



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DOUTORADO EM AGRONOMIA

JOÃO VITOR DE NÓVOA PINTO

**PRODUÇÃO DE LIMA ÁCIDA TAHITI ASSOCIADA AO BALANÇO
ENERGÉTICO E HÍDRICO EXPRESSA EM PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E
EFICIÊNCIA ECONÔMICA NO PARÁ**

BELÉM
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DOUTORADO EM AGRONOMIA

JOÃO VITOR DE NÓVOA PINTO

**PRODUÇÃO DE LIMA ÁCIDA TAHITI ASSOCIADA AO BALANÇO
ENERGÉTICO E HÍDRICO EXPRESSA EM PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E
EFICIÊNCIA ECONÔMICA NO PARÁ**

Trabalho apresentado à banca avaliadora do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para a obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Área de concentração: Agronomia

Orientador: Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

Coorientador: Dr. Samuel Ortega-Farias.

BELÉM

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P659p Pinto, João Vitor de Nóvoa
Produção de lima ácida Tahiti associada ao balanço energético e hídrico expressa em produtividade da água e eficiência econômica no Pará / João Vitor de Nóvoa Pinto. - 2022.
90 f. : il. color.
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Samuel Ortega-Farias.
1. citrus irrigado. 2. produção. 3. irrigação. 4. evapotranspiração. 5. uso eficiente da água. I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de, *orient.* II. Título
-

Resumo: O Brasil é o quinto maior produtor mundial de lima ácida “Tahiti”. Entre as espécies cítricas existentes, esta é a que apresenta a segunda maior área cultivada no país, perdendo apenas para a laranja. No estado do Pará a citricultura vem crescendo nos últimos anos, e a lima ácida Tahiti já ocupa 25% da área cultivada com espécies cítricas no estado. Nesta região, a primeira floração ocorre no final de junho e o período de desenvolvimento fenológico dos frutos se estende até meados de novembro. Uma segunda floração ocorre entre outubro e novembro. A colheita é concentrada entre dezembro e abril, quando os frutos atingem a menor cotação no mercado regional. Este trabalho analisa o balanço de energia e radiação e a evapotranspiração sobre um pomar de lima ácida Tahiti durante três anos, bem como a resposta da lima ácida irrigada a quatro diferentes lâminas de irrigação em um experimento em blocos ao acaso nas condições edafoclimáticas da Amazônia Oriental. Foram testadas quatro lâminas de irrigação, denominadas T₁, T₂, T₃ e T₄. A irrigação foi realizada de modo a manter o potencial hídrico do solo dentro das seguintes faixas: abaixo de -50 kPa para T₁, entre -30 e -50 kPa para T₂, entre -10 e -30 kPa para T₃, e acima de -10 kPa para T₄. A resposta da cultura foi monitorada por meio das seguintes variáveis: ocorrência de flores e frutos, produtividade, balanço de energia e trocas gasosas. Foi realizada uma análise de eficiência econômica e de uso da água, utilizando-se a receita bruta e a receita líquida da cultura, e razões entre produtividade de frutos ou receita bruta e a água aplicada ou consumida pela cultura. Os resultados indicam que o albedo da superfície foi de 0,13 e a evapotranspiração média durante os dois anos de experimento foi de 3,2 mm dia⁻¹, com um coeficiente de cultura (K_c) variando de 0,74 a 0,84. A irrigação causou uma antecipação do início do período de colheita e um aumento na produtividade total acumulada na safra 2020-2021 até fevereiro, que passou de 2,22 em T₁ para 6,89 kg planta⁻¹ em T₄. Nos meses subsequentes, a produtividade dos tratamentos se igualou, estabilizando entre 6,01 e 8,95 kg planta⁻¹. O estresse hídrico induziu uma segunda floração em meados de outubro nas plantas que receberam a menor lâmina de irrigação, o que prolongou o período de colheita neste tratamento. As diferentes lâminas de irrigação influenciaram o peso fresco dos frutos colhidos, que foi maior no tratamento com maior lâmina de irrigação. Nas condições do estudo, não houve viabilidade econômica em nenhuma das lâminas testadas, devido à baixa produtividade obtida. Verificou-se que o aumento da lâmina de irrigação reduziu a razão entre a receita bruta obtida e o volume de água aplicada, e houve redução na razão entre a produtividade obtida e a água aplicada.

Palavras-chave: citrus irrigado, produção, irrigação, evapotranspiração, uso eficiente da água.

Abstract: Brazil is the fifth largest producer of “Tahiti” acid lime in the world. Among the existing citrus species, this one has the second largest cultivated area in the country, second only to orange. In the state of Pará, citriculture has been growing in recent years, and Tahiti acid lime already occupies 25% of the area cultivated with citrus species in the state. In this region, the first flowering occurs at the end of June and the period of phenological development of the fruits extends until mid-November. A second flowering occurs between October and November. The harvest is concentrated between December and April, when the fruits reach the lowest price in the regional market. This research analyzes the energy and radiation balance and the evapotranspiration of a Tahiti acid lime orchard for three years, as well as the response of irrigated acid lime to four different irrigation depths in a randomized block experiment under the edaphoclimatic conditions of the Eastern Amazon. Four irrigation depths, named T₁, T₂, T₃ and T₄, were tested. Irrigation was carried out to maintain the soil water potential within the following ranges: below -50 kPa for T₁, between -30 and -50 kPa for T₂, between -10 and -30 kPa for T₃, and above from -10 kPa for T₄. The crop response was monitored through the following variables: occurrence of flowers and fruits, productivity, energy balance and gas exchange. An analysis of economic efficiency and water use was carried out, using the gross revenue and the net revenue of the crop, and ratios between fruit productivity or gross revenue and the water applied or consumed by the crop. The results indicate that the surface albedo was 0.13 and the mean evapotranspiration during the two years of the experiment was 3.2 mm day⁻¹, with a crop coefficient (K_c) ranging from 0.74 to 0.84. Irrigation caused an anticipation of the beginning of the harvest period and an increase in the total productivity accumulated in the 2020-2021 harvest until February, which increased from 2.22 in T₁ to 6.89 kg plant⁻¹ in T₄. In the subsequent months, the productivity of the treatments became equal, stabilizing between 6.01 and 8.95 kg plant⁻¹. Water stress induced a second flowering in mid-October in plants that received the lowest irrigation depth, which prolonged the harvest period in this treatment. The different irrigation depths influenced the fresh weight of the harvested fruits, which was higher in the treatment with the highest irrigation depth. Under the conditions of the study, there was no economic viability in any of the treatments tested, due to the low productivity obtained. It was verified that the increase in the irrigation depth reduced the ratio between the gross revenue obtained and the volume of water applied, and there was a reduction in the ratio between the productivity obtained and the water applied.

Keywords: irrigated citrus, yield, irrigation, evapotranspiration, efficient water use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1 — Produção de limas e limões dos estados com maior produção no Brasil e produção somada dos demais estados. Fonte dos dados: IBGE (2020)..... 18
- Figura 1.2 — (A) Histórico de preços da lima ácida Tahiti na CEASA-PA no período de 2015 a meados de 2022. Pontos: valores informados e a linha é a o modelo ajustado da série temporal. (B) Tendência de longo prazo dos preços. (C) Tendência sazonal dos preços ao longo de um ano, em termos relativos ao preço anual médio. 19
- Figura 1.3 — Variação mensal da média diária de temperatura do ar (T , figura A), radiação solar global (R_s , figura B), déficit de pressão de vapor (DPV, figura C), velocidade do vento a 2 m de altura (u_2 , figura D), evapotranspiração de referência (ET_0 , figura E) e variação da precipitação acumulada mensal (Pr , figura F). As figuras compreendem os anos de 2011 a 2022, período em que há disponibilidade de dados meteorológicos na estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no município de Capitão Poço..... 22
- Figura 2.1 — Mapa do experimento e sua localização no território brasileiro. (A) Mapa do Brasil com destaque para o estado do Pará, em azul. (B) Mapa do Estado do Pará e localização do experimento marcada como um ponto preto. (C) Imagem de satélite do local do experimento no mês de agosto de 2020, com ponto indicando o local onde a torre com equipamentos foi instalada. 29
- Figura 2.2 — Condições do tempo no pomar de lima ácida Tahiti durante o experimento. T — temperatura do ar (média diária); R_s — radiação solar global (total diário); DPV — déficit de pressão de vapor (média diária); VV — velocidade do vento (média diária); Pr — precipitação (total diário). 34
- Figura 2.3 — Variação da umidade do solo de setembro de 2020 a setembro de 2021. Os pontos representam medições com tensiômetros e a linha é a umidade do solo simulada por um balanço hídrico. 35
- Figura 2.4 — Média de radiação de ondas curtas incidente ($S \downarrow$), radiação de ondas curtas refletida ($S \uparrow$) e saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) ao longo do dia em cada trimestre. 36
- Figura 2.5 — Variação do albedo por mês de junho de 2019 até setembro de 2021. Os pontos na figura A representam a inclinação da análise de regressão entre $S \uparrow$ e $S \downarrow$ realizada para cada mês..... 37
- Figura 2.6 — Média do fluxo de calor do solo — G ; fluxo de calor sensível — H ; fluxo de calor latente — λE ; e saldo de radiação — R_n , calculados para cada trimestre. DJF — dezembro, janeiro e fevereiro; MAM — março, abril e maio; JJA — junho, julho e agosto; SON — setembro, outubro e novembro. 39

Figura 2.7 — (A) Comparação entre a evapotranspiração real (ET , pontos vermelhos) e a evapotranspiração de referência (ET_0 , linha), e precipitação (colunas) no período de junho de 2019 a março de 2022. (B) Comparação a evapotranspiração real (ET , eixo vertical) e a evapotranspiração de referência (ET_0 , eixo horizontal) no mesmo dia, com linha contínua mostrando a equação ajustada e linha tracejada mostrando a região onde $ET_0 = ET$, no período de agosto de 2020 a janeiro de 2021. (C) Mesmo que (B), só que no período de fevereiro de 2021 a janeiro de 2022. ET_0 : Evapotranspiração de referência; ET : evapotranspiração real da cultura. A evapotranspiração real no período anterior a agosto de 2020 é estimada por meio de regressão múltipla e por isso não foi utilizada no cálculo do K_c	40
Figura 3.1 — Localização da torre micrometeorológica no pomar (ponto preto) e diagrama dos ventos para mostrar a distribuição de frequência da velocidade e direção do vento.....	48
Figura 3.2 — Condições climáticas de junho de 2020 a maio de 2021 e linha do tempo do experimento. O período irrigado é marcado com a cor azul nas figuras A, B, C, D e E. As variáveis apresentadas são: temperatura média, máxima e mínima diária (T , figura A); radiação solar global (R_s , figura B); déficit de pressão de vapor (VPD, figura C); velocidade média do vento (VV, figura D); precipitação (Pr, figura E) e linha do tempo do experimento (figura F), onde: MM — período das medições micrometeorológicas, IRGA — período de medições com o leitor de gases infravermelho, Ir — irrigação, Fr — período de frutificação, Fl — período de floração, Fen — períodos de observações da fenologia, Col — período de colheita dos frutos.....	53
Figura 3.3 — Variação da umidade volumétrica (θ) estimada (figuras A, C, E e G) e potencial matricial (PM) medido (figuras B, D, F e H) obtido com tensiômetros.....	54
Figura 3.4 — Contagem de flores (a) e frutos (b) por árvore para cada tratamento. A região delimitada em azul em torno da linha contínua indica o intervalo entre o 1º quartil e 3º quartil dos dados.	55
Figura 3.5 — Histogramas de frequência para as variáveis número de flores (figuras A, B e C) e número de frutos (figuras D, E e F) utilizando diferentes transformações. Nas figuras A e D se tem a distribuição utilizada no presente trabalho. Nas figuras B e E, uma transformação por raiz quadrada, frequentemente utilizada neste tipo de situação. Nas figuras C e F são apresentados os dados não transformados. O valor de p é referente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, onde $p > 5\%$ indica distribuição normal.	57
Figura 3.6 — Regressão linear entre a produtividade de frutos ($Y - \text{kg planta}^{-1}$) e (A) o potencial matricial do solo medido com tensiômetros, e (B) entre Y e a umidade relativa do solo (θ_{rel}).....	59
Figura 4.1 — Localização da área de estudo.	69

Figura 4.2 — Variação das condições do tempo sobre o plantio de lima ácida Tahiti ao longo do experimento. (A) temperatura do ar, T ; (B) radiação solar global, R_s ; (C) déficit de pressão de vapor, DPV; (D) velocidade do vento, VV; (E) precipitação, Pr.	75
Figura 4.3 — A tendência de longo prazo para o preço do Tahiti Lime nos mercados locais, de acordo com a pesquisa de preços da Companhia Nacional de Abastecimento (2022) (RED) e o preço registrado pelos agricultores locais de julho de 2020 a abril a 2022.....	76
Figura 4.4 — Número de flores e de frutos por tratamento no período de junho de 2020 a maio de 2021.....	77
Figura 4.5 — Relação entre o uso da água e a lâmina de irrigação. (A) CWP_{YA} — razão entre produtividade de frutos e água aplicada; (B) CWP_{RA} — Receita bruta por unidade volumétrica de água utilizada para irrigação	80
Figura I.1 — Um dos tensiômetros instalados no experimento, mostrando uma leitura de tensão de aproximadamente 40 kPa em novembro de 2020.	85
Figura I.2 — (A) Linha de plantio no dia 15 de outubro de 2020. À esquerda, plantas do tratamento T_1 (menos irrigado) e à direita plantas do tratamento T_4 (mais irrigado). (B) Medições de trocas gasosas sendo realizadas com o Analisador de Gases Infravermelho.....	85
Figura I.3 — Planta com folhas enroladas no tratamento T_1 em virtude do estresse hídrico.	86
Figura I.4 — Planta demarcada para acompanhamento de produtividade e fenologia. (A) Marcação realizada no tronco de cada planta. (B) Fita zebraada cercando um conjunto de três plantas.....	86
Figura I.5 — Torre com sensores instalada no experimento.....	87
Figura II.1 — Localização do experimento no Brasil (A), no estado do Pará (B) e imagem de satélite mostrando o plantio onde o experimento foi conduzido em agosto de 2020 (C).	88
Figura II.2 — Croqui do plantio do experimento, com destaque para a área onde foi instalada a torre micrometeorológica e a área onde foi realizada a diferenciação das lâminas de irrigação (em vermelho). As linhas mais grossas indicam a tubulação de irrigação central. As linhas mais finas indicam as linhas de plantio.....	89
Figura II.3 — Destaque para a área onde o experimento com as lâminas de irrigação foi conduzido. B indica “bloco” e T indica o tratamento.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 — Taxa de assimilação de carbono (A), transpiração (E) e condutância estomática (g_s) medida em nas plantas de lima ácida Tahiti em outubro de 2020.....	41
Tabela 3.1 — Principais características de cada tratamento.	49
Tabela 3.2 — Características físicas do solo até 1 m de profundidade e coeficientes da equação de van Genuchten ajustada para cada camada de solo.....	51
Tabela 3.3 — Resultados da análise de fertilidade do solo.....	52
Tabela 3.4 — Média da contagem de flores e frutos por planta para cada tratamento em 7 de novembro de 2020. As letras indicam uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) na contagem transformada de flores entre os tratamentos de acordo com o teste de Tukey. Os números mostrados na tabela são os valores originais, isto é, sem nenhuma transformação.	56
Tabela 3.5 — Produtividade média (Y), peso (W), diâmetro (D) e comprimento (L) dos frutos colhidos nos diferentes tratamentos. Y_1 é a média do peso total de frutos colhidos por árvore de junho de 2020 a fevereiro de 2021, e Y_2 é a média do peso total de frutos colhidos de março a maio de 2021. W , D e L são referentes aos frutos colhidos de junho a fevereiro do ano seguinte. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	57
Tabela 3.6 — Média da taxa de assimilação de carbono (A), transpiração (E) e condutância estomática (g_s) e seu respectivo desvio padrão medido para cada tratamento em 15 de outubro de 2020. Letras diferentes após o número indicam diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos.....	58
Tabela 3.7 — Todos os coeficientes de regressão e seus respectivos intervalos de confiança, bem como o coeficiente de determinação (R^2) calculado para cada regressão. ¹ Variável resposta. ² Variável explicativa.	59
Tabela 4.1 — Resultados da análise de fertilidade do solo.....	70
Tabela 4.2 — Lâmina total de irrigação, consumo de energia e custo total da energia utilizada com irrigação nos quatro tratamentos.	71
Tabela 4.3 — Componentes dos custos de produção de lima ácida com o manejo adotado no experimento, para o período de 1 ano. A fertilização mineral não foi realizada este ano, mas os custos relacionados à fertilização são mostrados no orçamento fornecido pela empresa.....	72
Tabela 4.4 — Depreciação do sistema de irrigação e do maquinário utilizado.	72
Tabela 4.5 — Custo total de produção, média e desvio padrão da receita bruta, receita líquida e produtividade total para os quatro tratamentos.	78

Tabela 4.6 — Peso médio (W), diâmetro (L) e comprimento (L) dos frutos produzidos entre junho de 2020 e fevereiro de 2021.....	78
Tabela 4.7 — Coeficientes ajustados para as curvas apresentadas na Figura 4.5. Valores entre colchetes representam o desvio padrão para o coeficiente ajustado.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BREB	balanço de energia/razão de Bowen
CEASA	Centrais de Abastecimento
COE	custo operacional efetivo
COT	custo operacional total
CWP	produtividade da água da cultura
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

LISTA DE SÍMBOLOS

A	taxa de assimilação de carbono
CWP_{YA}	produtividade da água da cultura calculada como produtividade total dividida por água aplicada.
CWP_{RA}	produtividade da água da cultura calculada como receita bruta total dividida por água aplicada.
CWP_{YC}	produtividade da água da cultura calculada como produtividade total dividida por água consumida.
h	tensão matricial do solo
α	albedo
T	temperatura do ar
RH	umidade relativa
Pr	precipitação
R_s	radiação solar global
β	razão de Bowen
λ	calor latente de vaporização
λE	fluxo de calor latente
H	fluxo de calor sensível
G	fluxo de calor no solo
E	taxa de transpiração
e_a	pressão parcial do vapor
ET_0	evapotranspiração de referência
g_s	condutância estomática
K_c	coeficiente de cultura
DPV	déficit de pressão de vapor
DPV_A	déficit de pressão de vapor do ar

DPV_L	déficit de pressão de vapor da folha
S_{\downarrow}	radiação de onda curta incidente
S_{\uparrow}	radiação de onda curta refletida
R_{ns}	saldo de radiação de onda curta
R_{nl}	saldo de radiação de onda longa
R_n	saldo de radiação
θ	umidade do solo
θ_{fc}	umidade do solo na capacidade de campo
θ_r	umidade residual do solo quando submetido a uma alta tensão
θ_{wp}	umidade do solo no ponto de murcha permanente
θ_{rel}	umidade relativa do solo
Y	produtividade total acumulada da cultura

SUMÁRIO

1.	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.1.	Filogenia e classificação dos citrus.....	15
1.2.	Floração e formação dos frutos.....	16
1.3.	Produção de limas ácidas no Brasil e no Mundo.....	17
1.4.	Dificuldades na pesquisa com cítricos.....	19
1.5.	Necessidades hídricas da lima ácida Tahiti.....	20
1.6.	Condições climáticas na região do estudo.....	21
1.7.	Objetivos.....	23
1.8.	Referências.....	24
2.	BALANÇO DE RADIAÇÃO E PARTIÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR LATENTE E SENSÍVEL EM UM PLANTIO DE LIMAS ÁCIDA TAHITI IRRIGADO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	27
2.1.	Introdução.....	28
2.2.	Material e métodos.....	29
2.3.	Resultados e discussão.....	33
2.3.1.	Albedo.....	37
2.3.2.	Fluxos de calor sensível e latente.....	38
2.4.	Conclusão.....	42
2.5.	Referências.....	42
3.	RESPOSTA DE PRODUTIVIDADE DE FRUTOS, FENOLOGIA E TROCAS GASOSAS DA LIMA ÁCIDA TAHITI EM DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	45
3.1.	Introdução.....	46
3.2.	Material e métodos.....	47
3.2.1.	Irrigação.....	49
3.2.2.	Produção de frutos e floração.....	50

3.2.3.	Medições micrometeorológicas.....	50
3.2.4.	Umidade do solo.....	50
3.2.5.	Fertilidade do solo	51
3.2.6.	Medições de trocas gasosas	52
3.2.7.	Análises estatísticas	52
3.3.	Resultados	52
3.3.1.	Floração e desenvolvimento dos frutos	55
3.3.2.	Produtividade de frutos	57
3.3.3.	Resposta fisiológica.....	58
3.3.4.	Relações entre produtividade, umidade do solo, potencial matricial, e trocas gasosas 59	
3.3.5.	Relações entre produtividade, massa de frutos e parâmetros de trocas gasosas	60
3.4.	Discussão	60
3.5.	Conclusões.....	62
3.6.	Referências	62
4.	EFICIÊNCIA ECONÔMICA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA LIMA ÁCIDA TAHITI NA AMAZÔNIA ORIENTAL	66
4.1.	Introdução	67
4.2.	Material e métodos	68
4.2.1.	Irrigação.....	70
4.2.2.	Produtividade e floração.....	70
4.2.3.	Custos da irrigação	71
4.2.4.	Outros custos de produção	71
4.2.5.	Preços da lima ácida para o produtor	73
4.2.6.	Indicadores de eficiência econômica e uso da água	73
4.3.	Resultados	74
4.3.1.	Condições climáticas	74

4.3.2.	Preço da lima ácida Tahiti para os produtores locais	76
4.3.3.	Crescimento dos frutos, produtividade e floração.....	77
4.3.4.	Uso da água	79
4.4.	Discussão	81
4.5.	Conclusões.....	82
4.6.	Referências.....	82
	ANEXO I – FOTOS DO EXPERIMENTO.....	85
	ANEXO II – CROQUI DO EXPERIMENTO	88

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

As espécies cítricas são de grande importância econômica e social no mundo inteiro. O Brasil figura entre os maiores produtores de citrus no mundo. No território brasileiro, as principais espécies produzidas são a laranja, a lima ácida Tahiti e a tangerina, embora outras espécies cítricas também sejam produzidas. Uma parte significativa da produção brasileira de laranjas é destinada à produção de suco (ROSSI *et al.*, 2020), enquanto a lima ácida Tahiti e a tangerina são normalmente comercializadas *in natura*.

Ao longo desta contextualização pretende-se introduzir o leitor aos principais aspectos da produção de cítricos e abordar os conhecimentos mais relevantes no que tange à importância socioeconômica, demanda hídrica e manejo relacionado à citricultura, de forma que estes conhecimentos sirvam de subsídio às discussões que serão aprofundadas nos demais capítulos.

1.1. FILOGENIA E CLASSIFICAÇÃO DOS CITRUS

Citrus é o nome científico de um gênero botânico pertencente à família Rutaceae, subfamília Aurantioideae (WU *et al.*, 2018). A filogenia das espécies cítricas é complexa e controversa devido ao grande número de casos de hibridização interespecífica, o que resultou em uma série de propostas de classificação taxonômica conflitantes e caóticas (CURK *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2018). Estudos recentes sugerem que as espécies cítricas cultivadas são oriundas da hibridização interespecífica entre quatro espécies básicas: *C. micrantha*, *C. reticulata*, *C. maxima* e *C. medica* (CURK *et al.*, 2016). Os três últimos são popularmente conhecidos como tangerina, toranja e cidra. Algumas das espécies híbridas economicamente mais importantes no gênero *Citrus* são: laranja (*C. sinensis*), limão (*C. limon*) e lima. Entre as limas, são bem conhecidas *C. aurantifolia* — conhecida como lima mexicana — e *C. latifolia* — conhecido como lima ácida Tahiti.

A maioria dos estudos sugere que a lima ácida Tahiti (*C. latifolia*) originou-se da fertilização de um óvulo haploide de um limão (*C. limon*) por um gameta diploide de uma lima comum (*C. aurantifolia*), o qual, por sua vez, originou-se da hibridização entre *C. micrantha* e *C. medica* (CURK *et al.*, 2016). A lima ácida Tahiti é, portanto, uma espécie triploide e não produz sementes, sendo esta uma das características que a diferencia de seus ancestrais *C. aurantifolia* e *C. limon*.

No Brasil, a lima ácida Tahiti é, com frequência, referida como limão. No entanto, como já mencionado, além das diferenças taxonômicas e filogenéticas entre as duas espécies, os frutos são facilmente distinguidos por suas características. Enquanto os frutos de limão (*C. limon*)

têm forma alongada e sementes, as limas são globulares e as limas ácidas Tahiti não possuem sementes.

1.2. FLORAÇÃO E FORMAÇÃO DOS FRUTOS

O processo completo que vai da floração ao amadurecimento dos frutos pode ser dividido em três estádios (BAIN, 1958). O estádio I inicia-se com a floração e é normalmente marcada pela ocorrência de dois períodos de maior abscisão dos órgãos reprodutores. A primeira abscisão ocorre após a emissão floral, e a segunda é a abscisão dos frutos, que ocorre ao final do estádio I (IGLESIAS *et al.*, 2007). Este estádio é marcado por uma intensa divisão celular que se origina nos tecidos dos frutos em crescimento (BAIN, 1958). A duração dos períodos de floração varia entre as espécies. Observações de campo obtidas ao longo do presente estudo sugerem aproximadamente duas semanas para a lima ácida Tahiti.

Os frutos que permanecem na planta após a abscisão que marca o final do estádio I passam por um período de expansão que dura alguns meses, com duração variando entre as diferentes espécies. Ao final desse período, os frutos apresentam características semelhantes aos frutos que serão colhidos, porém menores. Na lima ácida Tahiti, a maioria das frutas mudará sua forma de oval para globular ao longo deste estádio. No estádio III ocorre o amadurecimento dos frutos. O estádio III é caracterizada pelo crescimento lento dos frutos e por um processo não climatérico (IGLESIAS *et al.*, 2007, p. 335).

A floração em espécies cítricas geralmente é estimulada por certos estresses, e sua intensidade é proporcional à intensidade do estresse (GARMENDIA *et al.*, 2019). Períodos de baixa temperatura do ar (SOUTHWICK; DAVENPORT, 1986) e déficit hídrico (KOSHITA; TAKARAHA, 2004) são fatores conhecidos por induzir o florescimento em *Citrus* spp. Na Tailândia há uma prática muito utilizada no cultivo de limas mexicanas (*C. aurantifolia*), que consiste no plantio em recipientes de concreto, que podem ser cobertos durante as chuvas, proporcionando maior controle sobre o período de floração (ISSARAKRAISILAA, 2018).

É relatado que o estresse salino moderado também pode induzir a floração e beneficiar a cultura. Tal prática poderia substituir a indução floral causada pelo frio ou por déficit hídrico em regiões que não possuem características climáticas adequadas para a indução (SYVERTSEN; GARCIA-SANCHEZ, 2014).

1.3. PRODUÇÃO DE LIMAS ÁCIDAS NO BRASIL E NO MUNDO

Segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2021), o Brasil é o 5º maior produtor de limas e limões do mundo, atrás de Índia, México, China e Argentina.

No Brasil, as principais espécies cítricas produzidas são a laranja (*C. sinensis*), a lima ácida Tahiti (*C. latifolia*) e a tangerina (*C. reticulata*). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mantém um levantamento da produção e área plantada para essas espécies, mas a lima ácida Tahiti é registrado genericamente como “limão”, portanto os valores exatos da produção brasileira de lima ácida Tahiti são desconhecidos. Nesta seção, o termo genérico “limão” será utilizado da mesma forma que é utilizado nas pesquisas do IBGE.

Segundo dados do último levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), em 2019, quase 699 mil hectares da área cultivada foram destinados ao cultivo de espécies cítricas no Brasil. A laranja é a espécie mais cultivada e tem a maior produção total, com 17 milhões de toneladas de frutas colhidas em 2019. O “limão” ocupa 8% da área total cultivada entre as espécies cítricas pesquisadas, e a tangerina ocupa 7,5% da área cultivada com essas espécies.

No Brasil, a produção de espécies cítricas, incluindo o “limão”, concentra-se no estado de São Paulo. São Paulo é responsável por 76% da produção do país e 74% dos “limões” produzidos. O Pará é o segundo maior produtor de “limões”, seguido por Minas Gerais, Bahia e Rio de Janeiro (Figura 1.1).

Na Região Norte do Brasil, o “limão” compreende 25% da área cultivada com citros. O estado do Pará é o maior produtor da Região Norte. Este estado é responsável por 74% da área citrícola e 84% da produção citrícola desta região. Em relação apenas ao “limão”, o estado do Pará é responsável por 76% da área cultivada e 87% da produção da Região Norte.

