp.gov.br/imagem_informacoestecnologicas/43.pdf. Acesso em 11 de julho de 2019.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 5, p. 1577–1600, mai. 2011. Disponível em: <https://waterfootprint.org/media/downloads/Mekonnen-Hoekstra-2011-WaterFootprintCrops.pdf>. Acesso em 17 de dez. 2021.
- NDEHEDEHE, C. E.; AGUTU, N.O.; FERREIRA, V. G.; GETIRANA, A.; OKWUASHI, O. Hydrological hotspots of climatic influence in Brazil: a two-step regularization approach. **Atmospheric Research**, v. 246, n. 1, dez. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809520302052>. Acesso em: 28 de jun. 2022.
- NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; MILAN, P.; LOPES, F. F.; CRESSONI, F. KALAKI, R. **O retrato da citricultura brasileira**. 2010. Disponível em: http://www.citrusbr.com/download/biblioteca/Apresentacao_Marcos_Fava_evento_valor.pdf. Acesso em 10 de julho de 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA - FAO. **Produção de limão e limas**. Produção de laranjas. 2017. Disponível em: www.fao.org/faostat/en/#data/QC. Acesso em 30 de jun. 2019.

PARKS, R.; MCLAREN, M.; TOUMI, R.; RIVETT, U. Experiences and Lessons in Managing Water from Cape Town. Grantham Institute Briefing Paper. **Imperial College London**, n. 29, p. 1–18, fev. 2019. Disponível em: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/grantham-institute/public/publications/briefing-papers/Experiences-and-lessons-in-managing-water.pdf>. Acesso em: 10 de fev. 2022.

PROJETO MAPBIOMAS. **A dinâmica da superfície de água do território brasileiro**. 2021a. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/MapBiomias_Água_Agosto_2021_22082021_OK_v2.pdf. Acesso em 20 de set. de 2021.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 6.0 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil**. 2021b. Disponível em: <https://mapbiomas.org/infograficos-1>. Acesso em: 24 de set. 2020.

REES, W.; WACKERNAGEL, M. Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 16, n. 4–6, p. 223–248, jul. 1996. Disponível em: <http://www.zo.utexas.edu/courses/thoc/Cities1997.pdf>. Acesso em: 17 de nov. 2021.

RESENDE, R. S. Aspectos da irrigação em citros. *In*: MELO, M.B. SILVA, L.M.S. (ed.). **Aspectos técnicos dos citros em Sergipe**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. p. 51-60.

ROCHA, N. C. V. Dinâmica do uso e cobertura do solo entre os anos de 2004 e 2014 para o município de Capitão Poço, Pará. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.14, n.26, p.271-281, dez. 2017. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/706>. Acesso em: 28 de set. 2020.

SAATH, K. C. de O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 56, n. 2, p. 195–212, abr/jun. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/DdPXZbMzxby89xBDg3XCTgr/?lang=pt>. Acesso em: 14 de set. 2020.

SILVA, E. C. R.; ALVES, F. B.; SILVA, I. I. S. Agricultura irrigada no contexto amazônico: uma abordagem sistemática do uso da água em uma horticultura no município de Altamira-PA. **Revista Internacional de Ciências** Maracanã, RJ, v. 6, n. 1, p. 29-43, jan./jun. 2016. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/22926>. Acesso em: 07 de jun. 2021.

SILVA, V. de P. R.; ALEIXO, D. 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, PB, v. 17, n. 1, p. 100–105, jan. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/zY8bR8GJXryTDjpbmC4jPXX/abstract/?lang=pt>

Acesso em: em: 17 de set. 2020.

SIMON, J.; ANGELOCCI, L. R. Saldo de radiação em cafeeiros e limeiras: Relações com saldo de radiação de gramado e radiação global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.18, n.12, p.1218–1227, dez. 2014. Disponível: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/MZvkkxBDFdTGdsgLwMwCB6L/?lang=pt>
Acesso em: 17 de set. 2020.

WACKERNAGEL, M.; MONFREDA, C.; ERB, H.; HABERL, H.; SCHULZ, N. B. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961-1999: Comparing the conventional approach to an “actual land area” approach. **Land Use Policy**, v. 21, n. 3, p. 261–269, jul. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837703000875>. Acesso em: 16 de dez. 2021.

ZHAO, J.; PU, F.; LI, Y.; XU, J.; LI, N.; ZHANG, Y.; GUO, J.; PAN, Z. Assessing the combined effects of climatic factors on spring wheat phenophase and grain yield in Inner Mongolia, China. **Plos One**, v. 12, n. 11, p. 1-12, nov. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29099842/>. Acesso em: 20 de fev. 2021.