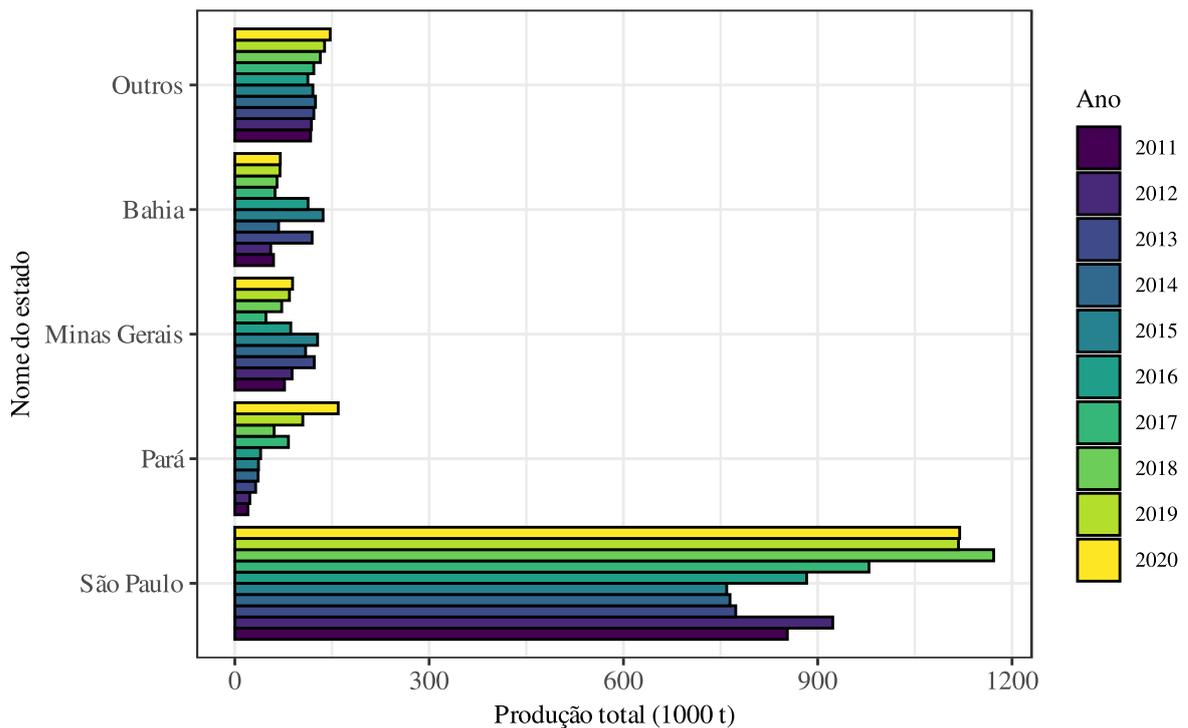


Figura 1.1 — Produção de limas e limões dos estados com maior produção no Brasil e produção somada dos demais estados. Fonte dos dados: IBGE (2020).

O IBGE (2022) indica que a produção de “limão” variou de 3.165 kg ha^{-1} a $36.559 \text{ kg ha}^{-1}$ entre os estados brasileiros — uma diferença bastante significativa. O estado do Pará tem produtividade média de $19.645 \text{ kg ha}^{-1}$. No Pará, a colheita dos frutos da lima ácida Tahiti se concentra entre dezembro e abril, atingindo seu pico nos primeiros meses do ano. Ao longo dos últimos anos, no período de 2015 a 2022, o preço médio da lima ácida Tahiti comercializada na CEASA em Belém do Pará oscilou de R\$ 0,25 a R\$ 4,00 por quilograma de frutos (Figura 1.2A). O período de menor oferta ocorre de setembro a outubro, quando também são registrados os maiores preços de mercado (Figura 1.2C), conforme dados das Centrais de Abastecimento do Pará (CEASA-PA) (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2022). Os menores preços são normalmente registrados entre os meses de fevereiro a maio (Figura 1.2C).

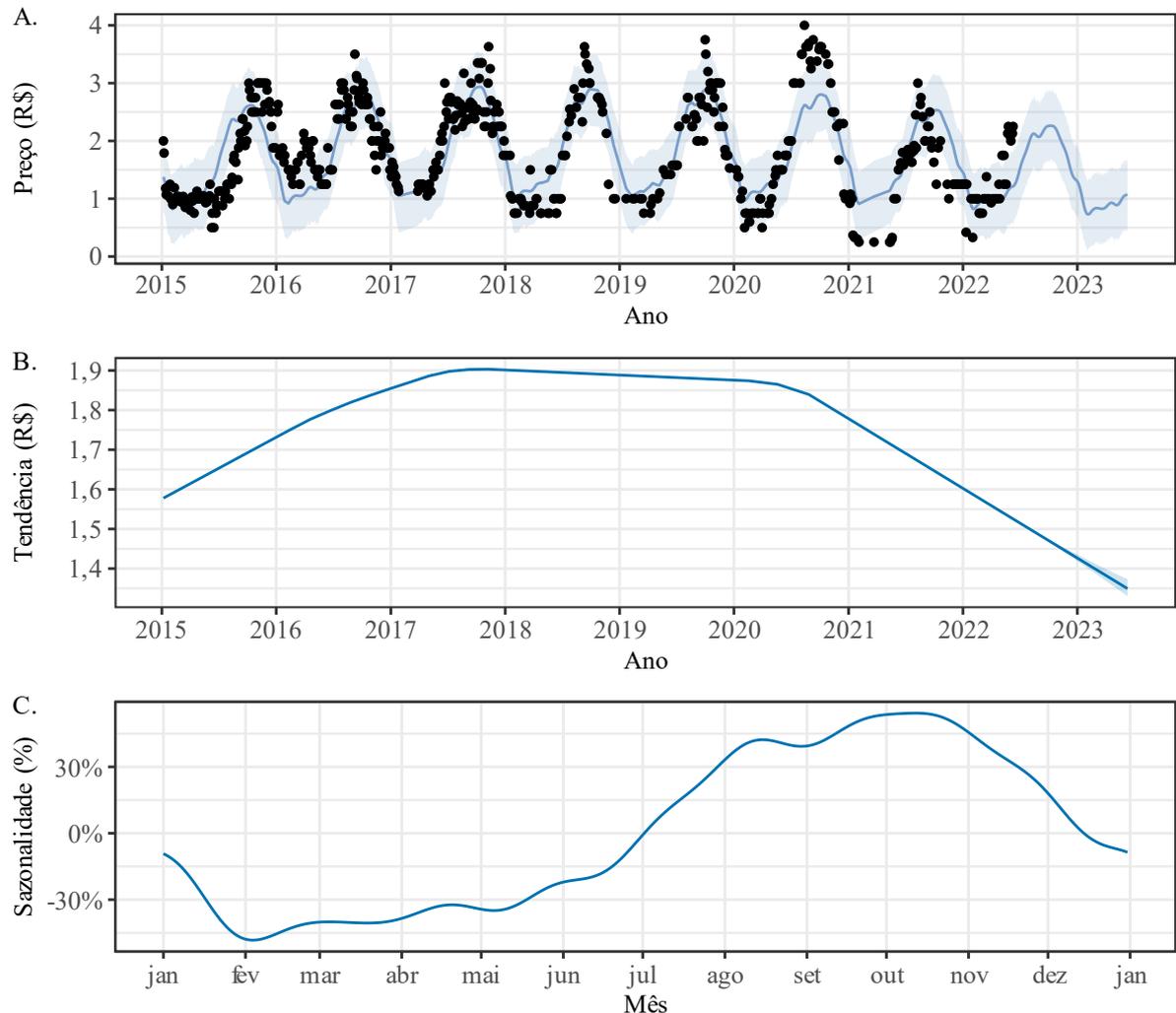


Figura 1.2 — (A) Histórico de preços da lima ácida Tahiti na CEASA-PA no período de 2015 a meados de 2022. Pontos: valores informados e a linha é a o modelo ajustado da série temporal. (B) Tendência de longo prazo dos preços. (C) Tendência sazonal dos preços ao longo de um ano, em termos relativos ao preço anual médio.

A decomposição da série histórica apresentada na Figura 1.2 em um componente de longo prazo (Figura 1.2B) e um componente multiplicativo anual (Figura 1.2C) revela a existência de uma tendência de alta nos preços no período de 2015 a meados de 2017, seguido por um período de estabilização, que durou até meados de 2020, período em que se iniciou a pandemia de coronavírus no Brasil, e depois um declínio que dura até a atualidade (Figura 1.2B). O período do final de 2022 ao início de 2023 na Figura 1.2A é uma projeção baseada na tendência observada nos anos anteriores.

1.4. DIFICULDADES NA PESQUISA COM CÍTRICOS

A lima ácida Tahiti é normalmente reproduzida por métodos vegetativos. O porta-enxerto mais utilizado no estado do Pará é o limão-cravo (*C. limonia*). Alguns produtores têm testado o uso de citrumelo Swingle, que é um híbrido produzido a partir do cruzamento de *C. paradisi*

e *Poncirus trifoliata*, e sua utilização como porta-enxerto tem aumentado devido à sua resistência à gomose — uma doença que preocupa a citricultura brasileira. O uso de porta-enxertos implica que muitas características da cultura são influenciadas pelo porta-enxerto escolhido, entre elas:

- a partição de carboidratos em condições de estresse hídrico, e a resistência ao déficit hídrico em laranja Valência (*C. sinensis*) (PEDROSO *et al.*, 2014);
- o desenvolvimento vegetativo, o tamanho da planta e a idade da árvore quando os primeiros frutos foram produzidos em tangerina (*C. reticulata*) (MOURÃO FILHO *et al.*, 2007);
- a qualidade dos frutos (RADDATZ-MOTA *et al.*, 2019), e pode aumentar a suscetibilidade dos frutos à oleocelose (RADDATZ-MOTA *et al.*, 2020);
- a produtividade, causando redução de quase 50% com o uso de citrumelo Swingle em relação ao uso de limão-cravo, conforme constatado em um experimento de 7 anos de duração no estado de São Paulo (CANTUARIAS-AVILÉS *et al.*, 2012).

Fica, portanto, evidente a dificuldade de obtenção de resultados de pesquisa universalmente aplicáveis a qualquer espécie cítrica e práticas de manejo, visto que os resultados obtidos para uma mesma espécie podem diferir significativamente dependendo das escolhas de manejo e porta-enxerto.

1.5. NECESSIDADES HÍDRICAS DA LIMA ÁCIDA TAHITI

Em muitas espécies cítricas, os estômatos são encontrados apenas na superfície abaxial das folhas (LOURKISTI *et al.*, 2021). O coeficiente de cultura (K_c) (ALLEN *et al.*, 1998) relatado na literatura científica para espécies cítricas é geralmente menor que 1. Em experimentos realizados no estado de São Paulo, o K_c encontrado para a lima ácida “Tahiti” foi estimado entre 0,22 e 0,74 (MARIN *et al.*, 2016), sendo que o primeiro valor correspondeu ao período seco e, portanto, pode ser menor do que o coeficiente de cultura máximo, obtido quando a cultura não está sob estresse hídrico. O K_c relatado para laranja (*C. sinensis*) está entre 0,67 e 0,96 (JAMSHIDI *et al.*, 2020).

A baixa evapotranspiração em espécies cítricas pode ser, ao menos em parte, explicada por mecanismos de controle estomático da espécie. Estudos demonstram que plantas de lima ácida Tahiti tendem a fechar seus estômatos em resposta ao ar seco (SILVA *et al.*, 2018; RIBEIRO; MACHADO, 2007), ainda que a planta esteja bem suprida de água. Em consequência disto e de outros fatores, Marin *et al.* (2016) observaram inclusive a redução do coeficiente de

cultura da lima ácida Tahiti em resposta ao aumento da evapotranspiração de referência, em experimento realizado em São Paulo.

Estudos mostram a existência de uma relação entre o porta-enxerto e a resistência da lima ácida Tahiti ao déficit hídrico. O uso de limão-cravo resulta na maior resistência a seca quando comparado a diversos outros porta-enxertos (CANTUARIAS-AVILÉS *et al.*, 2012). Ainda assim, na maioria dos casos, há um aumento significativo na produtividade quando as árvores são irrigadas, independentemente do porta-enxerto utilizado (ESPINOZA-NÚÑEZ *et al.*, 2011).

1.6. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA REGIÃO DO ESTUDO

Tradicionalmente as normais climatológicas de uma região são calculadas a partir de séries de 30 anos de dados, entretanto a estação meteorológica localizada no município não possui uma série tão longa. Por este motivo, são descritas as medições realizadas no período de 2011 a 2022, período em que se dispões de dados.

O município de Capitão Poço, localizado no Nordeste do estado do Pará, na porção oriental da Amazônia Brasileira, possui clima caracterizado como Am pela classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013).

A temperatura média anual é de 27,3 °C com extremos de temperatura de 20,0 °C (mínima) e 37,0 °C (máxima). A temperatura média diária varia entre 23,0 °C (em fevereiro) e pode ser superior a 28,5 °C (em dezembro) (Figura 1.3A).

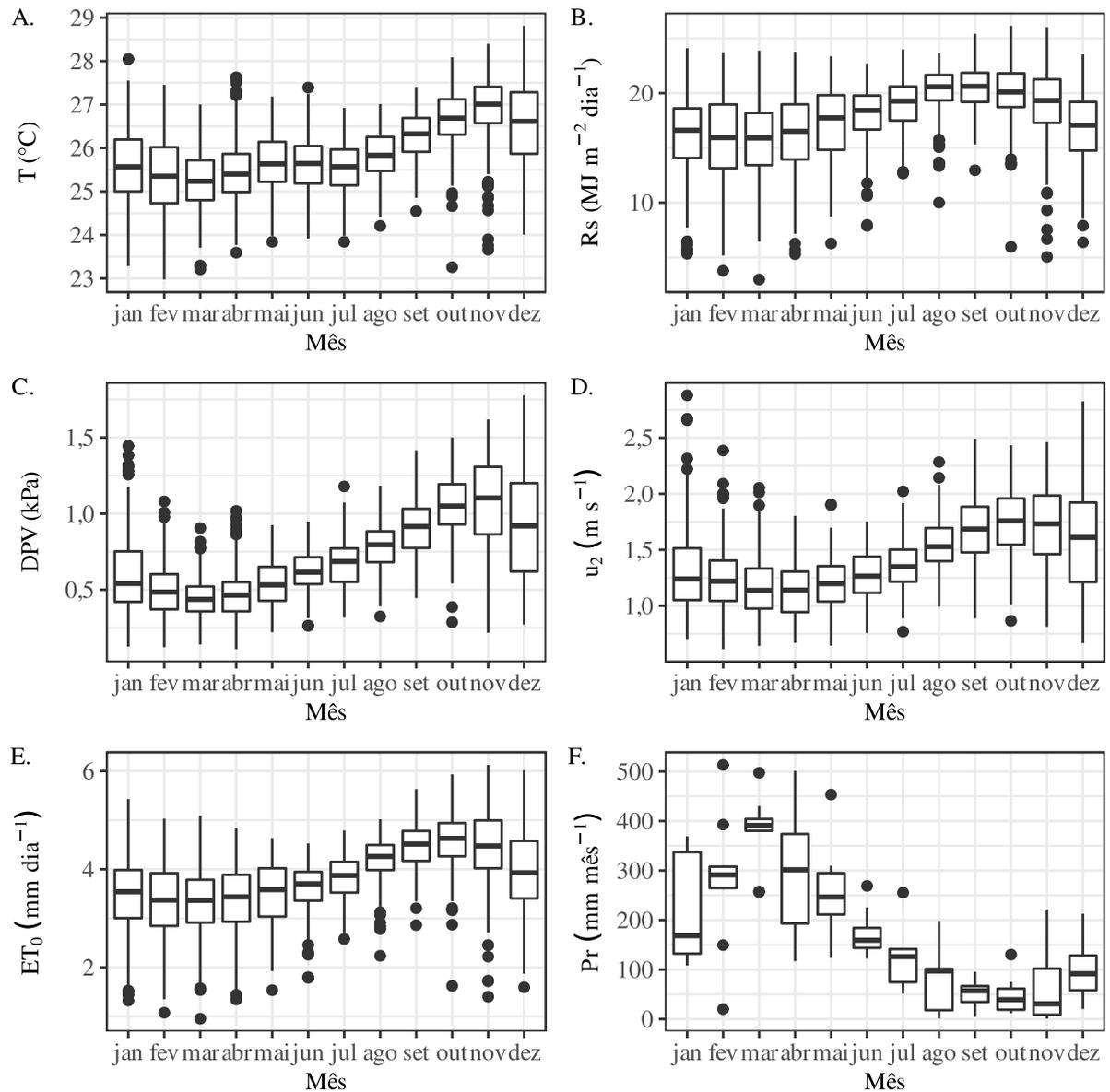


Figura 1.3 — Variação mensal da média diária de temperatura do ar (T , figura A), radiação solar global (R_s , figura B), déficit de pressão de vapor (DPV, figura C), velocidade do vento a 2 m de altura (u_2 , figura D), evapotranspiração de referência (ET_0 , figura E) e variação da precipitação acumulada mensal (Pr , figura F). As figuras compreendem os anos de 2011 a 2022, período em que há disponibilidade de dados meteorológicos na estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no município de Capitão Poço.

O aumento da temperatura do ar entre setembro e dezembro está relacionado à alta incidência de radiação solar global (R_s , Figura 1.3B). O aumento da radiação solar global neste período, por sua vez, está relacionado à redução da nebulosidade, uma vez que esta região é localizada próximo à linha do equador, e, portanto, não sofre grandes variações na incidência de radiação solar devido à variação da declinação solar ao longo do ano. A umidade relativa também apresenta redução no segundo semestre, sendo este perceptível pelo aumento do déficit de pressão de vapor (DPV), em especial no período de setembro a dezembro, quando o DPV médio diário pode superar 1,5 kPa (Figura 1.3C).

A velocidade do vento média na estação do INMET varia de um pouco mais de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ a um pouco mais de $2,8 \text{ m s}^{-1}$ ao longo do ano (Figura 1.3D), sendo maior no período com maior incidência de radiação global e maior temperatura.

A evapotranspiração de referência (ET_0) é determinada por todas estas variáveis e, portanto, é maior nos períodos de setembro a novembro, quando a temperatura, a radiação global, o déficit de pressão de vapor e a velocidade média do vento são maiores. Neste período, pode-se observar uma ET_0 diária variando entre 2,9 e $6,1 \text{ mm dia}^{-1}$, com mediana de $4,6 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 1.3E).

A precipitação anual total foi de, em média, 2058 mm ano^{-1} no período de 2011 a 2022. A maior parte desta precipitação (cerca de 81%) ocorre no primeiro semestre (Figura 1.3F). No segundo semestre, particularmente nos meses de julho a outubro, a precipitação é menor (Figura 1.3F), e muitas culturas, se não irrigadas, podem experimentar um déficit hídrico. Nesta região, a redução da precipitação e da nebulosidade no segundo semestre está relacionada ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical, que é um dos principais sistemas geradores de chuva (FERREIRA *et al.*, 2015).

1.7. OBJETIVOS

Dada a importância econômica da lima ácida “Tahiti” no contexto da citricultura no Pará, este trabalho tem como objetivo determinar a resposta da lima ácida “Tahiti” a diferentes níveis de irrigação, em termos de produção, sustentabilidade e eficiência econômica.

Para atingir esses objetivos, este trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 2 — Balanço de radiação e partição dos fluxos de calor latente e sensível sobre um pomar de lima na Amazônia Oriental.

Este capítulo analisará o balanço de radiação sobre o pomar de lima ácida Tahiti utilizando em plantio com adensamento elevado e utilizando citrumelo Swingle como porta enxerto. O balanço de radiação está fortemente relacionado com as necessidades hídricas da cultura.

Capítulo 3 — Resposta da produção de frutos, fenologia e trocas gasosas da lima ácida Tahiti a diferentes lâminas de irrigação na Amazônia Oriental.

Serão discutidos os efeitos da irrigação na fenologia, produtividade e trocas gasosas da lima ácida “Tahiti” na Amazônia Oriental.

Capítulo 4 — Eficiência econômica e produtividade hídrica da lima ácida Tahiti irrigada na Amazônia Oriental.

Este capítulo tem como objetivo estimar a viabilidade econômica da produção de lima ácida Tahiti nas condições climáticas da Amazônia Oriental, com as práticas de manejo utilizadas neste estudo. Também visa estimar o impacto da produção de lima ácida Tahiti no uso dos recursos hídricos da região, nas condições atuais, por meio da Produtividade da Água da Cultura (CWP).

1.8. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56). Disponível em: <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em 6 out. 2022.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 6 out. 2022.
- BAIN, J. Morphological, anatomical, and physiological changes in the developing fruit of the Valencia orange, *Citrus sinensis* (L) Osbeck. **Australian Journal of Botany**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–23, 1958. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/BT9580001>. Acesso em: 6 out. 2022.
- CANTUARIAS-AVILÉS, T. *et al.* Rootstocks for high fruit yield and quality of ‘Tahiti’ lime under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 142, p. 105–111, jul. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.008>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Preços Agropecuários.** [S. l.], 2022, Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/precos>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- CURK, F. *et al.* Phylogenetic origin of limes and lemons revealed by cytoplasmic and nuclear markers. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 117, n. 4, p. 565–583, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcw005>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- ESPINOZA-NÚÑEZ, E. *et al.* Performance of ‘Tahiti’ lime on twelve rootstocks under irrigated and non-irrigated conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 129, n. 2, p. 227–231, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.032>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- FERREIRA, D. B. S. *et al.* Spatial and Temporal Variability of Rainfall in Eastern Amazon during the Rainy Season. **The Scientific World Journal**, [s. l.], v. 2015, 209783, 22 fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2015/209783>. Acesso em: 6 out. 2022.
- GARMENDIA, A. *et al.* Gibberellic acid in *Citrus* spp. flowering and fruiting: A systematic review. **Plos One**, [s. l.], v. 14, n. 9, e0223147, 26 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223147>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- IGLESIAS, D. J. *et al.* Physiology of citrus fruiting. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes — Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 333–362, dez. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400006>. Acesso em: 23 jul. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/lspa/tabelas>. Acesso em: 30 out. 2022.

ISSARAKRAISILA, M. A review of Thailand commercial success in growing lime (*Citrus aurantifolia*) in containers to control flowering time and canopy size. **Acta Horticulturae**, [s. l.], v. 1205, p. 289–291, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1205.33>. Acesso em: 24 jul. 2021.

JAMSHIDI, S. *et al.* Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 227, 105838, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>. Acesso em: 24 jul. 2021.

KOSHITA, Y.; TAKAHARA, T. Effect of water stress on flower-bud formation and plant hormone content of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.). **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 99, n. 3–4, p. 301–307, fev. 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(03\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00113-4). Acesso em: 24 jul. 2021.

LOURKISTI, R. *et al.* Improved response of triploid citrus varieties to water deficit is related to anatomical and cytological properties. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 162, p. 762–775, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.041>. Acesso em: 24 jul. 2021.

MARIN, F. R. *et al.* Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 163, p. 139–145, jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.010>. Acesso em: 24 jul. 2021.

MOURÃO FILHO, F. A. A. *et al.* Plant growth, yield, and fruit quality of ‘Fallglo’ and ‘Sunburst’ mandarins on four rootstocks. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 114, n. 1, p. 45–49, set. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.05.007>. Acesso em: 24 jul. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **FAO Stat**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 23 jul. 2021.

PEDROSO, F. K. J. V. *et al.* Drought tolerance in citrus trees is enhanced by rootstock-dependent changes in root growth and carbohydrate availability. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 101, p. 26–35, maio 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.12.024>. Acesso em: 24 jul. 2021.

RADDATZ-MOTA, D. *et al.* Effect of different rootstocks on Persian lime (*Citrus latifolia* T.) postharvest quality. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 257, 108716, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108716>. Acesso em: 24 jul. 2021.

RADDATZ-MOTA, D. *et al.* Oleocellosis development in Persian lime (*Citrus latifolia* T.) fruit influenced by citrus rootstock. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 271, 109461, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109461>. Acesso em: 24 jul. 2021.

- ROSSI, F. R. *et al.* The role of contracts in the adoption of irrigation by Brazilian orange growers. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 233, 106078, 30 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106078>. Acesso em: 30 out. 2022.
- SILVA, G. S. *et al.* Aluminum prevents stomatal conductance from responding to vapor pressure deficit in Citrus limonia. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 155, p. 662–671, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.017>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- SOUTHWICK, S. M.; DAVENPORT, T. L. Characterization of Water Stress and Low Temperature Effects on Flower Induction in Citrus. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 81, p. 26–29, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.81.1.26>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- SYVERTSEN, J. P.; GARCIA-SANCHEZ, F. Multiple abiotic stresses occurring with salinity stress in citrus. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 103, p. 128–137, jul. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.015>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- WU, G. A. *et al.* Genomics of the origin and evolution of Citrus. **Nature**, [s. l.], v. 554, p. 311–316, 7 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature25447>. Acesso em: 24 fev. 2021.

2. BALANÇO DE RADIAÇÃO E PARTIÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR LATENTE E SENSÍVEL EM UM PLANTIO DE LIMAS ÁCIDA TAHITI IRRIGADO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Resumo: O balanço de radiação e energia sobre um pomar de lima ácida nas condições climáticas da Amazônia Oriental as suas relações com as condições do ambiente, tal como a disponibilidade de água no solo e a fenologia da cultura são investigados. Observou-se que as árvores de lima ácida com idade entre 6 e 7 anos refletem entre 11,0 e 14,5% da radiação de onda curta incidente, e a mediana do percentual do saldo de radiação representado pelo fluxo de calor latente aumentou de 57,6% para 66,6% entre o período seco de 2020 e o período seco de 2021. Além disso, o fluxo de calor no solo representou entre 1 e 2% do saldo de radiação de um dia inteiro. A evapotranspiração foi muito inferior à evapotranspiração de referência durante as estações secas de 2019 e 2020, mas aumentou em relação à evapotranspiração de referência durante a estação seca de 2021 devido às diferentes condições climáticas encontradas entre os anos, como aumento de chuvas e umidade relativa na estação seca de 2021. O coeficiente de cultura variou entre 0,74 e 0,84.

Palavras-chave: evapotranspiração, energia, saldo de radiação, razão de Bowen, recursos hídricos.

2. RADIATION BALANCE AND PARTITIONING OF LATENT AND SENSIBLE HEAT FLUXES IN AN IRRIGATED TAHITI LIME ORCHARD IN EASTERN AMAZON.

Abstract: The balance of radiation and energy above a lime orchard in the climate conditions of Eastern Amazon and how it relates to environmental conditions, such as the available water in the soil and the gas exchange of lime trees are investigated. We found that lime trees with aged between 6 and 7 years old reflect between 11.0% and 14.5% of incoming shortwave radiation, and the median of percentage of the net radiation represented by latent heat flux increased from 57.6% to 66.6% between the dry season of 2020 and the dry season of 2021. The soil heat flux represents 1% and 2% of net radiation over a day. Evapotranspiration was much lower than the reference evapotranspiration during the dry seasons of 2019 and 2020, but it increased relative to the reference evapotranspiration during the dry season of 2021 due to different weather conditions found among years, such as increased rainfall and relative moisture in the dry season of 2021. The crop coefficient varied between 0.74 and 0.84.

Keywords: evapotranspiration, energy, net radiation, Bowen ratio, water resources

2.1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água, temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar são alguns dos diversos fatores relacionados ao balanço de radiação e à partição da energia disponível entre os fluxos de calor sensível e latente (BAGLEY *et al.*, 2017). A radiação solar é a força motriz por trás da maioria dos fenômenos naturais na Terra e, muitas vezes, a principal fonte de energia para ecossistemas e agroecossistemas. Como tal, a energia solar é geralmente responsável pela maior parte da energia disponível para a evapotranspiração. No entanto, à medida que a quantidade de água disponível no solo diminui, mais energia disponível é utilizada para aquecer a superfície e a camada de ar acima dela (TANG; SUN; WANG, 2014).

A Região Amazônica é suprida por grandes quantidades de água da chuva; no entanto, as precipitações não são homogêneas ao longo de um ano. Na Amazônia Oriental, o segundo semestre do ano costuma ser mais quente e seco do que o primeiro (AMANAJÁS; BRAGA, 2012), portanto, as lavouras anuais e perenes podem sofrer algum déficit hídrico, e muitas vezes é necessária a irrigação para obter maiores produtividades (BRUM *et al.*, 2021). Além disso, espera-se que as mudanças climáticas aumentem a temperatura média e encurtem a estação chuvosa em algumas localidades da Amazônia Oriental (SOUZA *et al.*, 2016).

O estado do Pará, localizado na Amazônia Oriental brasileira, é o segundo maior produtor de lima ácida Tahiti no Brasil (IBGE, 2020). Embora muitos conceitos relacionados à partição de energia possam ser extrapolados para várias regiões e condições climáticas, alguns são muito específicos e dependentes de práticas de manejo e cobertura do solo (BAGLEY *et al.*, 2017), como o albedo da superfície (VANOMARK *et al.*, 2018). A maioria das pesquisas sobre balanço de radiação para lima ácida é realizada em diferentes regiões e práticas de manejo, e seus resultados diferem amplamente. Por exemplo, há relatos de que o coeficiente de cultura para a lima ácida Tahiti reduz com o aumento da evapotranspiração de referência em São Paulo além da existência de variações sazonais nesta região (MARIN *et al.*, 2016).

O presente trabalho tem como objetivo descrever as variações sazonais do balanço de radiação e partição de energia sobre um pomar de lima no estado do Pará e como elas se relacionam com as condições climáticas dentro e ao longo dos anos. Algumas relações importantes entre os fluxos de energia e radiação são exploradas.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em um pomar de lima ácida Tahiti de 12,5 ha (Figura 15C) localizado na Amazônia Oriental ($1^{\circ}48'19''\text{S}$, $47^{\circ}11'52''\text{W}$), no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil (Figura 2.1A e B). O gráfico de distribuição da direção do vento na figura abaixo (Figura 2.1C) mostra a direção predominante do vento. A barra mais longa tem comprimento equivalente a 200m (Figura 2.1C). A torre com todos os instrumentos foi instalada a 100 m do lado norte e 80 m do lado oeste do pomar.

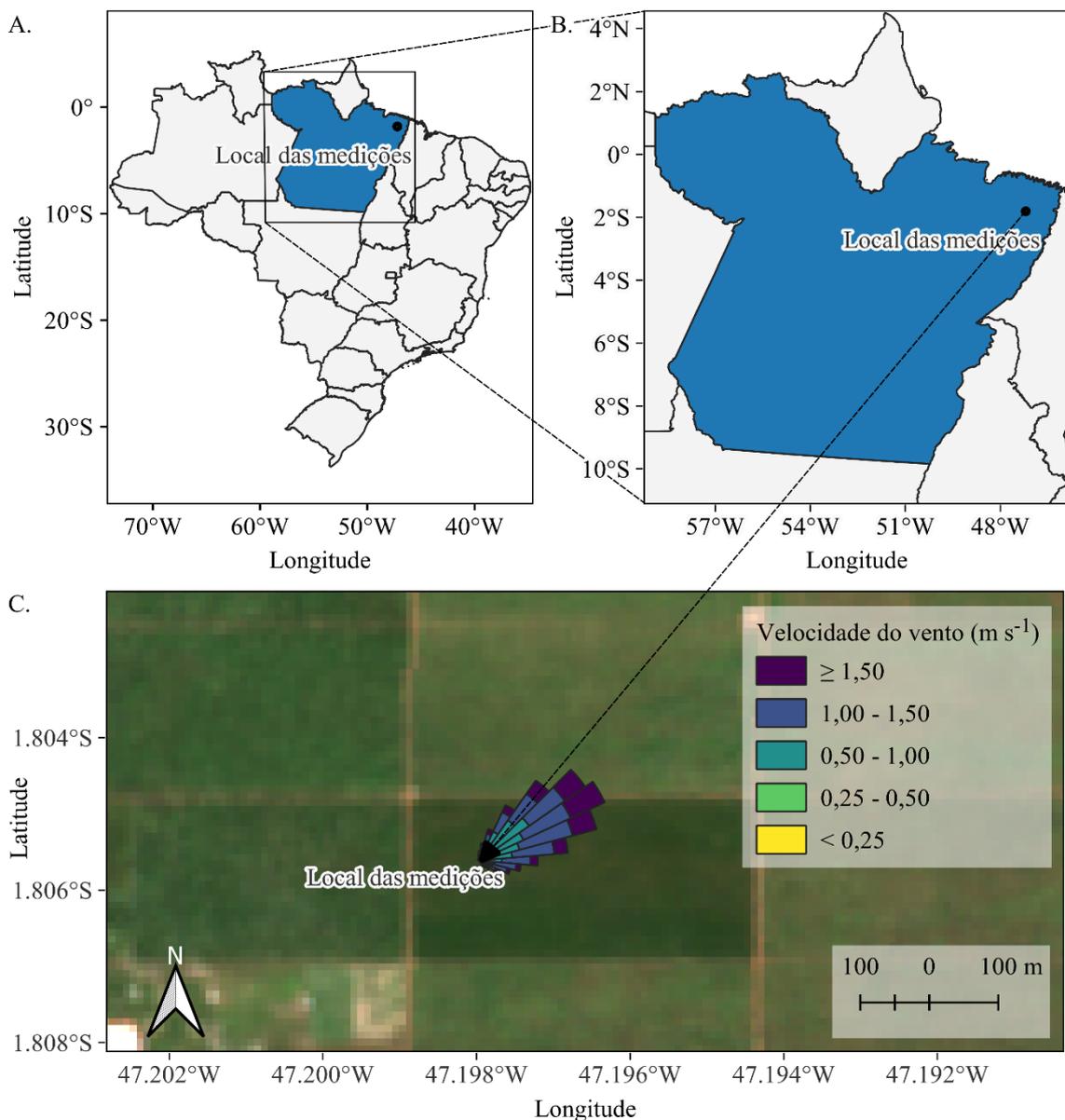


Figura 2.1 — Mapa do experimento e sua localização no território brasileiro. (A) Mapa do Brasil com destaque para o estado do Pará, em azul. (B) Mapa do Estado do Pará e localização do experimento marcada como um ponto preto. (C) Imagem de satélite do local do experimento no mês de agosto de 2020, com ponto indicando o local onde a torre com equipamentos foi instalada.

Esta região é classificada como Am de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). A precipitação média anual na última década (2011–2020) foi superior a 2100 mm ano⁻¹ de acordo com os dados registrados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no mesmo município. Os três meses mais chuvosos são de fevereiro a abril, quando ocorrem cerca de 45% da precipitação anual. Os três meses menos chuvosos se estendem de setembro a novembro (AMANAJÁS; BRAGA, 2012), quando ocorre cerca de 8% da precipitação anual. A temperatura média anual é de 25,9 °C. Novembro é o mês mais quente (26,9 °C) e março é o mais frio (25,3 °C). A umidade relativa média é superior a 70% em todos os meses. A radiação solar global é maior durante o período menos chuvoso, devido à baixa nebulosidade.

O pomar é cercado por pomares de laranja (*C. sinensis*) de idades variadas. As plantas de lima ácida Tahiti são plantadas em fileiras com 6,8 m de distância umas das outras e com 2,0 m de distância entre plantas vizinhas na mesma linha de plantio. As linhas de plantio são alinhadas no sentido leste – oeste. O pomar de 12,5 ha tem 500 m de comprimento no sentido leste – oeste e 250 m de comprimento no sentido norte – sul. O pomar é irrigado durante o período menos chuvoso, geralmente de agosto a novembro, mas em 2021 a irrigação não foi realizada. Durante o período irrigado, a irrigação é realizada diariamente pela empresa, exceto após chuva forte, e equivale a 5 mm dia⁻¹. Durante o período do experimento na estação menos chuvosa de 2020, a decisão de irrigar foi baseada na umidade do solo calculada a partir dos dados provenientes da leitura de tensiômetros.

A umidade do solo foi estimada a partir da curva de retenção de água do solo (GENU-CHTEN, 1980) utilizando o potencial matricial do solo lido com tensiômetros instalados a 30 cm de profundidade, que é a metade da profundidade do sistema radicular. Em 2020, apenas quatro tensiômetros foram usados, mas este número foi aumentado para 12 tensiômetros em julho de 2021. Os 12 tensiômetros foram posicionados alinhados com as fileiras de plantas e a 1 m de distância das duas árvores vizinhas. Foi realizado um balanço hídrico seguindo a metodologia descrita por Allen *et al.* (1998), considerando uma profundidade efetiva do sistema radicular de 0,6 m, uma altura média de linceiras de 4,0 m e uma fração de solo coberta pela copa de 0,6 (adimensional) — ou 60%. O total de água disponível foi considerado como 78 mm com base na capacidade de campo e ponto de murcha permanente da área — obtidos através da curva de retenção de água no solo — e com base na profundidade efetiva do sistema radicular.

Para a calibração da curva de retenção de água no solo, amostras de solo indeformadas foram obtidas em quatro pontos diferentes do pomar, a cada 10 cm de profundidade do solo até 1 m. As amostras de solo indeformadas foram expostas a tensões de 1, 2, 4, 6, 10, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa e a umidade remanescente após a exposição a estas tensões foi medida pesando as amostras com uma balança de precisão. A equação de Genuchten (1980) (equação 2.1) foi então ajustada aos dados obtidos neste procedimento.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2.1)$$

Em que: θ_r , θ_s — umidade residual e saturada do solo, respectivamente; h — tensão lida no tensiômetro; α , n , m — parâmetros de ajuste para a equação de van Genuchten.

Sensores de temperatura e umidade relativa do ar foram instalados a 0,5 e 2,0 m acima da copa das árvores, na torre de instrumentos descrita anteriormente (Figura 2.1). Um saldo-radiômetro de quatro componentes modelo CNR4 da Campbell Scientific foi instalado 2 m acima do dossel e medições da radiação de onda curta incidente e refletida, bem como os componentes direcionados para baixo e para cima da radiação de onda longa foram feitas de maio de 2019 a março de 2022. Os piranômetros do saldoradiômetro de 4 componentes medem radiação de onda longa dentro de um comprimento de onda que varia de 4,5 μm a 42 μm . Um saldoradiômetro NR-Lite (Kipp & Zonen) foi instalado nas proximidades do saldoradiômetro de 4 componentes, no mesmo pomar, no período de maio de 2019 a outubro de 2020, de forma que a integridade dos dados pudesse ser aferida através da comparação das medições obtidas em ambos os equipamentos. O saldo de radiação entre as linhas de plantio foi medido por um terceiro saldoradiômetro, modelo NR-Lite (Kipp & Zonen), igual ao descrito anteriormente. Os sensores foram instalados a cerca de 80 m do lado oeste e 100 m do lado norte do pomar de lima ácida (Figura 2.1). Dois sensores para medição do fluxo de calor no solo — modelo Hukseflux HFP01 — foram instalados a 10 cm de profundidade, um entre as linhas de plantio e outra nas linhas de plantio, abaixo do dossel.

O saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) é considerada como a diferença entre a radiação de onda curta recebida e a refletida (equação 2.2), e o saldo de radiação de onda longa (R_{nl}) é a diferença entre a radiação de onda longa direcionada para baixo e para cima (equação 2.3). O saldo de radiação (R_n) é obtido pela soma de R_{ns} e R_{nl} (equação 2.4).

$$R_{ns} = S_{\downarrow} - S_{\uparrow} \quad (2.2)$$

$$R_{nl} = L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (2.3)$$

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (2.4)$$

Devido a um mau funcionamento do sensor de temperatura do saldoradiômetro de 4 componentes, os componentes do saldo de radiação de ondas longas (R_{ns} e R_{nl}) apresentam um desvio em relação valores reais. Entretanto isto não afeta o saldo de radiação de ondas longas calculado, uma vez que a subtração referida na equação 8 cancela os termos dependentes de temperatura do saldo de radiação de ondas longas (CAMPBELL SCIENTIFIC INC., 2021).

Albedo (α) é a razão entre radiação de ondas curtas refletida e recebida (equação 2.5).

$$\alpha = \frac{S_{\uparrow}}{S_{\downarrow}} \quad (2.5)$$

O albedo foi calculado por uma regressão linear entre S_{\downarrow} como variável explicativa e S_{\uparrow} como variável resposta, com o coeficiente linear definido como 0. Portanto, albedo é o coeficiente angular dessa equação. Análise de regressão foi realizada para avaliar a confiabilidade e incerteza do albedo calculado.

Os fluxos de calor latente (H) e sensível (λE) foram calculados ao longo de um ano através do método Balanço de Energia Razão de Bowen (BREB). A razão de Bowen (β) é definida como a razão entre o fluxo de calor sensível e o latente, conforme equação 2.6. que pode ser calculada a partir de medições de temperatura do ar e pressão de vapor d'água em diferentes alturas sob certas condições (PEREZ *et al.*, 1999).

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{p_a C_p}{\lambda \varepsilon} \left(\frac{k_h}{k_v} \right) \frac{\delta T / \delta z}{\delta e / \delta z} = \gamma \left(\frac{k_h}{k_v} \right) \frac{\delta T / \delta z}{\delta e / \delta z} \quad (2.6)$$

Onde k_v e k_h — coeficientes de difusão turbulenta de vapor d'água e calor sensível; $\varepsilon = 0,622$ — razão entre o peso molecular da água e o peso molecular do ar seco; p_a — pressão atmosférica; C_p — calor específico do ar a pressão constante; λ — calor latente de vaporização da água; $\gamma = (p_a C_p) / \lambda \varepsilon$ — constante psicrométrica; T — temperatura do ar; e — pressão do vapor de água. Dado $k_v = k_h$ para condições adiabáticas, obtém-se a equação simplificada (equação 2.7)

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}, \quad (2.7)$$

onde ΔT — diferença de temperatura entre as alturas de medição z_1 e z_2 ; e Δe — diferença de pressão de vapor entre as alturas z_1 e z_2 . A equação do balanço de energia para uma superfície uniforme é

$$R_n = H + G + \lambda E. \quad (2.8)$$

A partir das equações 2.7 e 2.8, obtém-se

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta}. \quad (2.9)$$

em que: λ – calor latente de vaporização da água; e E – evapotranspiração. Finalmente, H pode ser obtido como o resíduo de R_n quando R_n , G e λE são conhecidos.

Como o BREB é instável quando β se aproxima de -1, os critérios objetivos para rejeitar os resultados da Razão de Bowen descritos por Perez *et al.* (1999) foram aplicados aos resultados da equação 2.7. Além disso, valores negativos de λE foram desconsiderados no cálculo da evapotranspiração total diária, embora sejam mantidos para o cálculo dos fluxos de energia. Após os dados serem filtrados de acordo com os critérios acima, o fluxo de calor latente nos intervalos remanescentes após a filtragem dos dados foi estimado por regressão linear múltipla com todas as variáveis medidas. Para fins de comparação, a evapotranspiração de referência diária foi calculada com o método FAO Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 2006) com dados de uma estação meteorológica padrão localizada a 17 km do local do experimento. As medidas de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação global realizadas em ambos os locais (no pomar e na estação meteorológica do INMET) apresentam alta correlação.

Além disso, medições das trocas gasosas foram realizadas em outubro de 2020. A taxa de assimilação de carbono (A), a condutância estomática (g_s) e a transpiração (E) foram medidas em 15 plantas escolhidas aleatoriamente no pomar. As medições foram feitas no terço médio do dossel. Tais resultados foram utilizados para explicar algumas das observações discutidas ao longo deste trabalho.

Em relação às figuras e cálculos do presente estudo, o mapa (Figura 2.1) foi feito com o QGIS v3.22, e as demais figuras, cálculos e estatísticas foram feitos com o R v4.2.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A radiação de ondas curtas de entrada atinge até 25 MJ m⁻² dia⁻¹ em alguns dias durante as estações secas de 2019 e 2020, e valores tão baixos quanto 5 MJ m⁻² dia⁻¹ durante o período mais chuvoso de 2021 (Figura 2.2). Há uma diferença notável entre o período menos chuvoso de 2020 e o mesmo período em 2021, quando a radiação de ondas curtas incidente registrada foi menor do que em anos anteriores. Tais diferenças parecem estar relacionadas à ocorrência de La Niña de média intensidade que se inicia com o início da estação chuvosa na segunda quinzena de outubro de 2020 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERE ADMINISTRATION, 2022).

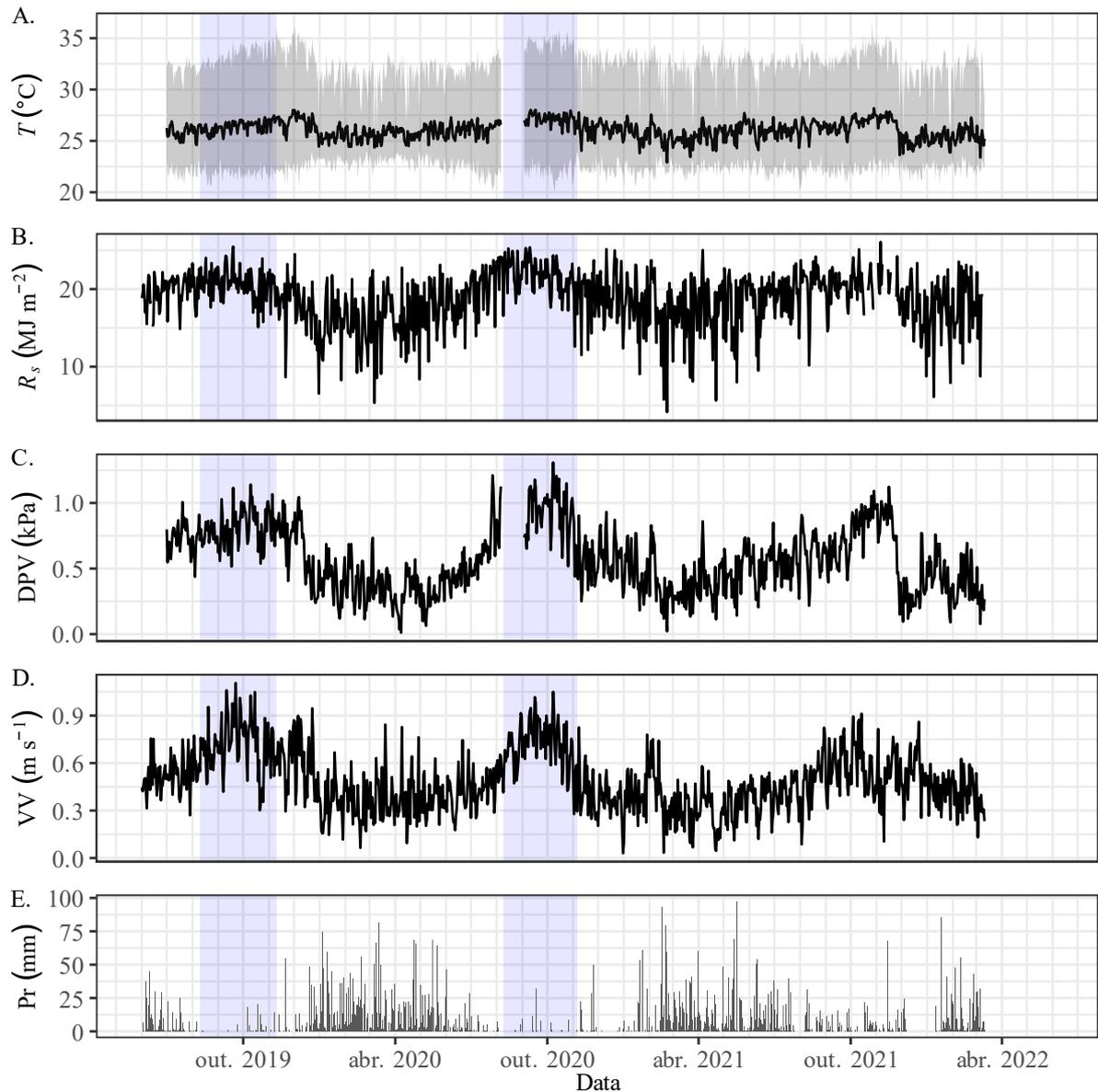


Figura 2.2 — Condições do tempo no pomar de lima ácida Tahiti durante o experimento. T — temperatura do ar (média diária); R_s — radiação solar global (total diário); DPV — déficit de pressão de vapor (média diária); VV — velocidade do vento (média diária); Pr — precipitação (total diário).

O La Niña geralmente está relacionado ao aumento das chuvas na Amazônia (MOURA *et al.*, 2019), o que explica a alta quantidade de chuvas durante o período menos chuvoso de 2021, bem como as condições de maior nebulosidade neste ano, em comparação com o período menos chuvoso do ano anterior — 2020. A nebulosidade é um dos fatores mais importantes que influenciam a radiação global nesta região, e exerce uma influência significativa no balanço de radiação como demonstrado em outros estudos (ELTAHIR; HUMPHRIES JÚNIOR, 1998).

A menor nebulosidade e a maior radiação de ondas curtas incidentes fizeram com que a temperatura do ar atingisse picos acima de 35 °C durante setembro de 2020, e a umidade

relativa atingisse 55% durante os meses menos chuvosos, com umidade relativa média abaixo de 80% em alguns dias. O mesmo período de 2021 registrou umidade relativa acima de 80% e umidade relativa mínima geralmente acima de 60%. A umidade do solo permaneceu estável de agosto até novembro de 2020, devido à irrigação (Figura 2.3).

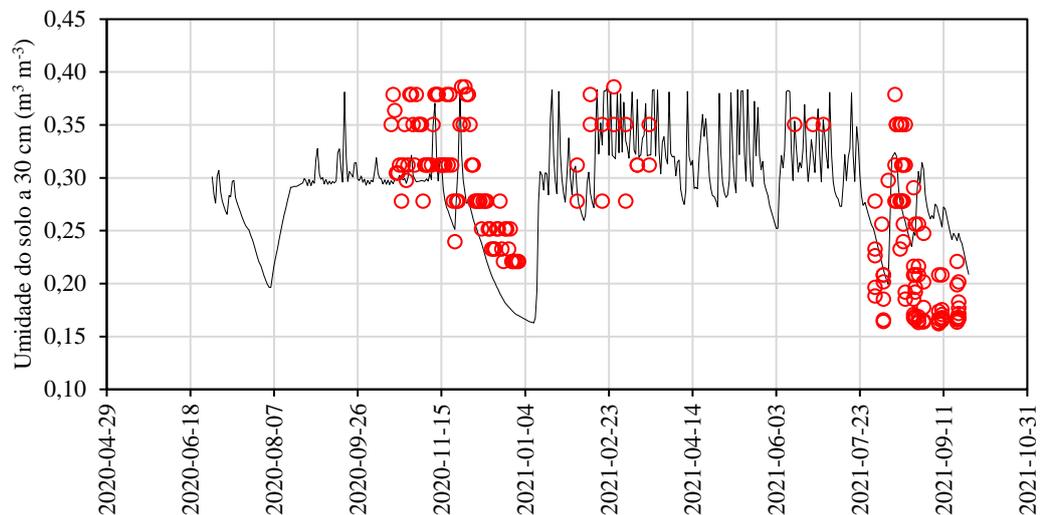


Figura 2.3 — Variação da umidade do solo de setembro de 2020 a setembro de 2021. Os pontos representam medições com tensiômetros e a linha é a umidade do solo simulada por um balanço hídrico.

Os dados dos tensiômetros indicam que o solo estava muito mais seco durante o período menos chuvoso de 2021 do que durante o período menos chuvoso do ano anterior, embora a o período menos chuvoso de 2021 tenha sido mais chuvoso que o mesmo período do ano anterior. A precipitação do período menos chuvoso de 2021 foi distribuída entre vários eventos com pequena quantidade de precipitação, chegando um pouco acima de 13 mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Essa situação aumenta a interceptação de água pela copa das árvores, uma vez que a copa é inicialmente seca e precisa ser saturada para que a água possa atingir o subsolo (TÁVORA; KOIDE, 2020).

Observou-se que durante os meses mais úmidos, a radiação global atinge valores médios que variam de 700 e 800 W m^{-2} ao meio-dia (horário local), e durante o período menos chuvoso — de julho a setembro — a média da radiação de ondas curtas incidente ao meio-dia local é superior a 750 W m^{-2} (Figura 2.4).

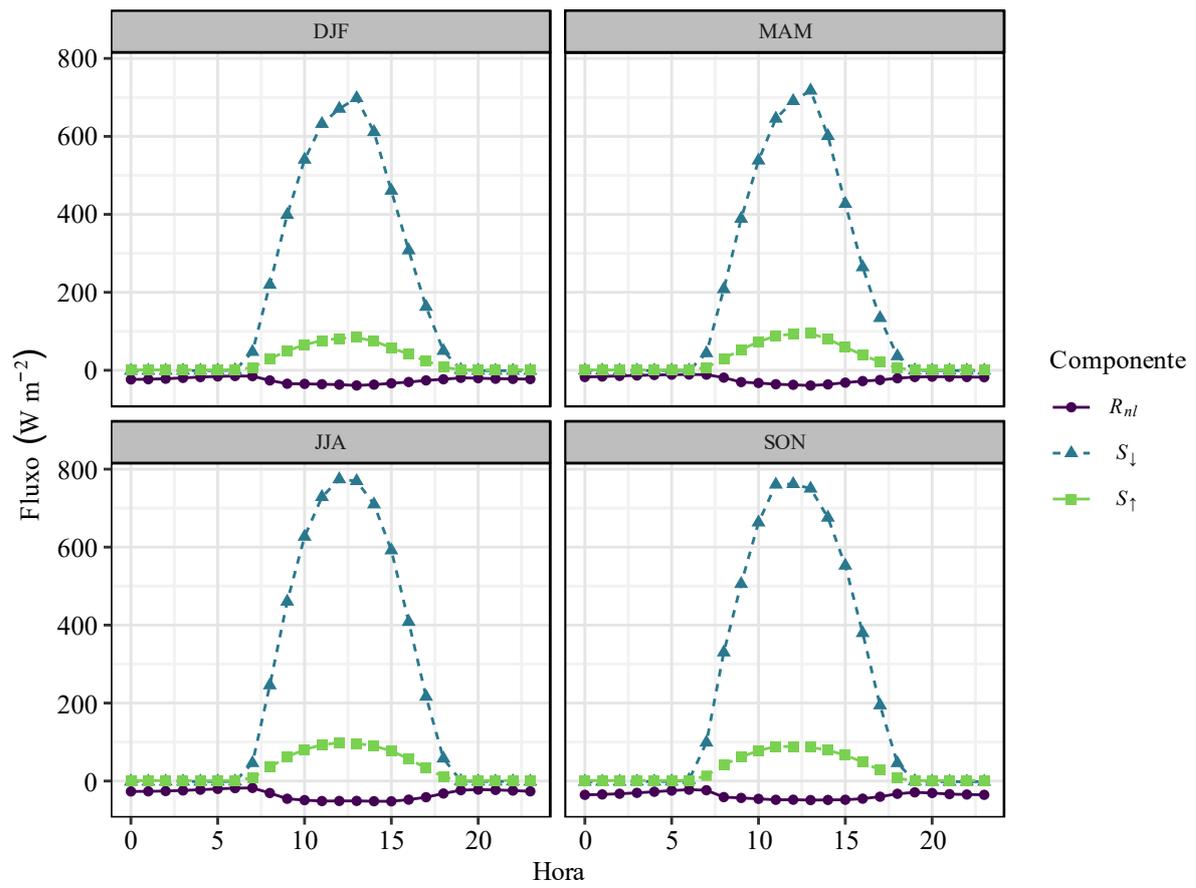


Figura 2.4 — Média de radiação de ondas curtas incidente (S_{\downarrow}), radiação de ondas curtas refletida (S_{\uparrow}) e saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) ao longo do dia em cada trimestre.

Devido à proximidade com o equador, a região não apresenta grandes variações de radiação extraterrestre incidente (R_a) ao longo do ano. R_a atinge $32,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em julho e $38,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em março. Durante a estação chuvosa, S_{\downarrow} medido entre 9 h e 12 h (hora local) é cerca de 50% a 60% da radiação extraterrestre R_a . Após 13 h, a radiação de ondas curtas incidente é inferior a 50% de R_a , o que indica maior nebulosidade durante essas horas. Entre agosto e setembro, a frequência de condições de céu claro é maior. Durante esses meses, a média S_{\downarrow} entre 8 h e 14 h (hora local) está dentro da faixa de 60% – 70% de R_a . A nebulosidade é, portanto, um dos fatores responsáveis pelas diferenças no balanço de radiação entre os períodos mais e menos chuvosos.

O saldo de radiação de ondas longas é mais negativo de agosto a outubro, quando o R_{nl} médio é de -50 W m^{-2} durante as horas mais quentes do dia. Um saldo de radiação de ondas longas mais negativo pode estar relacionado ao aquecimento da superfície causado pela maior incidência de radiação de ondas curtas e menor disponibilidade de água, bem como pela redução da nebulosidade durante a estação seca. A maior presença de nuvens impacta o balanço de radiação porque estas refletem a radiação de ondas curtas e emitindo radiação de ondas

longas direcionadas para baixo (NYEKI *et al.*, 2019), de modo que contribuem para aumentar o saldo de radiação de ondas longas (tornando-o menos negativo), enquanto o aquecimento da superfície aumenta as emissões de radiação de ondas longas para cima. Durante o período menos chuvoso, a temperatura do ar também é mais alta do que nos outros meses por causa da superfície mais quente. Neste período, ao meio-dia local, a temperatura média do ar medida a 2,0 m acima do dossel é superior a 32,5 °C (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

2.3.1. Albedo

O albedo foi calculado como $0,1276 \pm 7,611 \times 10^{-5}$ ($p < 0,01$) com dois anos e meio de medições (Figura 2.5A e B). O albedo calculado em meados de 2021 foi um pouco superior à média dos anos anteriores, mas voltou à média em setembro (Figura 2.5A). O albedo também pode ser influenciado pela poda de árvores realizada no final do primeiro semestre de 2021, embora este evento por si só não possa explicar o pico observado em 2021, uma vez que o aumento do albedo começa alguns meses antes da poda realizada no início de junho.

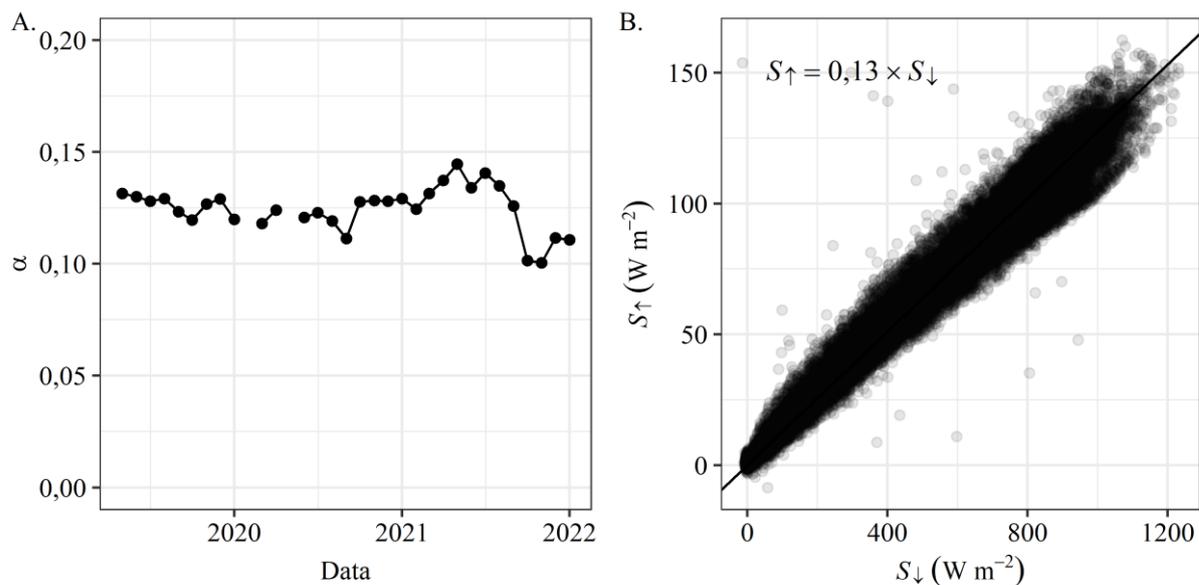


Figura 2.5 — Variação do albedo por mês de junho de 2019 até setembro de 2021. Os pontos na figura A representam a inclinação da análise de regressão entre S_{\uparrow} e S_{\downarrow} realizada para cada mês.

Apesar da existência de picos nas medições de albedo como mostrado na Figura 2.5A, as variações são pequenas, de forma que um gráfico de dispersão usando todas as medições de 10 min disponíveis de S_{\downarrow} e S_{\uparrow} de 2019 a 2021 ainda mostra uma alta correlação positiva (Figura 2.5B), com coeficiente de correlação de Pearson de até 0,99 (Figura 2.5B), não sendo necessário estabelecer valores de albedo para cada estágio fenológico ou para as estações seca e chuvosa separadamente.

Relatos de albedo superficial para pomares de lima não foram encontrados na literatura científica nos últimos anos para fins de comparação, mas o valor encontrado é um pouco menor do que o albedo de áreas cultivadas e dentro da faixa de valores encontrados para áreas florestais na Região Amazônica (FARIA *et al.*, 2018).

2.3.2. Fluxos de calor sensível e latente

Cerca de 36% dos dados disponíveis referentes aos cálculos da Razão de Bowen foram excluídos pelos critérios descritos por Perez *et al.* (1999). Durante os meses com menor precipitação em 2020 e 2021 (de julho a outubro de 2020 e de 2021), 27% dos dados disponíveis foram excluídos, e, durante a estação mais chuvosa (demais meses) 40% foram excluídos.

As estimativas de calor latente pelo método BREB geralmente falham quando ocorrem gradientes negativos de temperatura durante condições instáveis e noturnas, e quando a inversão na direção dos fluxos ocorre, pela manhã ou ao anoitecer (PEREZ *et al.*, 1999). Entre dezembro e junho, as chuvas são muito frequentes (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e podem ocorrer várias vezes ao dia, o que leva a uma maior incerteza dos fluxos calculados. Essa quantidade de dados excluídos é normal segundo PEREZ *et al.* (1999), que indica que, em média, 40% dos dados devem ser rejeitados, incluindo principalmente dados obtidos durante as irrigações, à noite e durante as chuvas.

Pouca variação foi observada no padrão diário dos fluxos de calor latente, sensível e do solo ao longo do ano, apesar das variações de magnitude. O calor sensível geralmente atinge seu valor máximo entre 10 h e 12 h (hora local). O fluxo de calor latente geralmente atinge seu máximo logo após o meio-dia local. A densidade máxima de fluxo de λE e H é geralmente em torno de 400 W m^{-2} . Durante a manhã da estação seca de 2020, H é maior que λE , então ocorre uma inversão ao meio-dia, quando λE se torna maior que H . Esses são os únicos meses com irrigação diária em toda a série temporal, então esse comportamento pode estar relacionado à irrigação. A irrigação não era realizada no mesmo horário todos os dias, mas geralmente começa à tarde, portanto, um aumento da umidade do solo ocorrendo neste horário pode explicar porque λE se torna maior que H à tarde em meses com irrigação.

Durante o dia, λE varia entre 47,0% e 74,6% de R_n entre setembro e outubro, e entre 44,5% e 79,9% de R_n nos demais meses. O fluxo de calor do solo corresponde a cerca de 43,8% de R_n durante a noite entre novembro e julho, e 23,6% de R_n durante a noite entre agosto e outubro. Durante o dia, o fluxo de calor do solo geralmente representa apenas 1,7% de R_n . O fluxo de calor diário total do solo geralmente está entre 1% e 2% do R_n diário total,

e a mediana do fluxo de calor latente foi de 57,6% de R_n durante os meses irrigados de 2020 (agosto a outubro), 62,1% de R_n entre novembro de 2020 e julho de 2021, e 66,6% de R_n durante o período menos chuvoso de 2021. Observando a magnitude de fluxo médio calculado para cada trimestre (Figura 2.6) ao longo do dia, há um aumento notável no saldo de radiação quando da transição do trimestre mais chuvoso (MAM) para o trimestre menos chuvoso (SON).

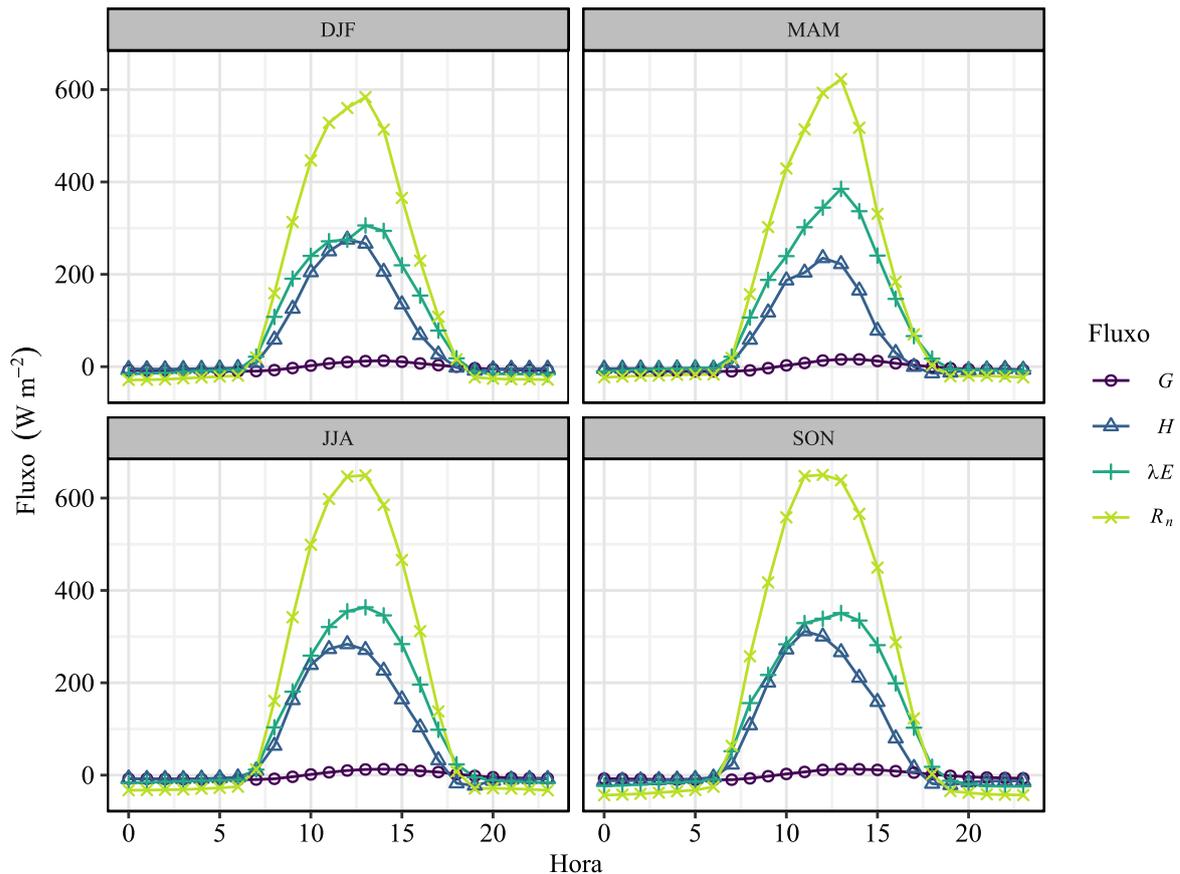


Figura 2.6 — Média do fluxo de calor do solo — G ; fluxo de calor sensível — H ; fluxo de calor latente — λE ; e saldo de radiação — R_n , calculados para cada trimestre. DJF — dezembro, janeiro e fevereiro; MAM — março, abril e maio; JJA — junho, julho e agosto; SON — setembro, outubro e novembro.

O λE médio no período de março, abril e maio (MAM) foi muito superior ao H (Figura 2.6), o que indica que a maior parte da energia disponível nesses meses está sendo utilizada para evapotranspiração. Por outro lado, o trimestre de setembro a novembro (SON) tem a maior quantidade de energia disponível, como demonstrado pelo maior pico atingido pela linha azul (R_n) na Figura 2.6, mas a menor disponibilidade de água da chuva neste período parece inibir a evapotranspiração, logo λE não aumenta na mesma proporção que R_n na transição do trimestre mais chuvoso (MAM) para o menos chuvoso (SON).

O aumento da evapotranspiração de referência durante o período menos chuvoso (Figura 2.7) pode ser explicado pela maior demanda atmosférica, devido à maior disponibilidade de energia causada pelo aumento da radiação solar neste período, maior temperatura do ar e velocidade do vento e pela redução da umidade do ar. A evapotranspiração real da cultura é impactada pela disponibilidade de água, que foi fornecida por meio de irrigação em 2019 e 2020. No entanto, conforme mostrado na Figura 2.7A, a ET praticamente se iguala à ET_0 durante o período menos chuvoso de 2021 (setembro-novembro), apesar de a irrigação não ter sido realizada neste ano e de o solo estar muito mais seco neste período em comparação ao período menos chuvoso de 2020.

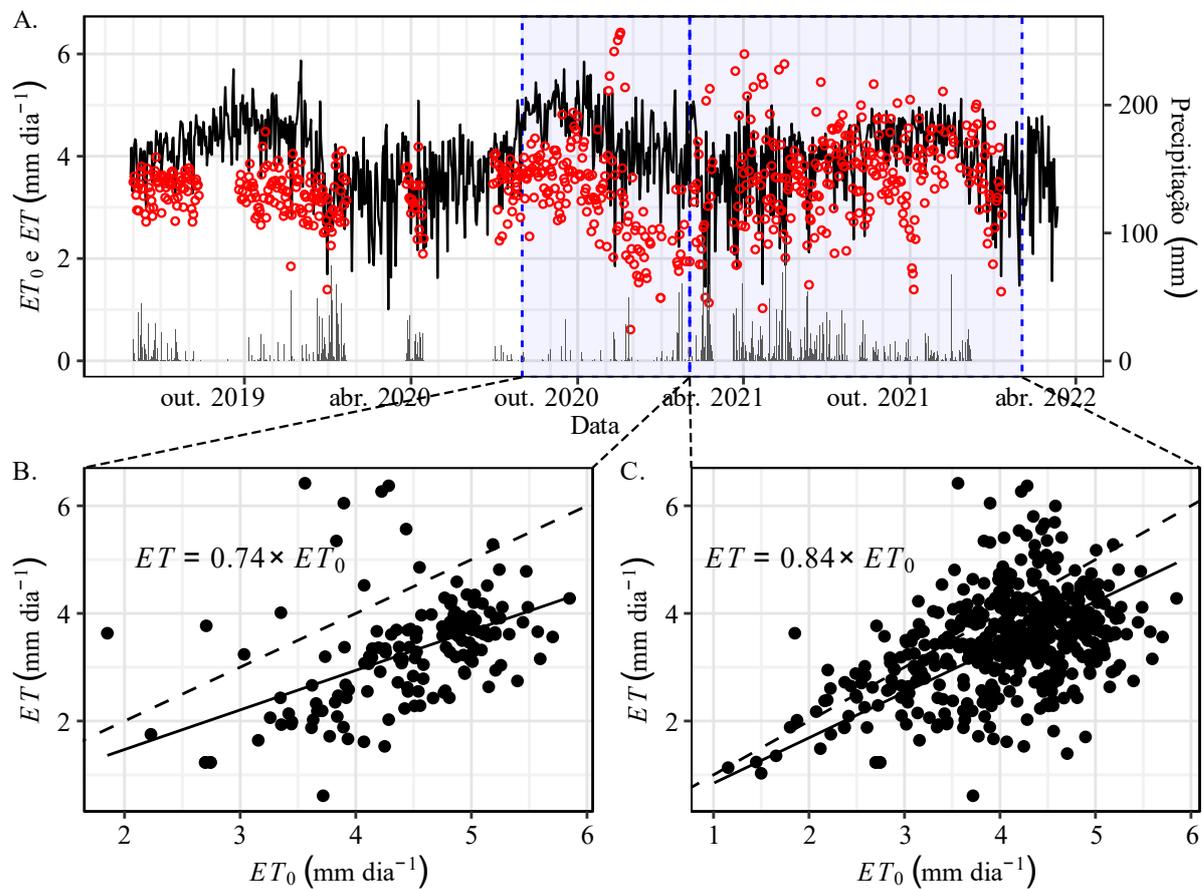


Figura 2.7 — (A) Comparação entre a evapotranspiração real (ET , pontos vermelhos) e a evapotranspiração de referência (ET_0 , linha), e precipitação (colunas) no período de junho de 2019 a março de 2022. (B) Comparação a evapotranspiração real (ET , eixo vertical) e a evapotranspiração de referência (ET_0 , eixo horizontal) no mesmo dia, com linha contínua mostrando a equação ajustada e linha tracejada mostrando a região onde $ET_0 = ET$, no período de agosto de 2020 a janeiro de 2021. (C) Mesmo que (B), só que no período de fevereiro de 2021 a janeiro de 2022. ET_0 : Evapotranspiração de referência; ET : evapotranspiração real da cultura. A evapotranspiração real no período anterior a agosto de 2020 é estimada por meio de regressão múltipla e por isso não foi utilizada no cálculo do K_c .

Conforme mostrado na Figura 2.7A, a evapotranspiração encontrada para a lima ácida Tahiti na pesquisa atual é geralmente inferior à ET_0 da região estudada, isto é, o K_c é menor

que 1,0. Marin *et al.* (2016) encontraram um K_c de 0,68 a 0,74 para a lima ácida Tahiti durante o verão, em Piracicaba, e Jamshidi *et al.* (2020) encontraram um K_c variando de 0,67 a 0,97 para laranja navelina (*Citrus sinensis*). O baixo coeficiente de cultura, mesmo quando as plantas são bem supridas de água, pode ser explicado pelo controle estomático da cultura. Pesquisas sobre as trocas gasosas da lima ácida Tahiti e espécies cítricas em geral mostram que seus estômatos tendem a se fechar em resposta ao ar seco, principalmente quando o déficit de pressão de vapor é superior a 1,5 kPa (SILVA *et al.*, 2018), mesmo quando as plantas estão bem supridas de água (SILVA *et al.*, 2018; RIBEIRO; MACHADO, 2007). Embora as medições de trocas gasosas (Tabela 2.1) realizadas em 2020 tenham sido conduzidas nas primeiras horas do dia, quando a umidade relativa tende a ser maior, foi observado que, em todas as medições, o déficit de pressão de vapor nas folhas foi superior a 1,5 kPa e, portanto, supõe-se que havia, neste período, um controle estomático sobre a evapotranspiração, ainda que as plantas fossem irrigadas.

Tabela 2.1 — Taxa de assimilação de carbono (A), transpiração (E) e condutância estomática (g_s) medida em nas plantas de lima ácida Tahiti em outubro de 2020.

A	E	g_s
($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
$9,51 \pm 2,71$	$1,71 \pm 0,65$	$94,4 \pm 44,5$

Embora a taxa de assimilação de carbono tenha sido baixa, está dentro da faixa normal encontrada para a taxa de assimilação de CO_2 de espécies cítricas encontrada na literatura científica. Para *C. sinensis*, uma taxa de assimilação abaixo de $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ foi encontrada para plantas com manejo nutricional adequado, e diminuiu abaixo de $5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com deficiência de Boro (YANG *et al.*, 2022). Em outro estudo com *C. sinensis*, relatou-se uma taxa máxima de assimilação de $11,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durante o verão em Piracicaba, na Região Sudeste do Brasil (RIBEIRO; MACHADO, 2007). A condutância estomática (g_s) apresentou grande variância, mas a média foi semelhante à (g_s) encontrada para limeiras ácidas jovens por Mira-García *et al.* (2021).

O aumento do K_c em 2021 (Figura 2.7C) em relação ao K_c calculado para o período menos chuvoso de 2020 (Figura 2.7B) pode estar relacionado à maior ocorrência de eventos de precipitação nesse período. Embora a umidade do solo estimada a partir dos dados de tensiometria tenha sido menor no período menos chuvoso de 2021 do que no mesmo período em 2020, destaca-se o fato de os tensiômetros terem sido instalados abaixo do dossel, região que é mais facilmente alcançado pela água de irrigação do que pela água da chuva, uma vez que o

dossel precisa ser saturado antes que a água atinja o solo. Por outro lado, a água da chuva molha toda a superfície e, portanto, pode aumentar a evapotranspiração das entrelinhas, que não são alcançadas pela água de irrigação. O mesmo ocorre no período mais chuvoso de 2021, quando não há irrigação, mas a evapotranspiração medida pelo método BREB não reduziu na mesma proporção que a evapotranspiração de referência, devido à grande quantidade de água pluvial nesta região, o que é evidenciado pela alta umidade.

2.4. CONCLUSÃO

1. Apesar de o albedo apresentar algumas variações ao longo do período de medição, de 2019 a 2021, pode-se adotar um valor de 0,13 para todo o período.
2. A incerteza dos fluxos medidos é maior durante a estação chuvosa do que durante a estação seca, devido ao aumento da frequência de chuvas na estação chuvosa.
3. Verificou-se um ligeiro aumento da evapotranspiração da lima ácida entre 2020 e 2021, mesmo sem irrigação em 2021.
4. O coeficiente de cultura da lima ácida Tahiti nas condições do experimento varia entre 0,74 e 0,84.

2.5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56). Disponível em: <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em 6 out. 2022.

ALLEN, R. G. *et al.* A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 81, n. 1–2, p. 1–22, 10 mar. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>. Acesso em: 14 out. 2022.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 6 out. 2022.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 151–155, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000400006>. Acesso em: 30 set. 2021.

BAGLEY, J. E. *et al.* The influence of land cover on surface energy partitioning and evaporative fraction regimes in the U.S. Southern Great Plains. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 5793–5807, 16 jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017JD026740>. Acesso em: 30 set. 2021.

BRUM, M. *et al.* Effects of irrigation on oil palm transpiration during ENSO-induced drought in the Brazilian Eastern Amazon. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 245, 106569, 28 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106569>. Acesso em: 30 set. 2021.

CAMPBELL SCIENTIFIC Inc. **CNR4 Net Radiometer Product Manual**. Rev. 6/2021, 48 p. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cnr4.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ELTAHIR, E. A. B.; HUMPHRIES JR., E. J. The role of clouds in the surface energy balance over the Amazon forest. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 18, n. 14, 18 dez. 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19981130\)18:14%3C1575::AID-JOC316%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19981130)18:14%3C1575::AID-JOC316%3E3.0.CO;2-U). Acesso em: 28 jul. 2022.

FARIA, T. O. *et al.* Surface albedo in different land-use and cover types in Amazon Forest region. **Revista Ambiente e Água**, [s. l.], v. 13, n. 2, e2120, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2120>. Acesso em: 16 out. 2022.

GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 892–898. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Acesso em: 27 nov. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>. Acesso em: 27 nov. 2021.

JAMSHIDI, S. *et al.* Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.] v. 227, 105838, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>. Acesso em: 20 maio 2022.

MARIN, F. R. *et al.* Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 163, p. 139–145, 1 jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.010>. Acesso em: 21 nov. 2021.

MOURA, M. M. *et al.* Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 651, parte 1, p. 1639–1651. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>. Acesso em: 28 jul. 2022.

MIRA-GARCÍA, A. B. *et al.* Evapotranspiration in young lime trees with automated irrigation. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 288, 110396, 15 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110396>. Acesso em: 7 ago. 2022.

NYEKI, S. *et al.* Trends in surface radiation and cloud radiative effect at four Swiss sites for the 1996–2015 period. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 19, p. 13227–13241, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-19-13227-2019>. Acesso em: 28 jul. 2022.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Historical El-Niño/La-Niña episodes (1950-present)**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 28 jul. 2022.

PEREZ, P. J. *et al.* Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 97, n. 3, p. 141–150, 18 nov. 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5). Acesso em: 30 set. 2021.

RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C. Some aspects of citrus ecophysiology in subtropical climates: re-visiting photosynthesis under natural conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 393–411, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400009>. Acesso em: 16 out. 2022.

SILVA, G. S. *et al.* Aluminum prevents stomatal conductance from responding to vapor pressure deficit in Citrus limonia. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 155, p. 662–671, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.017>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SOUZA, E. B. *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal brasileira: Clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 18, p. 293–306, jan./jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>. Acesso em: 30 set. 2021.

TANG, Y.; SUN, X.; WANG, H. Interannual Variation of the Bowen Ratio in a Subtropical Coniferous Plantation in Southeast China, 2003–2012. **Plos One**, [s. l.], v. 9, n. 2, 10 fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088267>. Acesso em: 30 set. 2021.

TÁVORA, B. E.; KOIDE, S. Event-Based Rainfall Interception Modeling in a Cerrado Riparian Forest — Central Brazil: An Alternative Approach to the IS Method for Parameterization of the Gash Model. **Water**, [s. l.], v. 12, n. 8, 2128. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3390/w12082128>. Acesso em: 16 out. 2022.

VANOMARK, G. M. M. S *et al.* Energy balance partitioning and evapotranspiration from irrigated Muskmelon under Semi-Arid Conditions. **Agrometeorology**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 168–180, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016453>. Acesso em: 30 set. 2021.

YANG, L. *et al.* Citrus Physiological and Molecular Response to Boron Stresses. **Plants**, [s. l.], v. 11, n. 1, 40, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11010040>. Acesso em: 5 maio 2022.

3. RESPOSTA DE PRODUTIVIDADE DE FRUTOS, FENOLOGIA E TROCAS GASOSAS DA LIMA ÁCIDA TAHITI EM DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Resumo: A lima ácida Tahiti é uma espécie cítrica de grande importância econômica no Brasil e no mundo. Em território brasileiro, a produção concentra-se nos estados de São Paulo e Pará, onde geralmente é enxertada em limão-cravo. Neste trabalho, objetivamos analisar o efeito de diferentes lâminas de irrigação ou da falta de irrigação sobre a produção de frutos, fenologia e trocas gasosas de tílias do Taiti enxertadas em citrumelo Swingle sob condições climáticas de floresta tropical úmida na Amazônia Oriental. Para atingir esse objetivo, foram realizados levantamentos periódicos de produtividade e floração durante dois anos consecutivos. A irrigação foi realizada durante o primeiro ano, com quatro lâminas de irrigação diferentes, rotuladas de T₁ a T₄, para manter o potencial matricial do solo – medido por tensiômetros – nas seguintes faixas: T₁ abaixo de -50 kPa, T₂ de -30 a -50 kPa, T₃ de -10 a -30 kPa e T₄ acima de -10 kPa. A taxa de assimilação de carbono (A), a condutância estomática (g_s) e a transpiração (E) foram medidas com um analisador de gases infravermelho. Os dados obtidos mostram que os frutos foram colhidos mais cedo nos tratamentos irrigados, e a produtividade aumentou de 2,22 para 6,89 kg por planta de T₁ para T₄. O peso médio dos frutos aumentou de 78,6 para 96,1 g de T₁ para T₄. A assimilação de carbono aumentou de 6,89 para 9,51 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ de T₁ para T₄.

Palavras-chave: produtividade, manejo da água, recursos hídricos, sustentabilidade.

Abstract: Tahiti lime is a citrus species of great economic importance in Brazil and worldwide. In Brazilian territory, production is concentrated in the states of São Paulo and Pará, where it is usually grafted onto Rangpur lime. In this work, we aim to analyze the effect of different irrigation depths or the lack of irrigation on the fruit yield, phenology, and gas exchange of Tahiti lime trees grafted onto Swingle citrumelo growing under tropical rainforest climate conditions in the Eastern Amazon. The use of citrumelo Swingle as a rootstock for Tahiti lime has been tested in the region due to its resistance to foot rot caused by *Phytophthora* spp., which is one of the most prevalent diseases in the regional citrus production. To achieve this objective, periodic surveys of productivity and flowering were carried out for two consecutive years. Irrigation was performed during the first year, with four different irrigation depths, labeled from T₁ to T₄, to keep the soil matric potential – measured by tensiometers – in the following ranges: T₁ below -50 kPa, T₂ from -30 to -50 kPa, T₃ from -10 to -30 kPa, and T₄ above -10 kPa. Carbon assimilation rate (A), stomatal conductance (g_s), and transpira-

tion (E) were measured with an infrared gas analyzer. The obtained data shows that fruits were harvested earlier in the irrigated treatments, and the yield increased from 2.22 to 6.89 kg per plant from T₁ to T₄. The average fruit weight increased from 78.6 to 96.1 g from T₁ to T₄. Carbon assimilation increased from 6.89 to 9.51 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ from T₁ to T₄.

Keywords: citriculture, water management, water resources, sustainability.

3.1. INTRODUÇÃO

A lima ácida Taiti é uma espécie cítrica que resulta da hibridização de um óvulo haploide de limão (*C. limon*) por um gameta diploide de lima mexicana (*C. aurantifolia*) (CURK *et al.*, 2016). Devido à sua característica triploide, os frutos não possuem sementes. Os dados de produção mundial de lima ácida Tahiti fornecidos pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) (2022) não diferenciam entre limas e limões, portanto, a localização precisa da produção mundial de lima ácida Tahiti é incerta. No entanto, Brasil e México são conhecidos por serem alguns dos maiores produtores desta espécie cítrica, que possui grande importância econômica para outros países da América Latina (CENTRE FOR THE PROMOTION OF IMPORTS FROM DEVELOPING COUNTRIES, 2018).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) mostram que a produção de frutos varia entre 3.165 e 36.559 kg ha⁻¹ entre os estados brasileiros, o que é uma diferença bastante significativa. A produção do país em 2019 foi de 1,51 milhão de toneladas, sendo o estado de São Paulo responsável por 74% desta produção. Apesar disso, o estado do Pará foi, nos últimos anos, o segundo maior produtor do país, com produção anual de 105 mil toneladas e produtividade média de 19.645 kg ha⁻¹. No estado do Pará, a colheita da lima ácida Tahiti concentra-se entre dezembro e abril (BARBARA *et al.*, 2021), com pico nos primeiros meses do ano. O período de menor oferta, por outro lado, ocorre no segundo semestre do ano entre julho e se estende até dezembro (BARBARA *et al.*, 2021; PINTO *et al.*, 2004). Entre agosto e novembro são registrados os maiores preços nos mercados regionais, ainda que frutos em todos os estádios de desenvolvimento possam ser encontrados nas árvores em qualquer período do ano.

De acordo com vários estudos, as características físicas dos frutos de *Citrus* spp., como peso e tamanho, são prejudicadas pelo déficit hídrico que ocorre nas fases iniciais do desenvolvimento dos frutos (CHEN *et al.*, 2022; BREMER NETO *et al.*, 2013), e as propriedades químicas são influenciadas quando o déficit hídrico ocorre em fases posteriores de desenvolvimento (CHEN *et al.*, 2022). A produção de frutos é significativamente influenciada pela

escolha do porta-enxerto e pela presença ou ausência de irrigação, com as árvores atingindo uma produtividade entre 51,5 e 169,8 kg por árvore sem irrigação, e entre 54,1 e 194,5 kg por árvore no sexto ano após o plantio com irrigação para lima ácida Tahiti (ESPINOZA-NÚÑEZ *et al.*, 2011). A densidade de plantio também é um fator determinante para a produção de frutos, com árvores atingindo 12,8 t ha⁻¹ em plantios de alta densidade (800 plantas ha⁻¹) e 6,64 t ha⁻¹ em densidade de plantio convencional (400 plantas ha⁻¹ para lima mexicana) (LADANIYA *et al.*, 2020).

Em resposta ao déficit hídrico, ar seco e estresse salino, as espécies cítricas fecham seus estômatos (SILVA *et al.*, 2018; RIBEIRO; MACHADO, 2007), reduzindo assim sua condutância estomática. A resposta estomática pode evitar grandes danos às plantas e perdas significativas de produtividade, mas pode diminuir a taxa de assimilação de carbono (WAGNER *et al.*, 2021). A taxa de assimilação de carbono é pequena para citros, mesmo em plantas bem irrigadas (RIBEIRO; MACHADO, 2007). Alguns valores relatados na literatura estão entre 5,5 e 7,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}_2 \text{ s}^{-1}$ para limão (*C. limon*) (WAGNER *et al.*, 2021); e entre 11,0 (RIBEIRO; MACHADO, 2007) e 15,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}_2 \text{ s}^{-1}$ para laranja (*C. sinensis*) (YANG *et al.*, 2022).

Ao longo deste trabalho, pretende-se analisar o efeito de diferentes lâminas de irrigação na produção de frutos, fenologia e trocas gasosas de lima ácida Tahiti enxertada em citrumelo Swingle crescendo sob condições de clima equatorial quente e úmido na Amazônia Oriental, com densidade de plantio (735 plantas ha⁻¹) acima da normalmente utilizada na região.

As seguintes hipóteses são testadas: (I) diminuir a irrigação diminuirá também a produtividade de frutos, (II) a maior produtividade de frutos será alcançada no tratamento com maior irrigação, (III) a fenologia das árvores não será influenciada pela irrigação, (IV) plantas estressadas fecharão seus estômatos como resposta ao estresse, e (V) parâmetros fisiológicos correlacionam-se bem com a produção de frutos e, portanto, podem ser usados como um indicador para prever a produção de frutos.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em um pomar irrigado de lima ácida Tahiti localizado no município de Capitão Poço, na porção oriental da Amazônia (Figura 6A-B). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como Am (ALVARES *et*

al., 2013). O pomar foi plantado em 2014 e o experimento foi realizado entre junho de 2020 e maio de 2021, portanto, quando o pomar tinha entre 6 e 7 anos.

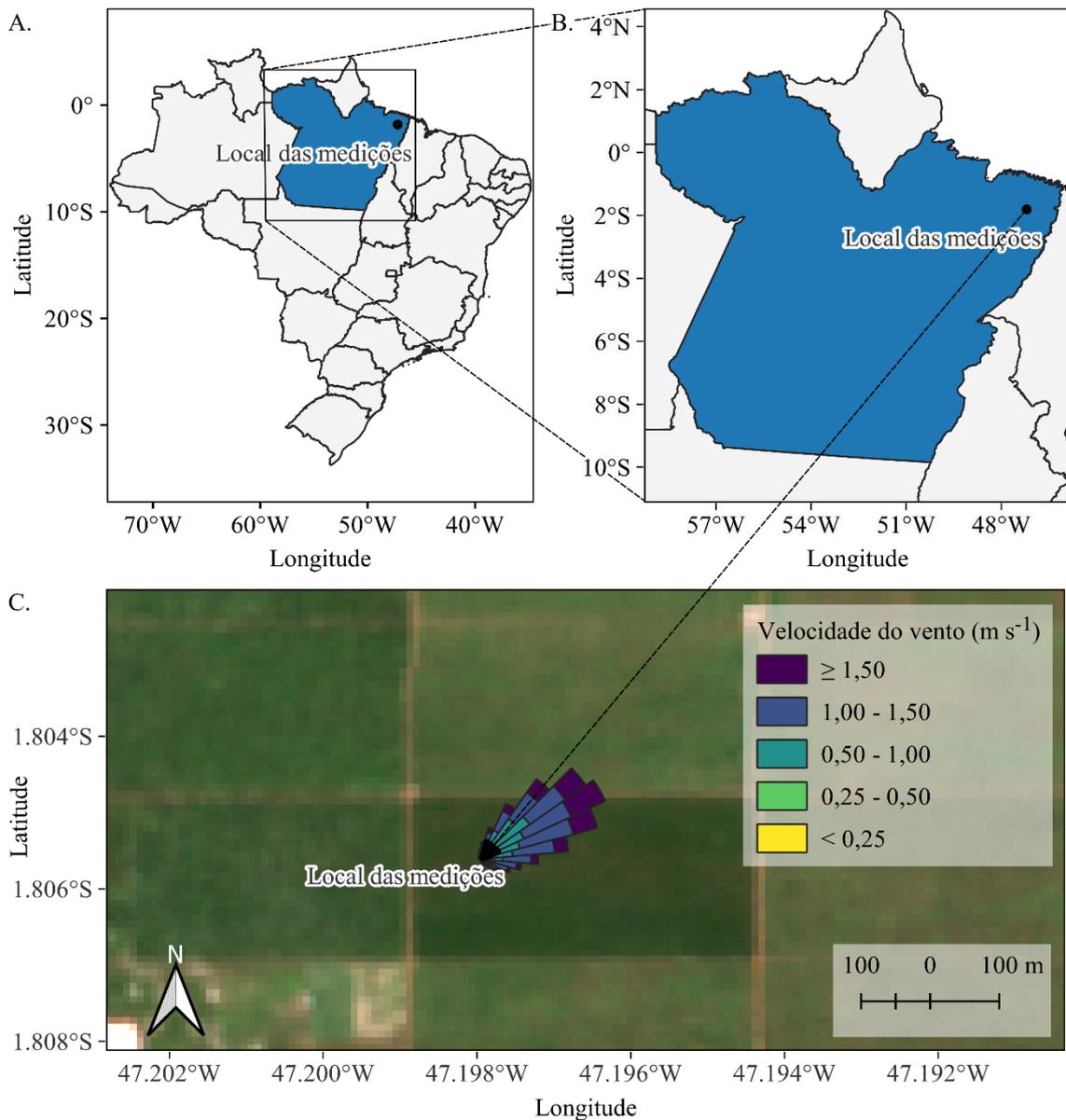


Figura 3.1 — Localização da torre micrometeorológica no pomar (ponto preto) e diagrama dos ventos para mostrar a distribuição de frequência da velocidade e direção do vento.

O pomar tem 250 m de largura (no eixo norte-sul) e 500 m de comprimento (no eixo leste-oeste). Está dividido em dois setores de irrigação, de 250×250 m cada, e as linhas de plantio seguem o sentido leste-oeste. O espaço entre as plantas na mesma linha é de 2,0 m, a distância entre as linhas é de 6,8 m e a altura média das árvores foi de $3,9 \pm 0,2$ m. O porta-enxerto utilizado foi citrumelo Swingle, porém, o porta-enxerto mais utilizado na região é o limão-cravo (STENZEL; NEVES, 2004). O citrumelo Swingle foi testado devido à sua resis-

tência à podridão radicular causada por *Phytophthora* spp. (DEWDNEY; JOHNSON, 2021), que é uma das doenças mais prevalentes em pomares de citros na região estudada.

3.2.1. Irrigação

Os tratamentos consistiram em fornecer diferentes lâminas de irrigação entre agosto e meados de novembro de 2020. A irrigação foi realizada por sistema de gotejamento, com vazão de 2,0 l h⁻¹ por emissor e espaçamento de 0,55 m entre emissores, o que resulta em 3,63 emissores por planta. A irrigação é realizada uma vez ao dia, nos meses acima mencionados. Cada evento de irrigação tem duração de 9,35 horas e, portanto, são fornecidos 68 litros de água para cada planta durante cada evento de irrigação. A evapotranspiração média de referência calculada conforme descrito por Allen *et al.* (1998) com dados registrados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (Brasil) localizada na região estudada durante a estação seca de 2020 está entre 4,0 e 6,0 mm dia⁻¹. O coeficiente de cultura das árvores cítricas varia entre 0,67 e 0,96 (JAMSHIDI *et al.*, 2020) ou 0,68 quando a evapotranspiração de referência é superior a 4,0 mm dia⁻¹ (MARIN *et al.*, 2019). A lâmina diária de irrigação, no entanto, é fixada conforme anteriormente descrito. A cada dia, a decisão de irrigar em cada tratamento foi baseada na tensão lida em tensiômetros instalados na área, conforme descrito a seguir.

Foram testados quatro tratamentos, marcados de T₁ a T₄. T₁ recebeu 115 mm de irrigação, T₂ recebeu 165 mm, T₃ recebeu 260 mm e T₄ recebeu 340 mm. A irrigação foi realizada em blocos ao acaso com 4 tratamentos e 5 blocos durante a estação menos chuvosa de 2020. A irrigação foi realizada para manter o potencial hídrico do solo nas seguintes faixas: T₁ abaixo de -50 kPa, T₂ de -30 a -50 kPa, T₃ de -10 a -30 kPa, e T₄ menor que 10 kPa, o que resulta na irrigação mencionada acima. As características de todos os tratamentos estão resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 — Principais características de cada tratamento.

Tratamento	h^1 (kPa)	Número de irrigações (dias)	Água fornecida por irrigação (m ³ planta ⁻¹)	Precipitação ² (mm)
T1	30,4 ± 22,2	23	1,56	138
T2	25,9 ± 16,6	33	2,24	138
T3	11,8 ± 6,8	52	3,54	138
T4	5,9 ± 3,0	68	4,62	138

¹ Potencial matricial médio do solo de setembro a novembro. ² Total de precipitação do início de julho até o final de outubro.

Como o experimento foi realizado em condições de campo, a tensão pode se elevar acima da faixa desejada na ocorrência de chuvas intensas, situação em que a irrigação é sus-

pensa para retornar ao nível desejado. Os efeitos de diferentes lâminas de irrigação nas árvores foram medidos por observações recorrentes de fenologia e produção de frutos até o final do primeiro semestre de 2021.

3.2.2. Produção de frutos e floração

Para a avaliação da produção de frutos e floração, as parcelas experimentais foram distribuídas aleatoriamente na área do experimento, uma parcela por combinação de tratamento e bloco, totalizando 20 parcelas experimentais. Cada parcela é constituída por uma área delimitada de 6 m de comprimento (ao longo das linhas) e 6,8 m de largura (perpendicular às linhas) contendo três plantas. Apenas os frutos que crescem dentro desta área foram contados ou colhidos. Frutos e flores foram contados em cada parcela no período de junho de 2020 a maio de 2021, com periodicidade variando de semanal a mensal. Quando os frutos atingiram as características para comercialização, foram colhidos e pesados com balança digital com precisão de 1 mg, e o diâmetro e comprimento dos frutos foram medidos com paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm.

3.2.3. Medições micrometeorológicas

Sensores de temperatura e umidade relativa do ar foram instalados a 2,0 m acima da copa das árvores. Um radiômetro líquido de quatro componentes modelo CNR4 da Campbell Scientific foi instalado 2 m acima do dossel e medições diárias da radiação global foram obtidas ao longo de dois anos, de janeiro de 2020 a dezembro de 2021. Os sensores foram instalados a cerca de 80 m do lado oeste e 100 m do lado norte do pomar de lima (Figura 3.1C). A precipitação foi medida por um pluviômetro eletrônico (modelo TB4 da Campbell Scientific Inc.) e a velocidade e direção do vento foram registradas por um anemômetro eletrônico (modelo 03001 R. M. Young Wind Sentry Set da Campbell Scientific Inc.), ambos instalados 2 m acima do dossel.

3.2.4. Umidade do solo

A umidade do solo foi estimada a partir do potencial matricial medido com tensiômetros instalados a 30 cm de profundidade. Em setembro de 2020 foram instalados quatro tensiômetros, um para cada tratamento no bloco 1. Os tensiômetros foram instalados abaixo da copa, alinhados às fileiras de árvores e a 1 m de distância do tronco. Amostras de solo não deformadas foram obtidas a cada 10 cm até 1 m de profundidade e replicadas em quatro posições diferentes dentro da área do experimento. As amostras foram expostas a tensões de 1, 2, 4, 6, 10, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa, e a umidade remanescente foi medida pesando as

amostras com balança de alta precisão. Após tais procedimentos, a equação de Genuchten (1980) (equação 3.1), foi ajustada aos dados obtidos. Os coeficientes da equação ajustada são mostrados na Tabela 3.2.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (3.1)$$

em que: h , potencial matricial do solo medido com o tensiômetro; coeficientes α , n e m da equação; θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r , θ_s , umidade volumétrica residual e saturada do solo, respectivamente. A umidade do solo na capacidade de campo θ_{fc} foi calculada pela equação 1 com $h = 10 \text{ kPa}$, e o ponto de murcha θ_{wp} foi considerado o mesmo que θ_r .

Tabela 3.2 — Características físicas do solo até 1 m de profundidade e coeficientes da equação de van Genuchten ajustada para cada camada de solo.

Profundidade	$\theta_r = \theta_{wp}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	α	n	m	θ_{fc} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Densidade aparente (g cm^{-3})
0,0 – 0,1 m	0,103	0,380	0,116	5,673	0,824	0,247	1,634
0,1 – 0,2 m	0,130	0,367	0,125	6,784	0,853	0,245	1,663
0,2 – 0,3 m	0,148	0,373	0,128	6,142	0,837	0,272	1,696
0,3 – 0,4 m	0,165	0,399	0,128	6,351	0,843	0,283	1,631
0,4 – 0,5 m	0,160	0,411	0,131	7,050	0,858	0,304	1,584
0,5 – 0,6 m	0,170	0,405	0,128	7,269	0,862	0,314	1,593
0,6 – 0,7 m	0,136	0,373	0,134	6,578	0,848	0,301	1,415
0,7 – 0,8 m	0,152	0,369	0,106	21,045	0,952	0,271	1,600
0,8 – 0,9 m	0,201	0,421	0,108	21,045	0,952	0,348	1,561
0,9 – 1,0 m	0,198	0,413	0,108	21,045	0,952	0,363	1,576

A produção de frutos foi comparada com a umidade relativa média do solo (θ_{rel} , equação 3.2), calculada como

$$0 \leq \theta_{rel} = \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}} \leq 1 \quad (3.2)$$

em que θ é a umidade volumétrica do solo (equação 3.1); θ_{wp} é a umidade do solo no ponto de murcha permanente e θ_{fc} é a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo.

3.2.5. Fertilidade do solo

Uma amostra composta de solo foi obtida no talhão do experimento em fevereiro de 2021 e submetida a análise de fertilidade básica, textura e micronutrientes no laboratório da Embrapa Amazônia Oriental, em Belém do Pará. Os resultados são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 — Resultados da análise de fertilidade do solo.

Camada (cm)	P — mg dm ⁻³ —	K — mg dm ⁻³ —	Na — mg dm ⁻³ —	Al — mg dm ⁻³ —	Ca — cmol _c dm ⁻³ —	Ca + Mg — cmol _c dm ⁻³ —	H + Al — cmol _c dm ⁻³ —	pH	Fe — mg dm ⁻³ —	Zn — mg dm ⁻³ —	Cu — mg dm ⁻³ —	Mn — mg dm ⁻³ —	Areia — % —	Silte — % —	Argila — % —
0 a 20	15,55	14,57	8,39	0,98	0,66	0,76	2,74	4,85	176,52	53,63	4,81	5,69	75	12	13

3.2.6. Medições de trocas gasosas

Em meados de outubro, durante a estação seca de 2020, quando a irrigação ainda estava sendo realizada, medidas da taxa de fotossíntese (A), condutância estomática (g_s) e taxa de transpiração (E), déficit de pressão de vapor das folhas (VPD_L) e do ar (VPD_A) foram medidos com um analisador de gases infravermelho LI-COR 6400XT. As medições foram feitas entre 6h e 9h (horário local), em folhas saudáveis totalmente expandidas encontradas no terço médio do dossel. Foram realizadas três coletas em diferentes posições na linha de plantio para cada combinação de tratamento e bloco, totalizando 60 árvores amostradas.

3.2.7. Análises estatísticas

Para fins práticos, um ciclo de produção completo (desde a floração até a colheita dos últimos frutos) foi considerado como um período de 12 meses que se inicia em junho (quando ocorre a floração principal) e se estende até maio do ano seguinte (quando quase todos os frutos já foram colhidos), com base nos dados observados. A produtividade acumulada por planta (Y — kg planta⁻¹) a cada mês foi obtida somando-se o peso de todos os frutos colhidos em cada parcela desde o início do ciclo de produção (junho) até o referido mês e dividindo-se o resultado por 3 — o número de plantas em cada parcela. O valor de Y entre os tratamentos para cada mês foi comparado pelo teste F e a média Y e por tratamento para cada mês foi comparada pelo teste de Tukey com 5% de significância.

Como a variável “número de flores por planta” não segue uma distribuição normal, foi utilizada a transformação $x'_i = \log_{10}(0,1 + x_i)$ antes da análise de variância e do teste de Tukey.

Análises de regressão e testes de correlação foram realizados com os seguintes pares de variáveis: Y e h , Y e θ_{rel} , Y e g_s , Y e A , Y e E , A e g_s , A e E . As relações mais significativas são apresentadas e discutidas.

3.3. RESULTADOS

Uma diminuição da frequência e intensidade das chuvas foi observada em meados de junho durante a safra 2020-2021 (Figura 3.2). O período menos chuvoso terminou após meados de outubro de 2020, com a ocorrência de chuvas superiores a 15 mm.

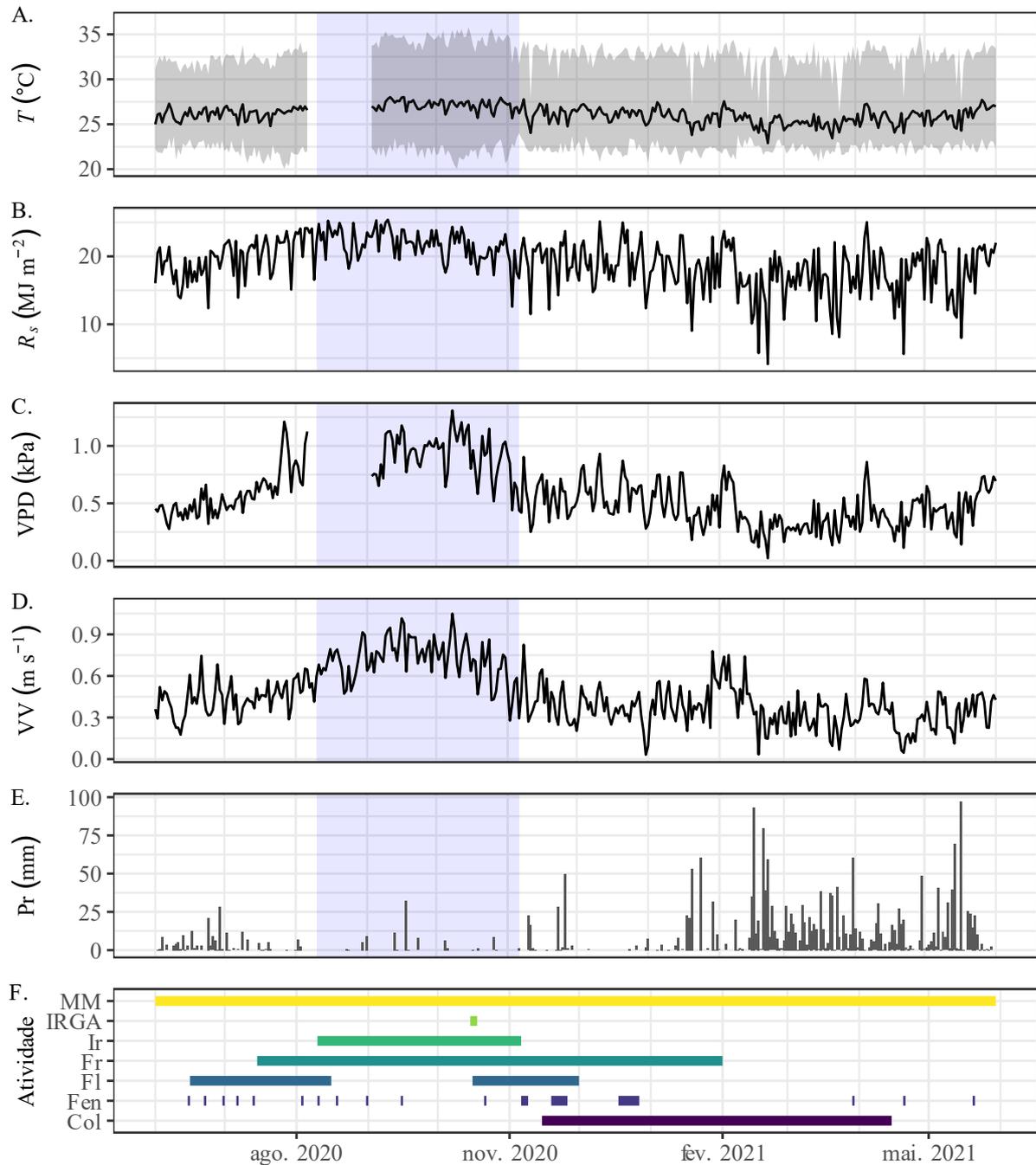


Figura 3.2 — Condições climáticas de junho de 2020 a maio de 2021 e linha do tempo do experimento. O período irrigado é marcado com a cor azul nas figuras A, B, C, D e E. As variáveis apresentadas são: temperatura média, máxima e mínima diária (T , figura A); radiação solar global (R_s , figura B); déficit de pressão de vapor (VPD, figura C); velocidade média do vento (VV, figura D); precipitação (Pr, figura E) e linha do tempo do experimento (figura F), onde: MM — período das medições micrometeorológicas, IRGA — período de medições com o leitor de gases infravermelho, Ir — irrigação, Fr — período de frutificação, Fl — período de floração, Fen — períodos de observações da fenologia, Col — período de colheita dos frutos.

A alta quantidade de chuvas na estação chuvosa de 2021 pode ser explicada pela ocorrência de La-Niña de média intensidade que começou no final de 2020 e persistiu durante a maior parte de 2021, bem como durante o primeiro semestre de 2022 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERE ADMINISTRATION, 2022), uma vez que o La-Niña é conhecido

por aumentar a precipitação na maior parte da Bacia Amazônica, bem como diminuir a temperatura média do ar (MOURA *et al.*, 2019). A temperatura média do ar durante a estação seca de 2020 foi de 27,2 °C entre setembro e outubro, o déficit médio de pressão de vapor foi de 0,97 kPa e a radiação global total de todos os dias do período foi de 2659,8 MJ m⁻².

Embora a umidade do solo pareça semelhante entre T₁, T₂ e T₃ (Figura 3.3A, C, E e G) e, o potencial matricial médio alcançado por T₁ e T₂ (Figura 3.3B e D) foi muito inferior ao potencial matricial médio de T₃ e T₄ (Figura 3.3F e H) — que são os tratamentos com as maiores lâminas de irrigação.

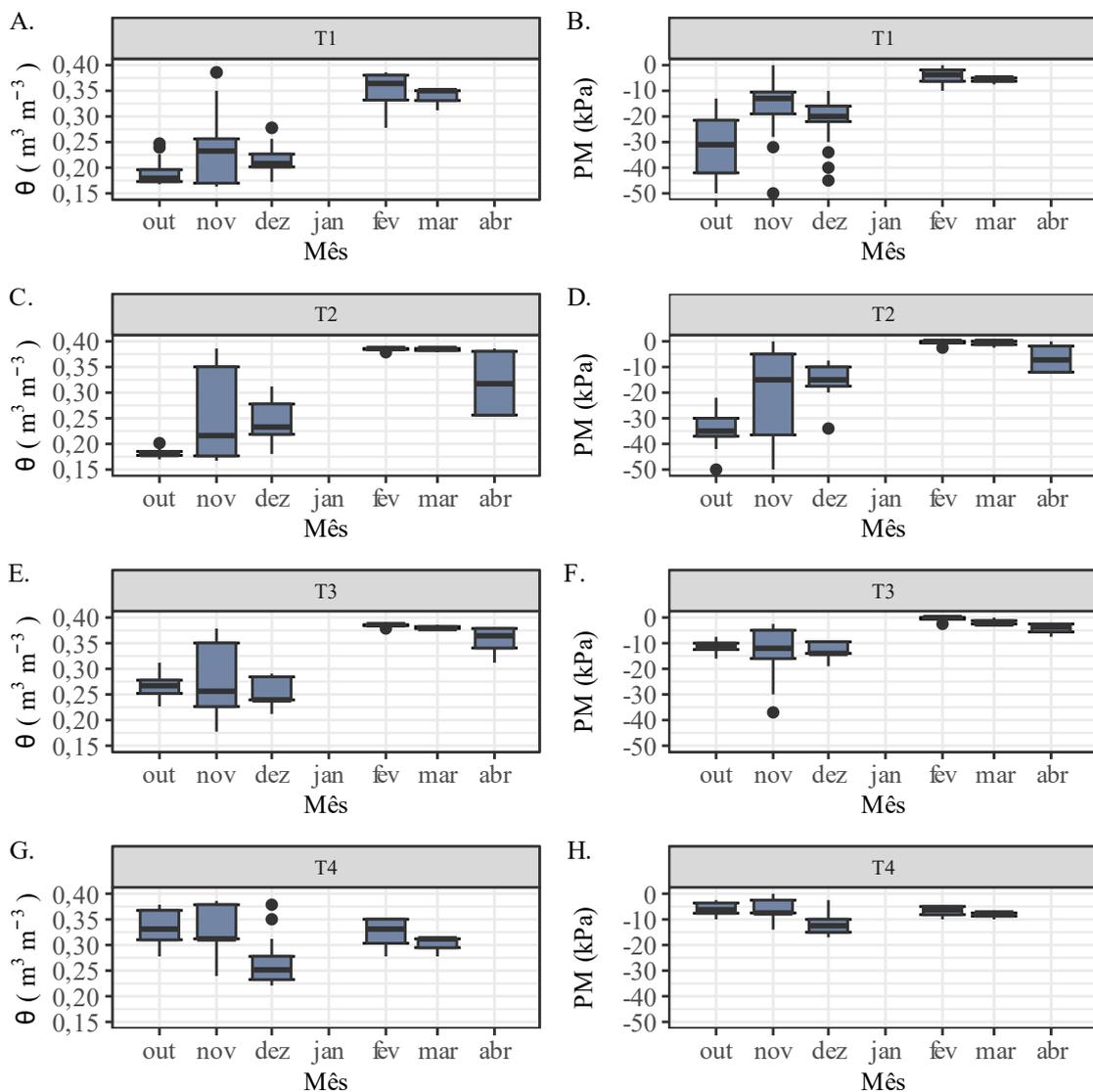


Figura 3.3 — Variação da umidade volumétrica (θ) estimada (figuras A, C, E e G) e potencial matricial (PM) medido (figuras B, D, F e H) obtido com tensiômetros.

3.3.1. Floração e desenvolvimento dos frutos

Foram observados dois períodos anuais de floração intensa: o primeiro ocorre em meados de junho e o segundo entre o final de outubro e o início de novembro. Estes períodos de floração são destacados na Figura 3.4.

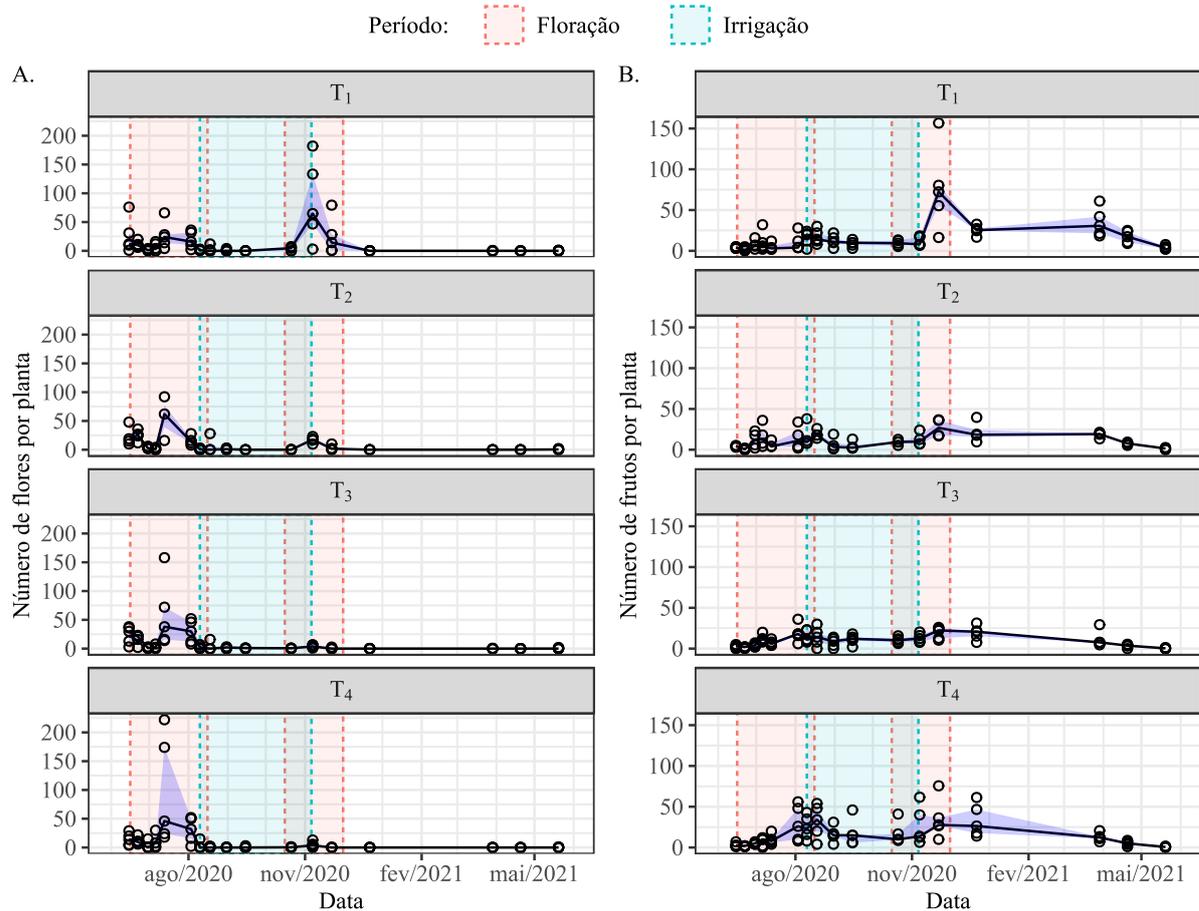


Figura 3.4 — Contagem de flores (a) e frutos (b) por árvore para cada tratamento. A região delimitada em azul em torno da linha contínua indica o intervalo entre o 1º quartil e 3º quartil dos dados.

A primeira floração anual coincide com o final da estação chuvosa, mas pode ter sido estimulada por práticas de manejo, como a poda de árvores que é realizada no início de junho de cada ano, uma vez que a poda é normalmente usada para induzir a floração da lima ácida Tahiti (LAMBERT *et al.*, 2015). Os dados de contagem de flores em T₄ durante a primeira floração de 2020-2021 (Figura 10A) podem causar a impressão de que T₃ e T₄ tiveram maior número de flores que T₁ e T₂, porém, é importante destacar que a variabilidade entre plantas é extremamente alta e, portanto, não foi encontrada significância para a diferença no número médio de flores entre os tratamentos nesse período (primeira floração), o que é desejável, tendo em vista que não havia diferenciação entre os tratamentos até agosto de 2020, quando se inicia a irrigação.

Por outro lado, a segunda floração anual ocorre com o início da estação chuvosa e diferenças significativas foram observadas entre os tratamentos (Tabela 3.4), com aumento do número de flores à medida que a irrigação diminui. Esta floração ocorreu poucos dias após a ocorrência de chuvas intensas em meados de outubro.

Tabela 3.4 — Média da contagem de flores e frutos por planta para cada tratamento em 7 de novembro de 2020. As letras indicam uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) na contagem transformada de flores entre os tratamentos de acordo com o teste de Tukey. Os números mostrados na tabela são os valores originais, isto é, sem nenhuma transformação.

Tratamento	Número de flores (Flores por planta)	Número de frutos (Frutos por planta)
T ₁	85,9 a	11,5 a
T ₂	17,0 ab	12,8 a
T ₃	4,0 b	13,1 a
T ₄	4,8 b	26,9 a

Para fins de comparação, a figura apresenta uma comparação entre as distribuições de frequência de dados de número de flores e número de frutos no dia 6 de novembro de 2020 dos dados originais ($y = x$), e dos dados transformados por meio de raiz quadrada e também com a transformação utilizada neste trabalho. Percebe-se que a transformação utilizada neste trabalho foi a única que resultou em uma distribuição normal.

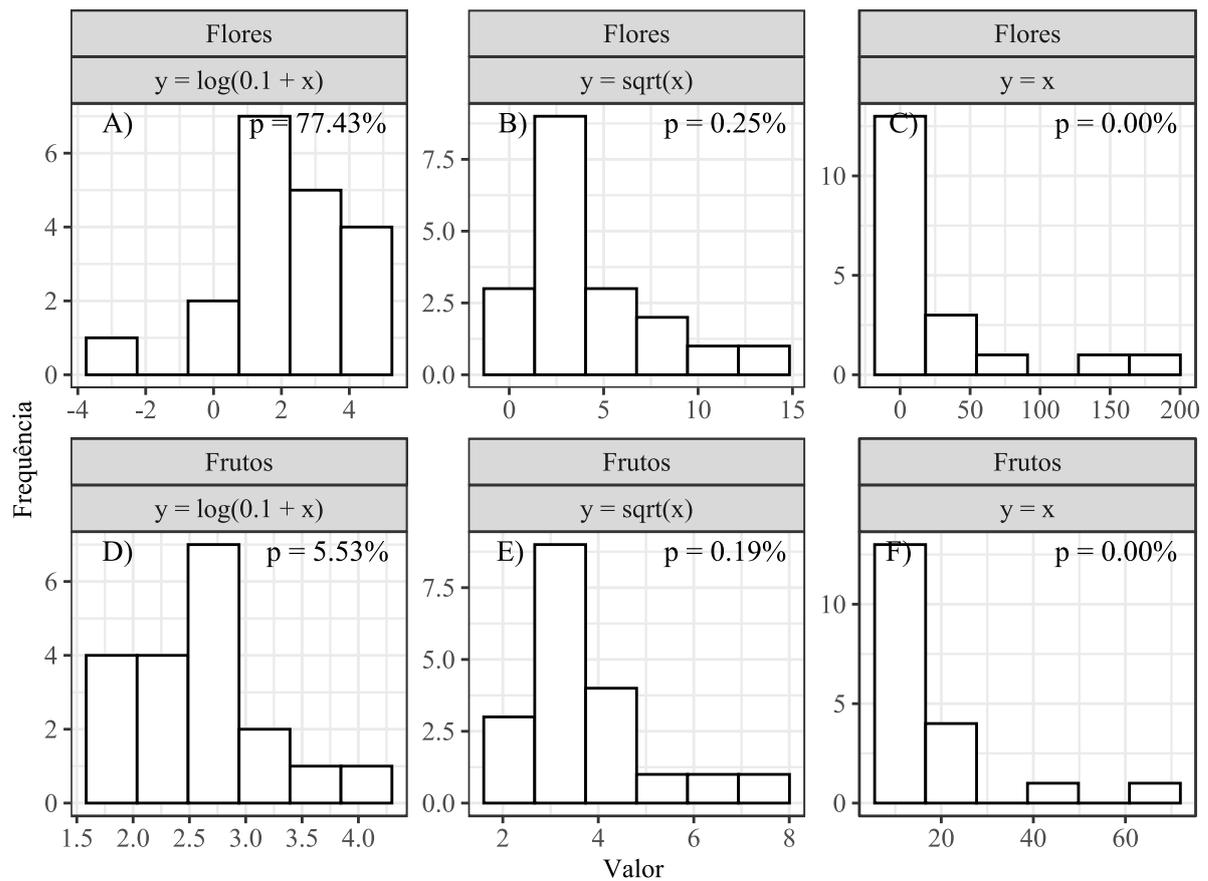


Figura 3.5 — Histogramas de frequência para as variáveis número de flores (figuras A, B e C) e número de frutos (figuras D, E e F) utilizando diferentes transformações. Nas figuras A e D se tem a distribuição utilizada no presente trabalho. Nas figuras B e E, uma transformação por raiz quadrada, frequentemente utilizada neste tipo de situação. Nas figuras C e F são apresentados os dados não transformados. O valor de p é referente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, onde $p > 5\%$ indica distribuição normal.

3.3.2. Produtividade de frutos

Não foi observada diferença significativa entre os tratamentos após fevereiro de 2021 em relação ao rendimento total de frutos acumulado de junho de 2020 a fevereiro de 2021. No entanto, o rendimento de frutos acumulado até fevereiro de 2021 (Y_1 na Tabela 3.5) difere significativamente entre os tratamentos ($p < 0,05$), sendo maior para os tratamentos com maior lâmina de irrigação. Por outro lado, a produtividade total entre março de 2021 e junho de 2021 foi geralmente maior para os tratamentos com menor irrigação, mas sem diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) (Y_2 na Tabela 3.5).

Tabela 3.5 — Produtividade média (Y), peso (W), diâmetro (D) e comprimento (L) dos frutos colhidos nos diferentes tratamentos. Y_1 é a média do peso total de frutos colhidos por árvore de junho de 2020 a fevereiro de 2021, e Y_2 é a média do peso total de frutos colhidos de março a maio de 2021. W , D e L são referentes aos frutos colhidos de junho a fevereiro do ano seguinte. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Treatamento	Y_1 (jun-fev) (kg planta ⁻¹)	Y_2 (mar-mai) (kg planta ⁻¹)	W (g)	D (mm)	L (mm)
-------------	---	---	------------	-------------	-------------

Tratamento	Y_1 (jun-fev) (kg planta ⁻¹)	Y_2 (mar-mai) (kg planta ⁻¹)	W (g)	D (mm)	L (mm)
T ₁	2,83 ± 1,05 a	5,53 ± 0,92 a	78,6 ± 17,8 a	52,6 ± 4,31 a	56,0 ± 4,62 a
T ₂	4,11 ± 1,11 ab	3,25 ± 0,25 a	86,3 ± 21,4 b	53,8 ± 4,37 bc	58,0 ± 5,77 b
T ₃	4,15 ± 1,31 ab	1,86 ± 1,71 a	90,3 ± 27,4 bc	54,7 ± 5,40 cd	57,7 ± 6,45 b
T ₄	6,89 ± 3,11 b	2,06 ± 0,83 a	92,1 ± 22,9 c	55,1 ± 5,69 d	58,2 ± 5,56 b

O peso e tamanho dos frutos colhidos até fevereiro também foram significativamente influenciados (colunas W , D e L da Tabela 3.5) pela disponibilidade hídrica nos tratamentos irrigados (T₁ – T₄) entre junho de 2020 e fevereiro de 2021. Frutos nos tratamentos com maior irrigação também apresentaram maior peso e maiores dimensões que os frutos nos tratamentos menos irrigados (compare W , D e L para T₁ e T₄ na Tabela 3.5).

Como o déficit hídrico nos tratamentos com as menores lâminas de irrigação (T₁, T₂) começou em agosto de 2020, logo após a primeira floração anual, os frutos sofreram déficit hídrico severo durante seu desenvolvimento inicial (veja umidade do solo e potencial matricial na Figura 3.3, e medições de chuva na Figura 3.2E). Esses achados concordam com conclusões de outros autores de que o déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial dos frutos afeta suas características físicas (CHEN *et al.*, 2022).

3.3.3. Resposta fisiológica

Os tratamentos com menor lâmina de irrigação em 2020 também tiveram a menor taxa de assimilação de carbono (Tabela 3.6) de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Foram encontradas correlações significativas ($p < 0,05$) entre todos os possíveis pares de variáveis da Tabela 3.6 (A e E , A e g_s , E e g_s). No entanto, a dispersão de pontos é alta para E e para g_s , portanto não foi observada diferença significativa para tais variáveis entre os tratamentos.

Tabela 3.6 — Média da taxa de assimilação de carbono (A), transpiração (E) e condutância estomática (g_s) e seu respectivo desvio padrão medido para cada tratamento em 15 de outubro de 2020. Letras diferentes após o número indicam diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos.

Tratamento	A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	g_s ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
T ₁	6,89 ± 2,39 a	1,46 ± 1,45 a	0,0781 ± 0,0836 a
T ₂	7,99 ± 2,21 ab	1,54 ± 0,92 a	0,0796 ± 0,0508 a
T ₃	10,0 ± 2,66 b	1,68 ± 0,85 a	0,0879 ± 0,0484 a
T ₄	9,51 ± 2,71 b	1,71 ± 0,65 a	0,0944 ± 0,0445 a

A regressão linear entre A e E e entre A e g_s resultou nas equações apresentadas na Tabela 3.7, todas estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

Tabela 3.7 — Todos os coeficientes de regressão e seus respectivos intervalos de confiança, bem como o coeficiente de determinação (R^2) calculado para cada regressão. ¹Variável resposta. ²Variável explicativa.

Resp. ¹	Exp. ²	Coeficiente linear	Coeficiente angular	R^2
A	g_s	$6,60 \pm 1,11$	$23,67 \pm 10,80$	0,24
A	E	$6,28 \pm 1,16$	$1,46 \pm 0,62$	0,27

A forte correlação entre A e E , e A e g_s sugere que tanto E quanto g_s podem se correlacionar bem com a disponibilidade hídrica, apesar de nenhuma significância ter sido encontrada entre a disponibilidade hídrica e tais variáveis. Embora a taxa de assimilação de CO_2 (aproximadamente $9,51 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no tratamento mais irrigado) encontrada neste estudo seja baixa para plantas bem irrigadas, ela é coerente com a taxa de assimilação de CO_2 encontrada na literatura científica para citros em geral. Para laranja (*C. sinensis*) uma taxa de assimilação entre $11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (RIBEIRO; MACHADO, 2007) e $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (YANG *et al.*, 2022) é relatada.

3.3.4. Relações entre produtividade, umidade do solo, potencial matricial, e trocas gasosas

Boas correlações lineares foram encontradas entre a produtividade média de frutos (Y – kg planta^{-1}) e o potencial matricial do solo (h – kPa), bem como entre a umidade relativa do solo (θ_{rel}) e Y , sendo o coeficiente angular de ambas as equações significativo ($p < 0,05$) de acordo com a análise de regressão (Tabela 4).

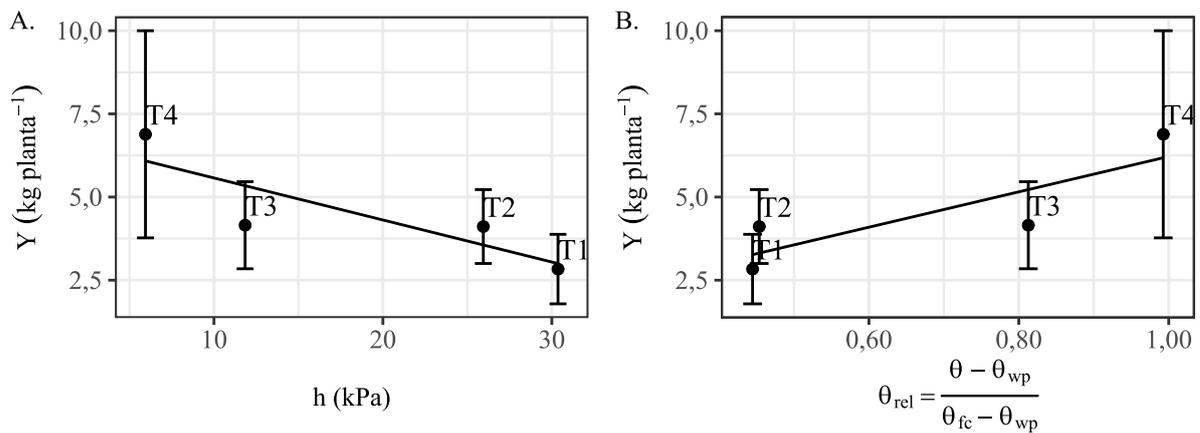


Figura 3.6 — Regressão linear entre a produtividade de frutos (Y – kg planta^{-1}) e (A) o potencial matricial do solo medido com tensiômetros, e (B) entre Y e a umidade relativa do solo (θ_{rel}).

Cabe destacar que a umidade relativa média do solo em T_2 parece muito próxima a T_1 (Figura 3.6B) para considerar ambos como tratamentos diferentes. No entanto, o fluxo de água no contínuo solo-planta-atmosfera é impulsionado por potenciais hídricos (BRODRIBB; MENCUCINI, 2017), que parece diferir bastante entre os tratamentos, conforme mostrado na Figura 3.6A. A eficiência da estratégia de irrigação e recomendações baseadas no potencial

matricial do solo já foi demonstradas em outros experimentos com diferentes culturas como arroz (KULMAR *et al.*, 2017) e morango (LÉTOURNEAU *et al.*, 2015). Além disso, a redução da produtividade de frutos foi consistente entre os tratamentos com diminuição da oferta de água durante o período de crescimento dos frutos (ou seja, T_1 e T_2), o que reforça a hipótese de que a produtividade e as características dos frutos foram prejudicadas pelo déficit hídrico experimentado pelas plantas nestes tratamentos.

3.3.5. Relações entre produtividade, massa de frutos e parâmetros de trocas gasosas

Embora tanto a produtividade de frutos acumulada até fevereiro quanto os parâmetros de trocas gasosas, como taxa de assimilação de carbono, transpiração e condutividade estomática, tenham aumentado juntamente com a lâmina de irrigação, não foi encontrada correlação entre os parâmetros de troca gasosa e a produtividade, tamanho ou dimensões dos frutos de cada parcela e a média de A , E ou g_s da parcela. Isto pode ser devido à alta dispersão encontrada para os parâmetros de trocas gasosas em geral. Por exemplo, o coeficiente de determinação R^2 para a relação A e g_s foi 0,24, e para A e E , 0,27 (Tabela 3.7). Além disso, alta variabilidade foi observada para a produção de frutos, mesmo para parcelas no mesmo tratamento. O coeficiente de variação para Y_1 em T_4 (Tabela 3.5) foi de 0,45 e para T_1 , 0,37. Isso sugere que mais repetições podem ser necessárias para afirmar que A , E ou g_s se correlacionam com a produção de frutos e as características físicas medidas dos frutos.

3.4. DISCUSSÃO

Em várias espécies cítricas, incluindo o lima ácida Tahiti, a floração é induzida por uma variedade de condições estressantes e sua intensidade é proporcional à intensidade do fator estressor (GARMENDIA *et al.*, 2019). Sabe-se que a floração pode ser aumentada pelo déficit hídrico (KOSHITA; TAKAHARA, 2004) e baixas temperaturas (SOUTHWICK; DAVENPORT, 1986). Por outro lado, a aplicação de giberelinas inibe a floração e aumenta a conversão de flores em frutos (GARMENDIA *et al.*, 2019). Tais técnicas têm sido utilizadas no manejo da floração e para induzir a produção de frutos no período de maiores preços.

Enquanto a primeira floração anual observada no experimento pode estar relacionada a práticas de manejo como a poda de árvores, conforme discutido anteriormente, a segunda floração parece estar relacionada às mudanças no clima e na disponibilidade hídrica na transição do período menos chuvoso para o período mais chuvoso, no final de outubro. Isso poderia explicar por que a floração aumenta com a redução da irrigação.

A irrigação resultou em frutos mais pesados e maiores, e aumentou a produtividade. Um comportamento semelhante já foi encontrado em outros experimentos com espécies cítricas (AL-ROUSAN *et al.*, 2012). Na safra 2020-2021, foram colhidas quantidades razoáveis de frutos entre outubro e dezembro. Os frutos colhidos nesses meses, no início da estação chuvosa e logo após o período irrigado, provavelmente se desenvolverem ao longo da estação seca, de modo que a irrigação exerceu papel fundamental no seu desenvolvimento e nas suas características finais, como peso e tamanho.

A redução da taxa de assimilação de carbono (A) com a redução da irrigação no período 2020-2021 é esperada. Valores de A variando entre 6,89 e 10,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ estão dentro da faixa de valores encontrada em outros estudos (RIBEIRO; MACHADO, 2007) e são baixos como esperado para uma planta perene com metabolismo fotossintético C_3 (WANG *et al.*, 2012), como a lima ácida Tahiti.

A condutância estomática foi inversamente proporcional ao VPD_L , com coeficiente de correlação $r = -0,61 \pm 0,19$ (coeficiente de correlação \pm intervalo de confiança, $p < 0,05$). Em citros, os estômatos são fechados em resposta ao ar seco (SILVA *et al.*, 2018) principalmente quando o VPD_L está acima de 1,5 kPa (RIBEIRO; MACHADO, 2007) — mesmo em plantas bem irrigadas. Este (ou seja, $\text{VPD}_L > 1,5$ kPa) foi o caso de 58 de 59 (mais de 98%) amostras neste estudo, durante a estação menos chuvosa de 2020. Portanto, espera-se que a condutância estomática seja baixa mesmo para os tratamentos com maior lâmina de irrigação. A alta VPD_L associada à baixa g_s podem diminuir A para todos os tratamentos, uma vez que A também se correlaciona positivamente com g_s (Tabela 3.6), com coeficiente de correlação $r = 0,50 \pm 0,17$ ($p < 0,05$). O alto VPD_L provavelmente está relacionado à escassez de água da chuva no período menos chuvoso de 2020, bem como as temperaturas mais altas do ar no mesmo período, uma vez que o VPD_L também se correlaciona bem com o VPD_A ($r = 0,95 \pm 0,02$, $p < 0,05$).

A produção de frutos obtida é baixa. De acordo com o IBGE (2022), a produtividade média de frutos por área alcançada pelos produtores de limões Tahiti na região estudada foi de 19,65 t ha^{-1} em 2019, e 28,15 t ha^{-1} em 2020, portanto muito superior à produtividade obtida no presente estudo, que variou entre 4,42 e 6,15 t ha^{-1} entre os tratamentos na safra 2020-2021. Três fatores podem contribuir para a baixa produtividade obtida: (I) o uso do citrumelo Swingle como porta-enxerto, uma vez que a maioria dos agricultores da região utiliza o limão-cravo. A lima ácida taiti foi relatada como menos produtiva quando enxertada em citrumelo Swingle do que quando enxertada em limão-cravo (CANTUARIAS-AVILÉS *et al.*,

2012); (II) o alto déficit de pressão de vapor em 2020 pode ter alguma influência na abertura estomática, o que pode prejudicar a assimilação de carbono e reduzir a produção de frutos, como discutido acima, mesmo nos tratamentos bem irrigados; e (III) as características do solo.

3.5. CONCLUSÕES

1. O rendimento de frutos no tratamento com maior nível de irrigação foi mais que o dobro do rendimento obtido no tratamento com menor nível de irrigação durante o início do período de colheita (até fevereiro).
2. Não foram observadas diferenças significativas no rendimento de frutos acumulado ao longo de ano (de junho a maio do ano seguinte) entre os diferentes níveis de irrigação testados.
3. A produção começou a ser colhida mais precocemente nos tratamentos com maiores níveis de irrigação.
4. Frutos produzidos no tratamento com maior nível de irrigação foram, em média, 17% mais pesados, tiveram um diâmetro 4,8% maior e um comprimento axial 3,9% maior, que frutos produzidos no tratamento com menor nível de irrigação.
5. A taxa de assimilação de carbono reduziu em 27,5% do tratamento com maior nível de irrigação para o tratamento com menor nível de irrigação.

3.6. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56). Disponível em: <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em 6 out. 2022.

AL-ROUSAN, W. M. M. *et al.* Impact of different irrigation levels and harvesting periods on the quantity and quality of Navel oranges (*Citrus sinensis*) and fruit juice. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 115–119, 2012.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 20 abr. 2022.

BARBARA, G. *et al.* Use of Plant Regulators in the Off-Season Flower Induction of 'Tahiti' Acid Lime and 'Ponkan' Mandarin. **American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 50–59, 13 dez. 2021.

Disponível em:

https://www.asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/7243.

Acesso em: 10 April 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em 20 abr. 2022.

BREMER NETO, H. *et al.* The horticultural performance of five ‘Tahiti’ lime selections grafted onto ‘Swingle’ citrumelo under irrigated and non-irrigated conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 150, p. 181–186, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.010>. Acesso em: 6 maio 2022.

BRODRIBB, T.; MENCUCINI, M. Plant Physiology and Development. In: THOMAS, B.; MURRAY, B. G.; MURPHY, D. J. **Encyclopedia of Applied Plant Sciences**, 2. ed., Londres: Elsevier, 2017. p. 141–148. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00074-5>. Acesso em: 5 maio 2022.

CANTUARIAS-AVILÉS, T. *et al.* Rootstocks for high fruit yield and quality of ‘Tahiti’ lime under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 142, p. 105-111, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.008>. Acesso em: 20 abr. 2022.

CENTRE FOR THE PROMOTION OF IMPORTS FROM DEVELOPING COUNTRIES (Países Baixos). **Exporting fresh limes to Europe**, 24 out. 2018. Disponível em: <https://www.cbi.eu/market-information/fresh-fruit-vegeTabelas/limes>. Acesso em: 25 fev. 2021.

CHEN, F. *et al.* Effects of water deficit at different growth stages under drip irrigation on fruit quality of citrus in the humid areas of South China. **Agricultural Water Management**, [s. l.] v. 262, 31 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107407>. Acesso em: 5 maio 2022.

CURK, F. *et al.* Phylogenetic origin of limes and lemons revealed by cytoplasmic and nuclear markers. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 117, n. 4, p. 565–583, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcw005>. Acesso em: 23 jul. 2021.

DEWDNEY, M. M.; JOHNSON, E. Phytophthora Foot Rot, Crown Rot, and Root Rot. In: DIEPENBROCK, M. *et al.* **2021–2022 Florida Citrus Production Guide**, rev. 3. Flórida: University of Florida, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.32473/edis-cg009-2021>. Acesso em: 23 maio 2022.

ESPINOZA-NÚÑEZ, E. *et al.* Performance of ‘Tahiti’ lime on twelve rootstocks under irrigated and non-irrigated conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 129, n. 2, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.032>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **Faostat**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

GARMENDIA, A. *et al.* Gibberellic acid in Citrus spp. flowering and fruiting: A systematic review. **Plos One**, [s. l.], v. 14, n. 9, e0223147, p. 1–24, 26 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223147>. Acesso em: 20 abr. 2022.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Acesso em: 20 abr. 2022.

JAMSHIDI, S. *et al.* Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, [s. l.] v. 227, 105838, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>. Acesso em: 20 maio 2022.

KOSHITA, Y.; TAKAHARA, T. Effect of water stress on flower-bud formation and plant hormone content of satsuma mandarin. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 99, n. 3-4, p. 301-307, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(03\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00113-4). Acesso em: 5 April 2022.

KULMAR, A. *et al.* Physiological and morphological responses of four different rice cultivars to soil water potential based deficit irrigation management strategies. **Field Crop Research**, [s. l.], v. 205, p. 78-94, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.026>. Acesso em: 19 April 2022.

LADANIYA, M. S. *et al.* A. High density planting studies in acid lime (*Citrus aurantifolia* Swingle). **Scientia Horticulturae**, [s. l.] v. 261, 108935, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108935>. Acesso em: 6 maio 2022.

LAMBERT, G. F. *et al.* Behavior patterns related to the agricultural practices in the production of Persian lime (*Citrus latifolia* Tanaka) in the seasonal orchard. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 116, p. 162-172, ago. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.007>. Acesso em: 20 abr. 2022.

LÉTOURNEAU, G. *et al.* Matric potential-based irrigation management of field-grown strawberry: Effects on yield and water use efficiency. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 161, p. 102-113, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.005>. Acesso em: 20 apr. 2022.

MARIN, F. R. *et al.* Revisiting the crop coefficient-reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 138, p. 1785-1793, 9 jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02940-7>. Acesso em: 11 maio 2022.

MOURA, M. M. *et al.* Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration, and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 651, parte 1, p. 1639-1651, 15 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>. Acesso em: 4 abr. 2022.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERE ADMINISTRATION. **El Niño Southern Oscillation**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>. Acesso em 23 maio 2022.

PINTO, A. C. Q.; SOUSA, E. S.; RAMOS, V. H. V. **Tecnologia de produção e comercialização da lima ácida ‘Tahiti’, da goiaba e do maracujá-azedo para o Cerrado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, 69 p. (Documentos, n. 111). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/568538/1/doc111.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2022.

RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C. Some aspects of citrus ecophysiology in subtropical climates: re-visiting photosynthesis under natural conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 19, n. 4, dez. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400009>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SILVA, G. S. *et al.* Aluminum prevents stomatal conductance from responding to vapor pressure deficit in *Citrus limonia*. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.] v. 155, p. 662–671, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.017>. Acesso em: 11 April 2022.

SOUTHWICK, S. M.; DAVENPORT, T. L. Characterization of Water Stress and Low Temperature Effects on Flower Induction in Citrus. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 81, n. 1, p. 26–29, maio 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.81.1.26>. Acesso em: 20 April 2022.

STENZEL, N. M. C.; NEVES, C. S. V. J. Rootstocks for ‘Tahiti’ lime. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 2, abr. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162004000200005>. Acesso em: 29 nov. 2021.

WANG, C. *et al.* Systematic Comparison of C₃ and C₄ Plants Based on Metabolic Network Analysis. **BMC Systems Biology**, [s. l.], v. 6, sup. 2, 12 dez. 2012. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1186%2F1752-0509-6-S2-S9>. Acesso em: 10 abr. 2022.

YANG, L. *et al.* Citrus Physiological and Molecular Response to Boron Stresses. **Plants**, [s. l.], v. 11, n. 40, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11010040>. Acesso em: 5 maio 2022.

4. EFICIÊNCIA ECONÔMICA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA LIMA ÁCIDA TAHITI NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Resumo: A lima ácida Tahiti é uma espécie cítrica de grande importância econômica no Brasil e no mundo. No Brasil, a produção concentra-se nos estados de São Paulo e Pará, onde geralmente é enxertada em limão Cravo. Este estudo analisa o efeito de diferentes lâminas de irrigação na viabilidade econômica e no uso da água em lima ácida Tahiti enxertada em citrumelo Swingle em clima equatorial na Amazônia Oriental. O citrumelo Swingle como porta-enxerto vem sendo testado na região devido à sua resistência à podridão foliar causada por *Phytophthora* spp., que é uma das doenças mais frequentes na citricultura regional. Foram realizados levantamentos periódicos de produtividade e floração. A irrigação foi realizada durante os meses secos (agosto a novembro), com quatro lâminas de irrigação diferentes, marcadas de T₁ a T₄, para manter o potencial matricial do solo – medido por tensiômetros – nas seguintes faixas: T₁ abaixo de 50 kPa, T₂ de 30 a 50 kPa, T₃ de -10 a -30 kPa e T₄ acima de -10 kPa. Os custos de produção foram fornecidos pela empresa proprietária do pomar, e o preço da lima ácida Tahiti para os agricultores da região foi fornecido por três empresas diferentes. Calculamos a receita bruta, a receita líquida e a Produtividade da Água da Cultura (CWP) para os diferentes regimes de irrigação. Embora a irrigação influencie no florescimento e tenha antecipado a colheita dos frutos, a receita bruta total e a receita líquida não se alteraram entre os tratamentos. O aumento da lâmina de irrigação levou a uma diminuição da CWP.

Palavras-chave: Citrus, Irrigação, Evapotranspiração, Sustentabilidade.

CHAPTER 4 — ECONOMIC EFFICIENCY AND CROP WATER PRODUCTIVITY OF TAHITI LIME IN EASTERN AMAZON

Abstract: Tahiti lime is a citrus species of great economic importance in Brazil and worldwide. In Brazilian territory, production is concentrated in the states of São Paulo and Pará, where it is usually grafted onto Rangpur lime. This study analyzes the effect of different irrigation depths on economic viability and water use of Tahiti lime trees grafted onto Swingle citrumelo under tropical rainforest climate Eastern Amazon. Citrumelo Swingle as a rootstock has been tested in the region due to its resistance to foot rot caused by *Phytophthora* spp., which is one of the most prevalent diseases in the regional citrus production. Periodic surveys of productivity and flowering were carried out. Irrigation was performed during the dry months (August – November), with four different irrigation depths, labeled from T₁ to T₄, to

keep the soil matric potential – measured by tensiometers – in the following ranges: T₁ below -50 kPa, T₂ from -30 to -50 kPa, T₃ from -10 to -30 kPa, and T₄ above -10 kPa. Production costs were provided by the Company that owns the orchard, and the price of Tahiti lime for farmers in the region were provided by three different companies. We calculated the gross income, net income, and Crop Water Productivity (CWP) for the different irrigation regimes. Even though irrigation influenced flowering and lead to earlier harvesting of fruits, the total gross income as well as the net income did not change among treatments. Increasing the irrigation depth leads to a decrease of CWP.

Keywords: Citrus, Irrigation, Evapotranspiration, Sustainability

4.1. INTRODUÇÃO

A lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka) é uma espécie de grande importância social e econômica em todo o mundo. No Brasil, é conhecido como limão, mesmo que não seja um limão verdadeiro. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (2020), o Brasil é o quinto maior produtor de limas e limões em todo o mundo. A maior parte da produção nacional de limas está concentrada no estado de São Paulo, e o estado de Pará é o segundo maior produtor do país (IBGE, 2022). A maior parte da pesquisa brasileira sobre citros parece ser realizada em São Paulo, apesar de seu solo e clima diferindo amplamente das condições climáticas e do solo de Pará, como mostrado em Alvares *et al.* (2013).

No Brasil, a lima ácida Tahiti geralmente é enxertado em limão-cravo (*C. limonia*) e cultivada com grande espaçamento entre as plantas e essas escolhas de manejo também estão presentes na maioria das pesquisas sobre a lima ácida Tahiti produzidas no Brasil. A lima ácida Tahiti enxertada em limão-cravo tem um bom rendimento de frutos, mas baixa resistência a doenças que afetam a produção de lima ácida no Brasil (STUCHI *et al.*, 2009). O uso de citrumelo Swingle foi testado para melhorar a resistência das árvores, no entanto, pouco foi publicado sobre o uso da água, evapotranspiração, rendimento e sustentabilidade geral da produção de lima ácida Tahiti em relação ao uso de citrumelo Swingle como porta-enxerto.

A maior parte da produção cítrica no estado de Pará ocorre no nordeste de Pará, no município de Capitão Poço (IBGE, 2022) e, embora o clima da região seja Am de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013) há um período de chuvas reduzidas onde pode haver déficit hídrico (PACHECO; BASTOS, 2002), o que justifica o uso da irrigação durante (SOUZA *et al.*, 2020) para reduzir o risco de déficits de produtividade e também para antecipar a colheita de frutas.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica e a produtividade da água da lima ácida Tahiti enxertada em citrumelo Swingle em um plantio de alta densidade no nordeste de Pará, leste da Amazônia, Brasil. A hipótese testada é que a irrigação melhorará a viabilidade econômica da produção de lima ácida e reduzirá a sustentabilidade da produção, aumentando a quantidade de água necessária para produzir a mesma massa de frutas na região.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em pomar irrigado de lima ácida Tahiti (Figura 4.1C) de propriedade de uma empresa privada, localizado no município de Capitão Poço (Figura 4.1A-B), na porção oriental da Amazônia Brasileira (Figura 4.1A). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como Am (ALVARES *et al.*, 2013). O pomar foi implantado em 2014 e o experimento foi realizado entre junho de 2020 e maio de 2021, portanto, quando o pomar tinha entre 6 e 8 anos.

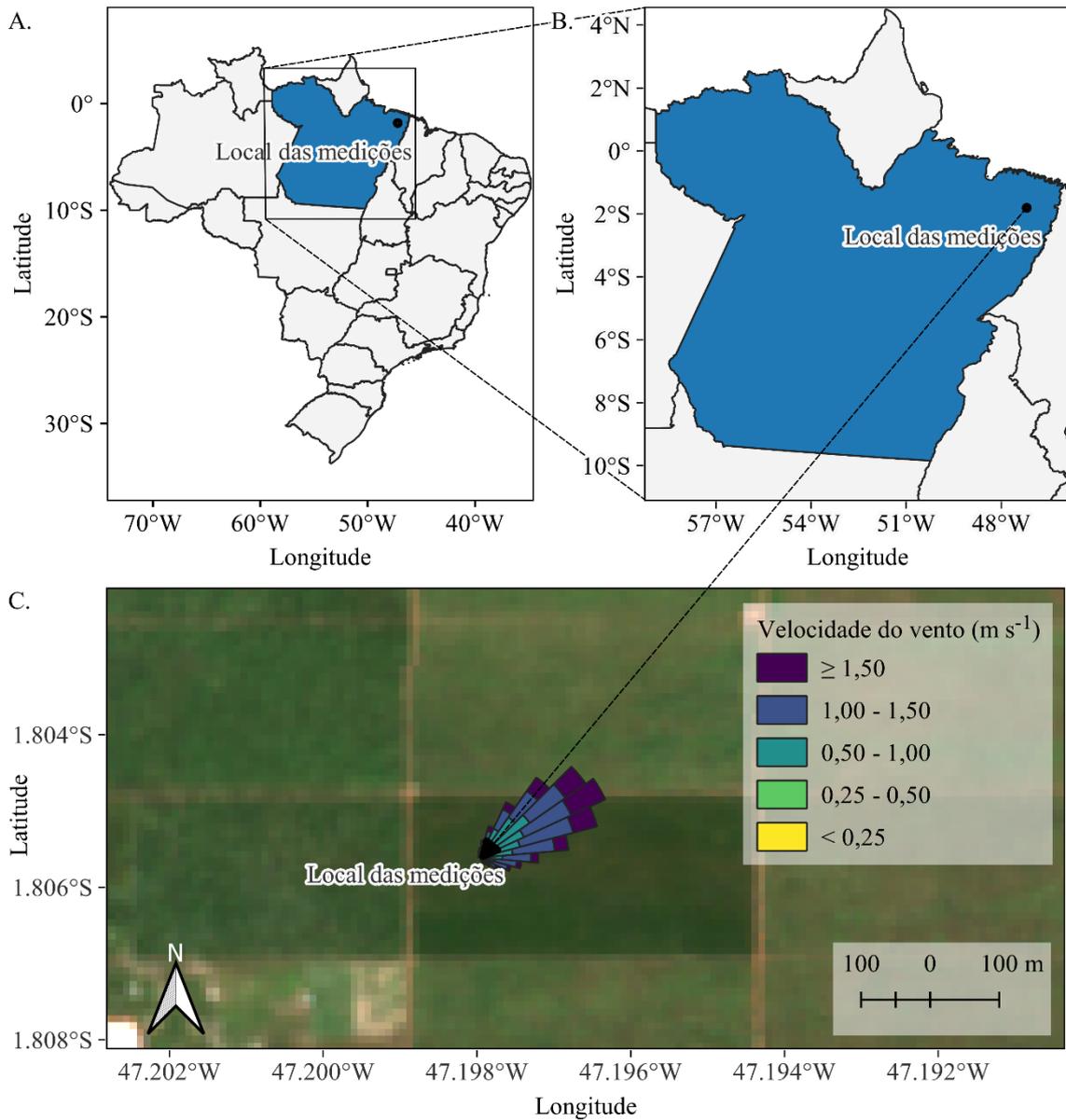


Figura 4.1 — Localização da área de estudo.

O pomar (Figura 4.1C) tem 250 m de largura e 500 m de comprimento. Está dividido em dois setores de irrigação, de 250×250 m cada. As linhas de plantio seguem o sentido Leste-Oeste. O espaço entre as plantas na mesma linha é de 2,0 m e a distância entre as linhas de plantio é de 6,8 m. O porta-enxerto utilizado foi o citrumelo Swingle, porém, o porta-enxerto mais utilizado na região é o limão-cravo (STENZEL; NEVES, 2004).

Uma amostra composta de solo obtida na área do experimento foi enviada a um laboratório para teste de fertilidade (Tabela 4.1). O resultado da análise do solo mostra um solo arenoso, com alta acidez, concentração intermediária de P e Al, baixa concentração de K e altas quantidades de Fe, Zn e Cu.

Tabela 4.1 — Resultados da análise de fertilidade do solo.

Camada (cm)	P — mg dm ⁻³ —	K — mg dm ⁻³ —	Na	Al	Ca	Ca + Mg — cmol _c dm ⁻³ —	H + Al	pH	Fe — mg dm ⁻³ —	Zn — mg dm ⁻³ —	Cu	Mn	Areia — % —	Silte	Argila
0 a 20	15,55	14,57	8,39	0,98	0,66	0,76	2,74	4,85	176,52	53,63	4,81	5,69	75	12	13

4.2.1. Irrigação

Os tratamentos consistiram no fornecimento de diferentes lâminas de irrigação entre agosto e meados de novembro de 2020. A irrigação foi realizada por sistema de gotejamento, com vazão de 2 l h⁻¹ por emissor e espaçamento de 0,55 m entre os emissores, o que resulta em 3,63 emissores por planta. O croqui do experimento é apresentado no Anexo II. A irrigação é realizada uma vez ao dia, nos meses acima mencionados. Cada evento de irrigação tem duração de 9,35 h e, portanto, são fornecidos 68 litros de água para cada planta durante cada evento de irrigação. A cada dia, a decisão de irrigar era baseada no potencial matricial do solo obtido pela leitura dos tensiômetros instalados na área.

Os efeitos de diferentes lâminas de irrigação nas plantas foram medidos por observações recorrentes de fenologia e produção de frutos até maio de 2021. Quatro tratamentos foram testados, rotulados de T₁ a T₄. T₁ recebeu 115 mm de irrigação, T₂ recebeu 165 mm, T₃ recebeu 260 mm e T₄ recebeu 340 mm. A irrigação foi realizada seguindo um delineamento em blocos inteiramente casualizados com 4 tratamentos e 5 blocos. A irrigação foi realizada de forma a manter o potencial hídrico do solo nas seguintes faixas: T₁ abaixo de -50 kPa, T₂ de -50 a -30 kPa, T₃ de -30 a -10 kPa e T₄ acima de -10 kPa. Em 2020, foram instalados quatro tensiômetros, 1 para cada tratamento no bloco 1. Todos os tensiômetros foram instalados a uma profundidade de 30 cm, nas linhas de plantio e alinhados ao tronco das árvores, distantes 1 m das duas árvores mais próximas. Como o experimento foi realizado em condições de campo, a tensão do solo pode subir acima das faixas desejadas. Em tais situações, a irrigação foi suspensa até que a tensão do solo reduza para a faixa desejada. Fotos dos tensiômetros, são mostradas no Anexo I.

4.2.2. Produtividade e floração

Frutos e flores foram contadas em cada parcela de junho de 2020 a maio de 2021. A parcela corresponde a uma sequência de três árvores, que foram monitoradas durante todo o experimento. Houve 20 parcelas experimentais, uma para cada combinação de tratamento e bloco durante o período de junho de 2020 a maio de 2021. Quando os frutos atingiram as características para a colheita, eles foram colhidos e pesados em uma balança digital com precisão de 1 mg, e o diâmetro e o comprimento dos frutos foram medidos com um paquímetro

analógico com precisão de 0,05 mm. Fotos das plantas demarcadas são apresentadas no Anexo I.

4.2.3. Custos da irrigação

De acordo com dados fornecidos pela empresa responsável pelo pomar, cada evento de irrigação dura 9,35 h. A empresa utilizou uma bomba d'água com vazão de $31,71 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, e a área irrigada tem 6,25 ha. A bomba trabalha com altura manométrica de 50 m.c.a. (0,49 MPa) e possui 7.355 W de potência, o que totaliza um consumo de energia de $11,00 \text{ kWh ha}^{-1}$ por irrigação. O preço do kWh foi obtido no website da empresa de energia local, que informa um valor de R\$ 0,52634 por kWh. Também foi aplicada a tributação do uso de energia de 25% sobre o preço final da energia, o que eleva o custo da energia para R\$ 0,70179 por kWh. O consumo de energia de cada tratamento foi calculado como o produto do número de dias com tempos de irrigação pelo consumo de energia por evento de irrigação, e o custo da energia utilizada em cada tratamento foi calculado como o produto entre o consumo de energia do tratamento e o preço da energia fornecido pela concessionária com os impostos já incluídos (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 — Lâmina total de irrigação, consumo de energia e custo total da energia utilizada com irrigação nos quatro tratamentos.

Tratamento	Quantidade de irrigações	Lâmina de irrigação total (mm)	Consumo de energia (kWh ha^{-1})	Custo total estimado da energia ($\text{R\$ ha}^{-1}$)
T ₁	23	115	253,07	177,60
T ₂	33	165	363,10	254,82
T ₃	52	260	572,16	401,54
T ₄	68	340	748,21	525,09

4.2.4. Outros custos de produção

Os demais custos de produção foram considerados constantes. O custo dos insumos e máquinas agrícolas foi fornecido pela empresa responsável pelo pomar em que o experimento foi realizado. Os custos relacionados à colheita de frutas e ao trabalho humano não foram fornecidos pela Companhia, portanto foram estimados a partir de um orçamento fornecido pelo Escritório da Empresa de Assistente Técnica E Extensão (Emater) localizada no município do experimento. A Emater é uma empresa de propriedade do governo responsável por fornecer assistência técnica e consultoria para os agricultores. Na folha fornecida pelo Emater, é informado que a colheita de lima ácidas precisa de cerca de 1,5 trabalhadores por tonelada métrica colhida por ano. Todos esses custos de produção estão resumidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 — Componentes dos custos de produção de lima ácida com o manejo adotado no experimento, para o período de 1 ano. A fertilização mineral não foi realizada este ano, mas os custos relacionados à fertilização são mostrados no orçamento fornecido pela empresa.

Descrição do componente	Custo (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Aplicação de inseticida e fertilização foliar ¹	870.67
Aquisição e aplicação de acaricida ¹	148.96
Aquisição e aplicação de herbicida ¹	240.99
Calcário agrícola ¹	76.45
Aquisição e aplicação de fungicida ¹	310.98
Controle mecânico de plantas daninhas ¹	206.78
Controle manual de plantas daninhas ¹	80.18
Controle biológico ¹	724.21
Controle de plantas trepadeiras ¹	79.64
Adubação mineral ^{1,3}	2749.58
Colheita manual de frutos ²	750.00
Poda das árvores ²	100.00
Custos totais sem adubação mineral*	3588.87
Custos totais com adubação mineral*	6338.45

¹Dados fornecido pela empresa que possui o pomar. ²Data fornecida por Emater. *O custo total mostrado aqui considera apenas as entradas listadas na tabela e não inclui o custo da eletricidade usada para irrigação, que é mostrada na Tabela 8.

Os custos de produção listados na Tabela 4.3 mais os custos de eletricidade na Tabela 4.2 são chamados de custos operacionais efetivos (COE). O COE acrescido dos custos relacionados à depreciação dos vários bens utilizados na produção agrícola são chamados de custo operacional total (COT).

Os custos devido à implementação do sistema de irrigação, bem como aos custos relacionados à depreciação de máquinas, foram calculados dividindo-se o custo de cada componente por sua vida útil e, em seguida, pela área total coberta pelo componente (Tabela 4.4). Os custos relacionados a maquinário compreendem a depreciação de tratores e implementos agrícolas usados nas operações de campo.

Tabela 4.4 — Depreciação do sistema de irrigação e do maquinário utilizado.

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Subtotal (R\$)	Vida útil (anos)	Área abrangida (ha)	Custo (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Mangueira gotejadora (1000 m)	18	415,41	7.477,38	4	12,5	149,55
Bomba de água	1	13.554,00	13.554,00	10	12,5	108,43
Tubo 100 mm PN 60 (6 m)	60	215,97	12.958,20	20	12,5	51,83

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Subtotal (R\$)	Vida útil (anos)	Área abrangida (ha)	Custo (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Tubo 100 mm PN 40 (6 m)	42	158,56	6.659,52	20	12,5	26,64
Tubo 75 mm PN 40 (6 m)	42	92,95	3.903,90	20	12,5	15,62
Tubo 50 mm PN 40 (6 m)	37	50,58	1.871,46	20	12,5	7,49
Maquinário	-	-	311.070,81	15	125	165,90
Total	-	-	-	-	-	525,46

4.2.5. Preços da lima ácida para o produtor

Os preços do da lima ácida Tahiti para os agricultores de julho de 2020 a abril de 2022 foram fornecidos por três empresas diferentes da região estudada. As pesquisas periódicas de preços realizadas pela Companhia Nacional de Abastecimento (2022) foram utilizadas para comparação. Um total de 1.333 registros de compras e vendas de lima ácida Tahiti foram fornecidos pelas fontes mencionadas acima entre junho de 2020 e maio de 2022.

4.2.6. Indicadores de eficiência econômica e uso da água

A receita bruta e a receita líquida foram calculadas multiplicando a produção de frutas de cada mês pelo preço médio da lima ácida Tahiti para os agricultores no mesmo período, e depois subtraindo os custos de produção. Para a análise da eficiência do uso da água, a produtividade da água da cultura (CWP) foi determinada usando as seguintes razões (IGBADUN *et al.*, 2006).

$$CWP_{YC} = \text{Produtividade de frutos (kg)} / \text{Água consumida (m}^3\text{)} \quad (4.1)$$

$$CWP_{YA} = \text{Produtividade de frutos (kg)} / \text{Água aplicada (m}^3\text{)} \quad (4.2)$$

$$CWP_{RA} = \text{Receita bruta (reais)} / \text{Água aplicada (m}^3\text{)} \quad (4.3)$$

Onde a água aplicada refere-se à água fornecida através da irrigação e a água consumida refere -se à evapotranspiração real do pomar. A receita bruta é calculada multiplicando o rendimento dos frutos de cada mês pelo preço médio da lima ácida Tahiti para os agricultores durante o mês.

O consumo real de água foi determinado por um balanço diário da água seguindo a metodologia proposta por Allen *et al.* (1998), que foi anteriormente calibrado com evapotranspiração obtida usando o método do Balanço de Energia Razão de Bowen (BREB). A razão de Bowen calculada foi filtrada de acordo com os critérios estabelecidos por Perez *et al.*

(1999). O CWP_{YC} foi calculado apenas para o tratamento mais irrigado (T_4), uma vez que a evapotranspiração é conhecida apenas para ele.

Para os procedimentos relacionados à estimativa da razão de Bowen, uma torre com sensores para medição da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e a direção do vento, a precipitação, o fluxo de calor do solo e os quatro componentes principais do balanço de radiação (radiação de onda curta incidente e refletida, radiação de onda longa direcionada para cima e para baixo) foram instalados no pomar do experimento. A temperatura do ar e a umidade relativa foram medidas a 0,5 m e 2,0 m acima do dossel das árvores de lima ácida Tahiti. O fluxo de calor no solo foi medido abaixo do dossel e entre as fileiras de árvores, por duas placas de fluxo de calor do solo da marca Hukseflux (modelo HFP01-L). Os componentes do saldo de radiação foram medidos por um saldo radiômetro de 4 componentes modelo CNR-4 de Campbell Scientific. A torre foi instalada a uma distância de 90 m do lado norte e a 120 m do lado oeste do pomar (ponto amarelo na Figura 4.1).

A umidade do solo foi estimada através da curva de retenção de água do solo, com o potencial da água do solo monitorado por tensiômetros instalados a 30 cm de profundidade durante todo o experimento. Para esse fim, foram instalados quatro tensiômetros, um para cada tratamento, abaixo do dossel da árvore, nas linhas. Cada tensiômetro foi instalado a 1 m das duas árvores de lima ácida vizinhas.

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Condições climáticas

De acordo com os dados medidos no local do experimento, a radiação global atinge seu pico entre agosto e outubro, com irradiância solar diária chegando a $25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 4.2B).

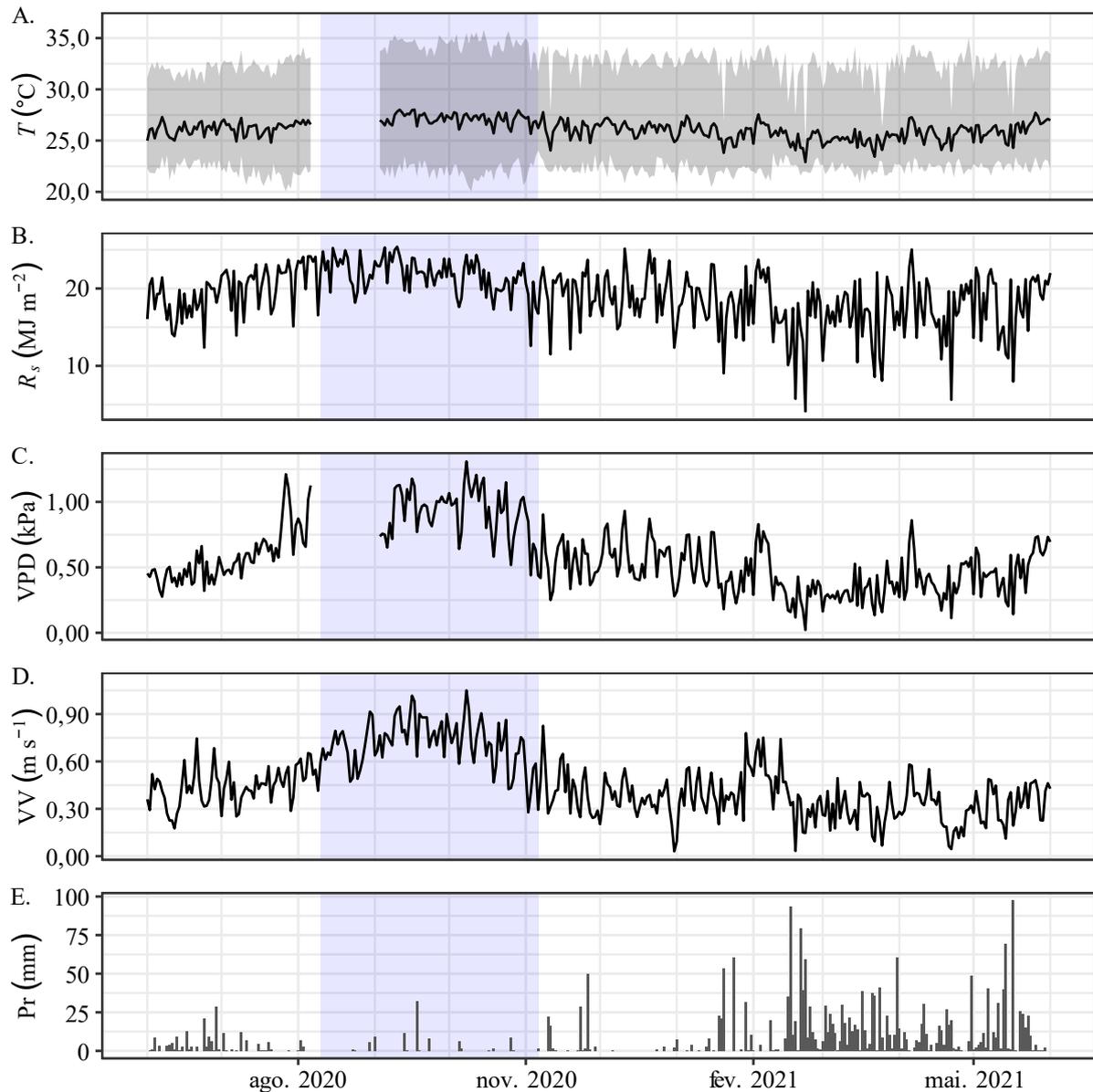


Figura 4.2 — Variação das condições do tempo sobre o plantio de lima ácida Tahiti ao longo do experimento. (A) temperatura do ar, T ; (B) radiação solar global, R_s ; (C) déficit de pressão de vapor, DPV; (D) velocidade do vento, VV ; (E) precipitação, Pr .

A radiação global (Figura 4.2B) é menor durante a primeira metade do ano, quando ocorre a maior parte da precipitação anual, mas raramente fica abaixo de $7,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Devido à proximidade desta região com o equador terrestre, ocorre pouca variação na radiação global devido às mudanças sazonais na declinação solar, motivo pelo qual variações sazonais na incidência de radiação global nesta região estão mais relacionadas à nebulosidade (ARIAS *et al.*, 2011).

A temperatura do ar (Figura 4.2A) segue o mesmo comportamento observado anteriormente para a radiação global, atingindo médias diárias de $28 \text{ }^\circ\text{C}$ durante a estação seca e abaixo de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ durante os meses mais chuvosos (Figura 4.2A). Os maiores registros de tem-

peratura do ar no local do experimento estão um pouco acima de 33 °C (Figura 4.2A) durante o período menos chuvoso de 2020.

A estação mais chuvosa de 2020-2021 começou em novembro, com a ocorrência de algumas precipitações de maior intensidade, algumas das quais chegaram a quase 50 mm de chuva em um único dia (Figura 4.2E).

4.3.2. Preço da lima ácida Tahiti para os produtores locais

O preço médio da lima ácida Tahiti atinge seu máximo entre agosto e outubro, quando a oferta é menor. Os preços mais baixos ocorrem entre fevereiro e maio (Figura 4.3). Nos últimos três anos, os preços mais altos atingiram entre 2,00 e 2,50 R\$ kg⁻¹, e os preços mais baixos normalmente ficam em torno de 0,25 R\$ kg⁻¹ de frutas. O preço também é influenciado por algumas características dos frutos, como a ocorrência de oleocelose, a maturação e o aspecto da casca, embora os levantamentos de preços não distingam tais características.

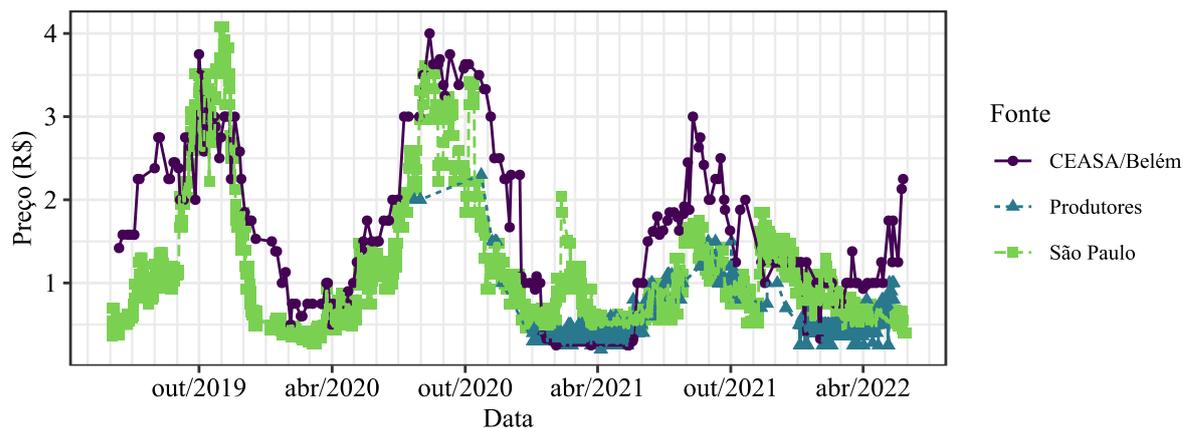


Figura 4.3 — A tendência de longo prazo para o preço do Tahiti Lime nos mercados locais, de acordo com a pesquisa de preços da Companhia Nacional de Abastecimento (2022) (RED) e o preço registrado pelos agricultores locais de julho de 2020 a abril a 2022.

Observa-se uma tendência de queda nos preços entre 2019 e 2022, e tal queda é particularmente perceptível durante o período menos chuvoso de 2021, quando os preços da lima ácida para os agricultores atingiram valores em torno de 1,50 R\$ kg⁻¹, o que é muito inferior aos preços registrados no mesmo período no ano anterior. Esta queda de preços pode sugerir um aumento na oferta da lima ácida Tahiti em 2021.

Apesar das diferenças de clima, sazonalidade e nível de tecnologia entre os agricultores de São Paulo e Pará, os preços informados nos dois estados são semelhantes ao longo dos três anos acima. Os preços praticados na CEASA foram um pouco acima dos preços recebidos

por produtores, embora o preço para o produtor rural e o preço na CEASA sigam a mesma tendência, com altas e baixas ocorrendo de forma síncrona em ambas as séries temporais.

4.3.3. Crescimento dos frutos, produtividade e floração

Dois períodos de floração intensa foram observados ao longo do ano (Figura 4.4). O primeiro começa em junho e se estende até agosto, período em que a estação mais chuvosa termina (veja a Figura 4.2 e a Figura 4.4), mas esta floração pode ter sido estimulada pela poda de árvores que ocorre no início de junho, a cada ano. A poda induz a floração em espécies cítricas (LAMBERT *et al.*, 2015). A segunda floração ocorre no final de novembro e no início de outubro de 2020, quando a estação mais chuvosa começa, e foi significativamente afetada pelo regime de irrigação.

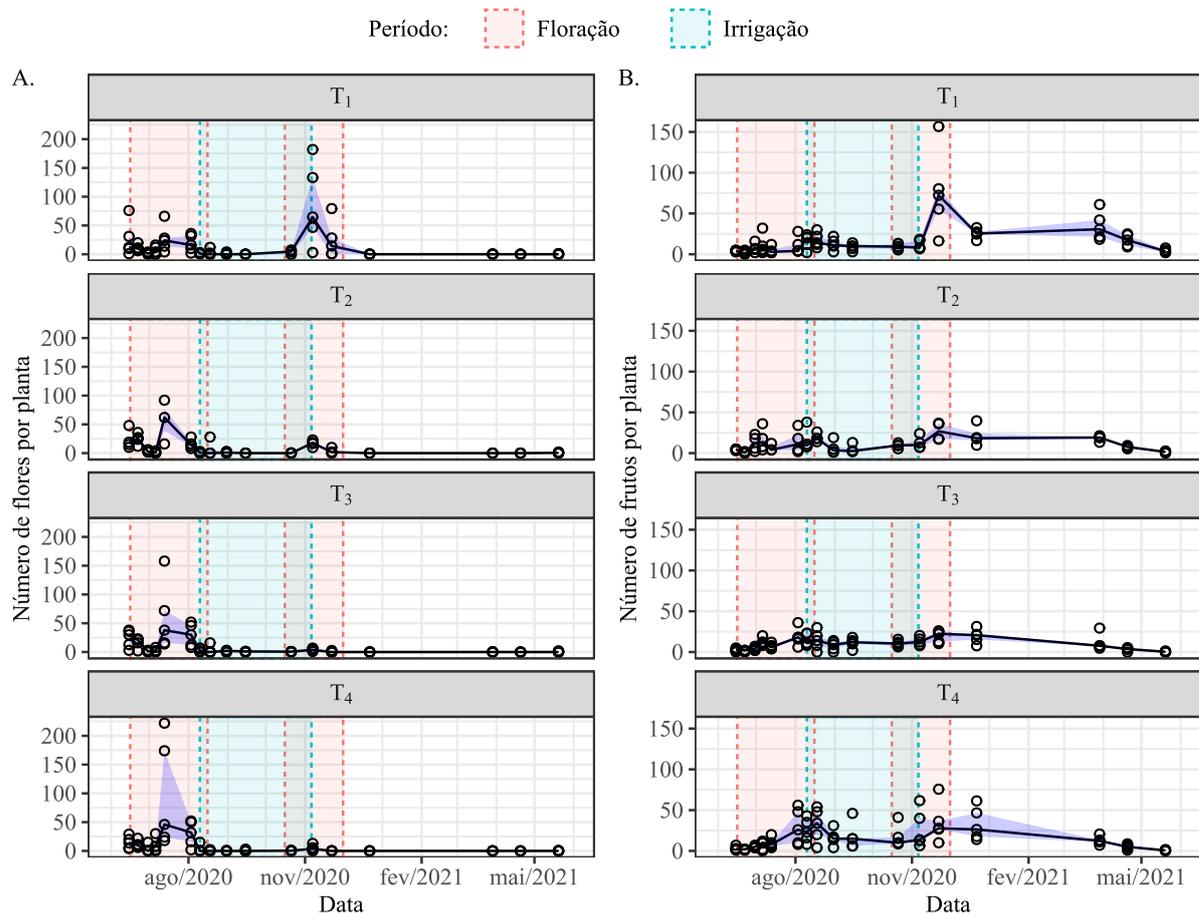


Figura 4.4 — Número de flores e de frutos por tratamento no período de junho de 2020 a maio de 2021.

A colheita dos frutos (Tabela 4.5) atinge seu pico em fevereiro de 2021 nos tratamentos com maior profundidade de irrigação. Por outro lado, os tratamentos com a menor profundidade de irrigação têm uma produtividade elevada de frutos durante março, quando um declínio da produtividade já pode ser observado nos tratamentos com as maiores lâminas de

irrigação. Isso pode acontecer devido ao maior número de emissões florais na segunda floração nos tratamentos com menor irrigação (T₁ e T₂), quando novos frutos foram produzidos, cuja colheita ocorreu após a maior parte da produção dos tratamentos com maior lâmina de irrigação (T₃ e T₄) já haviam sido colhidos.

Tabela 4.5 — Custo total de produção, média e desvio padrão da receita bruta, receita líquida e produtividade total para os quatro tratamentos.

Tratamento	Custo total (R\$ ha ⁻¹)	Receita bruta (R\$ ha ⁻¹)	Receita líquida (R\$ ha ⁻¹)	Y (jun-fev) (t ha ⁻¹)	Y (total) (t ha ⁻¹)
T ₁	4291,93	2663,11 ± 248,85 a	-1629,02 ± 248,47 a	2,08 ± 0,77 a	6,15 ± 1,93 a
T ₂	4369,15	2909,53 ± 517,53 a	-1459,47 ± 518,22 a	3,02 ± 0,82 ab	5,41 ± 0,87 a
T ₃	4515,87	3075,56 ± 837,21 a	-1439,89 ± 837,53 a	3,05 ± 0,96 ab	4,42 ± 1,62 a
T ₄	4639,42	4062,74 ± 2016,68 a	-576,71 ± 2017,06 a	5,06 ± 2,29 b	6,57 ± 2,66 a

Os tratamentos com a menor lâmina de irrigação (T₁ e T₂) também tiveram menor rendimento de frutos até os dois primeiros meses de 2021 e produziram frutos menores e menos pesados (Tabela 4.6) quando comparados aos tratamentos com a maior lâmina de irrigação (T₃ e T₄). Em geral o peso e o diâmetro médio dos frutos nos tratamentos com maior lâmina de irrigação (T₃ e T₄) foi maior do que o obtido por Stuchi *et al.* (2009): 55,7 mm de comprimento, 52,2 mm de diâmetro, e 88,2 g para lima ácida Tahiti enxertada em citrumelo Swingle.

Tabela 4.6 — Peso médio (*W*), diâmetro (*L*) e comprimento (*L*) dos frutos produzidos entre junho de 2020 e fevereiro de 2021.

Tratamento	<i>W</i> (g)	<i>D</i> (mm)	<i>L</i> (mm)
T ₁	78,6 ± 17,8 a	52,6 ± 4,31 a	56,0 ± 4,62 a
T ₂	86,3 ± 21,4 b	53,8 ± 4,37 bc	58,0 ± 5,77 b
T ₃	90,3 ± 27,4 bc	54,7 ± 5,40 cd	57,7 ± 6,45 b
T ₄	92,1 ± 22,9 c	55,1 ± 5,69 d	58,2 ± 5,56 b

O pico dos preços da lima ácida Tahiti geralmente ocorre de agosto a outubro, mas ainda se pode conseguir preços elevados em novembro e dezembro. Os frutos colhidos durante os primeiros meses do período de colheita (outubro a dezembro) são de grande importância econômica para os agricultores, devido ao seu alto preço. Embora o pico de produção tenha ocorrido mais cedo nos tratamentos com maior lâmina de irrigação, nenhuma diferença significativa foi observada na receita líquida com diferentes regimes de irrigação (Tabela 4.5).

Mesmo em tratamentos submetidos à maior lâmina de irrigação, a produtividade obtida (entre 4,5 e 7,3 t ha⁻¹ no tratamento T₄) foi muito inferior à produtividade média na região em estudo, que, de acordo com dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e as estatísticas (2022), foi de aproximadamente 19,6 t ha⁻¹, em 2019. A baixa produtividade pode

ser explicada principalmente por dois fatores: (I) a utilização de citrumelo Swingle como porta-enxerto, o que pode resultar em plantas menos produtivas do que quando se utiliza o limão-cravo (CANTUARIAS-AVILÉS *et al.*, 2012), porta-enxerto mais comum na região em estudo (STENZEL; NEVES, 2004; STUCHI *et al.*, 2009) e (II) as características do solo, que é franco-arenoso, com acidez elevada e alta saturação de alumínio (Tabela 4.1), associado à falta de fertilização e manejo adequado do solo.

O custo total apresentado na Tabela 4.5 é composto da seguinte forma: em T₁, 87,8% dos custos correspondem aos custos operacionais efetivos (COE) e em T₂, T₃, T₄, este percentual é, respectivamente, 88,0, 88,4 e 88,7%. A receita bruta média e a receita líquida não diferem significativamente entre os tratamentos.

4.3.4. Uso da água

A quantidade total de água disponível para utilização de cada planta, considerando as chuvas e a irrigação, foi de 35,5, 36,2, 37,4 e 38,5 m³ planta⁻¹ nos tratamentos T₁, T₂, T₃ e T₄, respectivamente. O balanço da água do solo ajustado mostra que a evapotranspiração real atingiu 15,7 m³ planta⁻¹ no tratamento T₄, o que representa apenas 40,7% de toda a água disponível ao longo de um ano (chuva + irrigação). O CWP_{YC} foi de 0,47 ± 0,08 kg m⁻³ para T₄.

A água de irrigação aplicada a cada tratamento foi de 1,56, 2,24, 3,54 e 4,62 m³, o que representa apenas 4,41, 6,21, 9,44 e 12,00% da água disponível ao longo do ano (total de precipitação e irrigação).

O CWP_{YA} foi calculado como 5,52 ± 1,61, 3,44 ± 0,45, 1,79 ± 0,58 e 1,75 ± 0,32 kg m⁻³ para os tratamentos T₁, T₂, T₃ e T₄, respectivamente (Figura 4.5A). Os coeficientes ajustados para as funções apresentadas na Figura 4.5 são apresentados na Tabela 4.7.

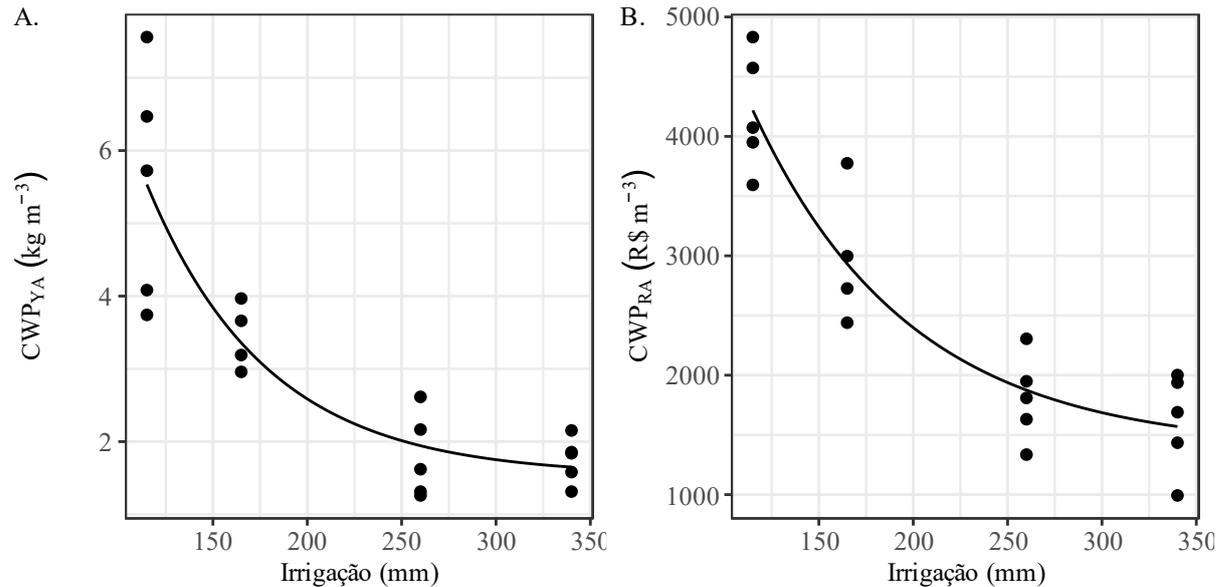


Figura 4.5 — Relação entre o uso da água e a lâmina de irrigação. (A) CWP_{YA} — razão entre produtividade de frutos e água aplicada; (B) CWP_{RA} — Receita bruta por unidade volumétrica de água utilizada para irrigação.

Tabela 4.7 — Coeficientes ajustados para as curvas apresentadas na Figura 4.5. Valores entre colchetes representam o desvio padrão para o coeficiente ajustado.

Figura	Equação
Figura 4.5A	$CWP_{YA} = 1,53[\pm 0,488] + 24,3[\pm 17,9]e^{-0,0157[\pm 0,0688]x}$
Figura 4.5B	$CWP_{RA} = 1383[\pm 346,8] + 11360[\pm 4955]e^{-0,01207[\pm 0,004420]x}$

Todos os três coeficientes da equação acima são significativos ($p < 0,05$). A irrigação explica 72,18% da variação observada entre os tratamentos. Isto indica que os tratamentos que receberam as quantidades mais baixas de água durante o período irrigado foram capazes de usar essa água com mais eficiência, aumentando a produção por unidade de água aplicada.

Uma diminuição notável na receita bruta por unidade de água de irrigação aplicada (CWP_{RA}) pode ser vista à medida que a irrigação aumenta (Figura 4.5B). A regressão na Figura 4.5B também é significativa ($p < 0,05$). A redução em CWP_{RA} indica que a receita bruta não aumenta na mesma taxa que o aumento da lâmina de irrigação.

Nesta região, a evapotranspiração é menor na estação chuvosa do que na estação seca, embora a primeira concentre a maior parte da precipitação anual, que pode ser superior a 2100 mm, — segundo registros meteorológicos da região — portanto a maior parte dessa água é provavelmente perdida por percolação profunda ou escoamento superficial, uma vez que o solo, apesar de sua textura arenosa, permanece em capacidade de campo durante a maior parte do período mais chuvoso.

4.4. DISCUSSÃO

No Brasil, o período 2019-2022 foi marcado por uma desvalorização do real brasileiro em relação ao dólar americano. Desde 2020, o Brasil também sofre com os impactos da pandemia do COVID-19, que reduziu a oferta geral de diversos bens. Esses fatores contribuíram para o aumento do preço de alguns alimentos (PEREIRA *et al.*, 2021), bem como o preço dos combustíveis, e aumento da insegurança alimentar para muitas pessoas, principalmente das classes mais pobres (MANFRINATO *et al.*, 2020). O aumento dos preços dos alimentos não é apenas um problema para o Brasil, mas tem sido visto em todo o mundo durante o período de pandemia, como mostra o Índice de Preços de Alimentos da FAO, que aumentou substancialmente desde 2020 e ao longo de 2021 (Food Outlook, 2022). Além disso, as exportações de lima ácida Tahiti do Brasil aumentaram anualmente desde 2019, com 104.618 toneladas exportadas em 2019, 119.428 toneladas exportadas em 2020 e 144.944 toneladas exportadas em 2021 (BRASIL, 2022).

No entanto, apesar do aumento das exportações e dos preços dos alimentos, o preço da lima ácida Tahiti diminuiu nos anos anteriores. Tal queda ocorreu concomitantemente com a alta de preços de diversos insumos agrícolas, como combustíveis e fertilizantes minerais. O aumento dos preços dos combustíveis não só encarece o transporte de produtos agrícolas, mas também aumenta o custo dos fertilizantes minerais, principalmente as fontes de N, que são derivadas do petróleo. O Brasil é um importador de fertilizantes (SANTOS; SZKLO, 2016), portanto o preço dos fertilizantes nos mercados locais é altamente dependente dos preços internacionais. Esses fatores, bem como o baixo rendimento obtido neste estudo, representam grandes desafios para os produtores de lima ácida Tahiti na região estudada e podem inviabilizar a produção de limas ácidas do ponto de vista econômico.

Ressalta-se que o pomar do presente estudo possui densidade superior à normalmente utilizada na região (COELHO *et al.*, 1998). Estudos com diferentes densidades têm demonstrado a ocorrência de maior disseminação de doenças em plantios de lima ácida com maiores densidades (LADANIYA *et al.*, 2020). Neste pomar, o citrumelo Swingle foi escolhido devido à maior resistência deste porta-enxerto à gomose, doença que acomete muitas espécies cítricas da região, e à qual o porta-enxerto limão-cravo tem alta suscetibilidade (STUCHI *et al.*, 2009), mesmo sendo o porta-enxerto preferido pelos produtores.

Em relação às características dos frutos colhidos, percebeu-se que a irrigação resultou, em média, em frutos maiores e mais pesados nos três primeiros meses (Tabela 4.6) do período de maior produção de frutos. Outros estudos confirmam o efeito da irrigação no tamanho e

peso do fruto e na porcentagem de suco de lima ácida Tahiti (BREMER NETO *et al.*, 2013). Há também relatos de que a maior densidade contribui para a ocorrência de frutos maiores em lima mexicana (*Citrus aurantifolia*) (LADANIYA *et al.*, 2020). Diante dos baixos preços da lima ácida nos mercados regionais, o produtor pode tentar obter vantagens destas características superiores dos frutos proporcionada pela irrigação — isto é, maior peso, e dimensões, e provavelmente maior teor de suco — ao produzir com foco no mercado externo.

O CWP_{YC} é o inverso matemático dos componentes verde e azul da pegada hídrica. Para a produção de citros (incluindo laranja, limão, toranja e laranja azeda), os componentes azul + verde são relatados como $1,24 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ — ou $0,81 \text{ kg m}^{-3}$ — (BAZRAFSHAN *et al.*, 2019), que é muito superior ao CWP_{YC} encontrado para a lima ácida Tahiti no presente estudo ($0,47 \text{ kg m}^{-3}$). Um menor CWP_{YC} indica que menos frutos são produzidos com maiores gastos de água. Essa diferença pode estar relacionada ao baixo rendimento de frutos obtido, que é o fator mais importante na variação temporal da pegada hídrica cítrica (BAZRAFSHAN *et al.*, 2019).

Nas condições atuais, a irrigação não se mostrou relevante para aumentar a produtividade, e torna a produção menos sustentável devido ao aumento do consumo de energia e uso de água. O melhor manejo do solo, nutrição e, possivelmente, a escolha de diferentes porta-enxertos devem ser uma prioridade.

4.5. CONCLUSÕES

1. A irrigação aumentou a produtividade de frutos até fevereiro, embora não tenha aumentado a receita bruta nem a receita líquida da produção de lima ácida tahiti naquele ano.
2. A produtividade obtida não permite a viabilidade econômica da produção.
3. A irrigação aumentou a quantidade de água utilizada por unidade de massa de frutos produzidos.

4.6. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56). Disponível em: <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em 6 out. 2022.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 6 out. 2022.

ARIAS, P. A. *et al.* Changes in cloudiness over the Amazon rainforests during the last two decades: diagnostic and potential causes. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 37, p. 1551-1164, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0903-2>. Acesso em: 4 jul. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. [S. l.], 2022. Produção Agrícola Municipal, tabela 5457. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 1 jul. 2022.

BAZRAFESHAN, O. *et al.* Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 250, p. 355–351, 10 mai. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.069>. Acesso em: 4 jul. 2022.

BREMER NETO, H. *et al.* The horticultural performance of five ‘Tahiti’ lime selections grafted onto ‘Swingle’ citrumelo under irrigated and non-irrigated conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 150, p. 181–186, 4 fev. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.010>. Acesso em: 16 out. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Agrostat: Estatísticas do Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/AGROSTAT.html>. Acesso em: 1 jul. 2022.

CANTUARIAS-AVILÉS, T. *et al.* Rootstocks for high fruit yield and quality of ‘Tahiti’ lime under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 142, p. 105–111, jul. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.008>. Acesso em: 23 jul. 2021.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Evolução dos preços médios dos hortifrutícola pesquisados pela Equipe/Hortifrutí do Cepea**. Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/>. Acesso em: 7 fev. 2022.

COELHO, Y. S. *et al.* **A cultura do limão Tahiti**, 2 ed. Brasília: Embrapa, 1998, 69 p. (Coleção Plantar, n. 39). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/119233/1/Aculturadolimaotaiti.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Prohort Preço Diário**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/hortigranjeiros-prohort>. Acesso em: 1 jul. 2022.

FOOD OUTLOOK: Biannual report on global food markets, Roma: FAO, jun. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb9427en/cb9427en.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2022.

IGBADUN, H. E. *et al.* Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 85, p. 141–150, 16 set. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.04.003>. Acesso em 16 out. 2022.

LADANIYA, M. S. *et al.* High density planting studies in acid lime (*Citrus aurantifolia* Swingle). **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 261, 108935, 5 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108935>. Acesso em: 16 out. 2022.

- LAMBERT, G. F. *et al.* Behavior patterns related to the agricultural practices in the production of Persian lime (*Citrus latifolia* Tanaka) in the seasonal orchard. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 116, p. 162-172, ago. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.007>. Acesso em: 16 out. 2022.
- MANFRINATO, C. V. *et al.* High prevalence of food insecurity, the adverse impact of COVID-19 in Brazilian favela. **Public Health Nutrition**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 1210-1215, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1368980020005261>. Acesso em: 16 out. 2022.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA, **Faostat**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X. **Análise frequencial da chuva em Capitão Poço**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002, 16 p. (Documentos, n. 133). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/389602/1/OrientalDoc133.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2022.
- PEREIRA, P. M. L. *et al.* Availability and access to food in supermarkets before and during the Covid-19 pandemic in a mid-size city. **Revista de Nutrição**, [s. l.], v. 34, e210006, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-9865202134e210006>. Acesso em: 4 jul. 2022.
- PEREZ, P. J. *et al.* Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 97, n. 3, p. 141–150, 18 nov. 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5). Acesso em: 4 jul. 2022.
- SANTOS, P. C.; SZKLO, A. S. Urea imports in Brazil: The increasing demand pressure from the biofuels industry and the role of domestic natural gas for the country's urea production growth. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, [s. l.], v. 29, p. 188-200, fev. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.01.006>. Acesso em: 4 jul. 2022.
- STENZEL, N. M. C.; NEVES, C. S. V. J. Rootstocks for 'Tahiti' lime. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 61, n. 2, abr. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162004000200005>. Acesso em: 4 July 2022.
- SOUZA, P. J. O. P. *et al.* Yield gap in cowpea plants as function of water deficits during reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 372–378, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p372-378>. Acesso em: 4 jul. 2022.
- STUCHI, E. S. *et al.* Fruit quality of 'Tahiti' lime (*Citrus latifolia* Tanaka) grafted on twelve different rootstocks. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 31, n. 2, p.454–460, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000200020>. Acesso em: 4 jul. 2022.

ANEXO I – FOTOS DO EXPERIMENTO

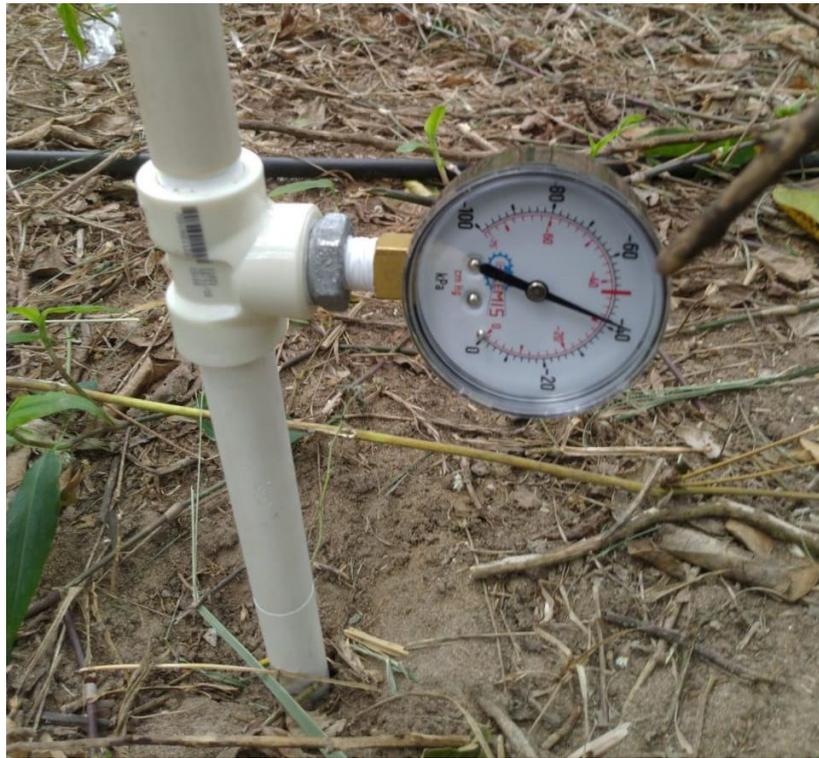


Figura I.1 — Um dos tensiômetros instalados no experimento, mostrando uma leitura de tensão de aproximadamente 40 kPa em novembro de 2020.



Figura I.2 — (A) Linha de plantio no dia 15 de outubro de 2020. À esquerda, plantas do tratamento T_1 (menos irrigado) e à direita plantas do tratamento T_4 (mais irrigado). (B) Medições de trocas gasosas sendo realizadas com o Analisador de Gases Infravermelho.



Figura I.3 — Planta com folhas enroladas no tratamento T₁ em virtude do estresse hídrico.



Figura I.4 — Planta demarcada para acompanhamento de produtividade e fenologia. (A) Marcação realizada no tronco de cada planta. (B) Fita zebraada cercando um conjunto de três plantas.



Figura I.5 — Torre com sensores instalada no experimento.

ANEXO II – CROQUI DO EXPERIMENTO

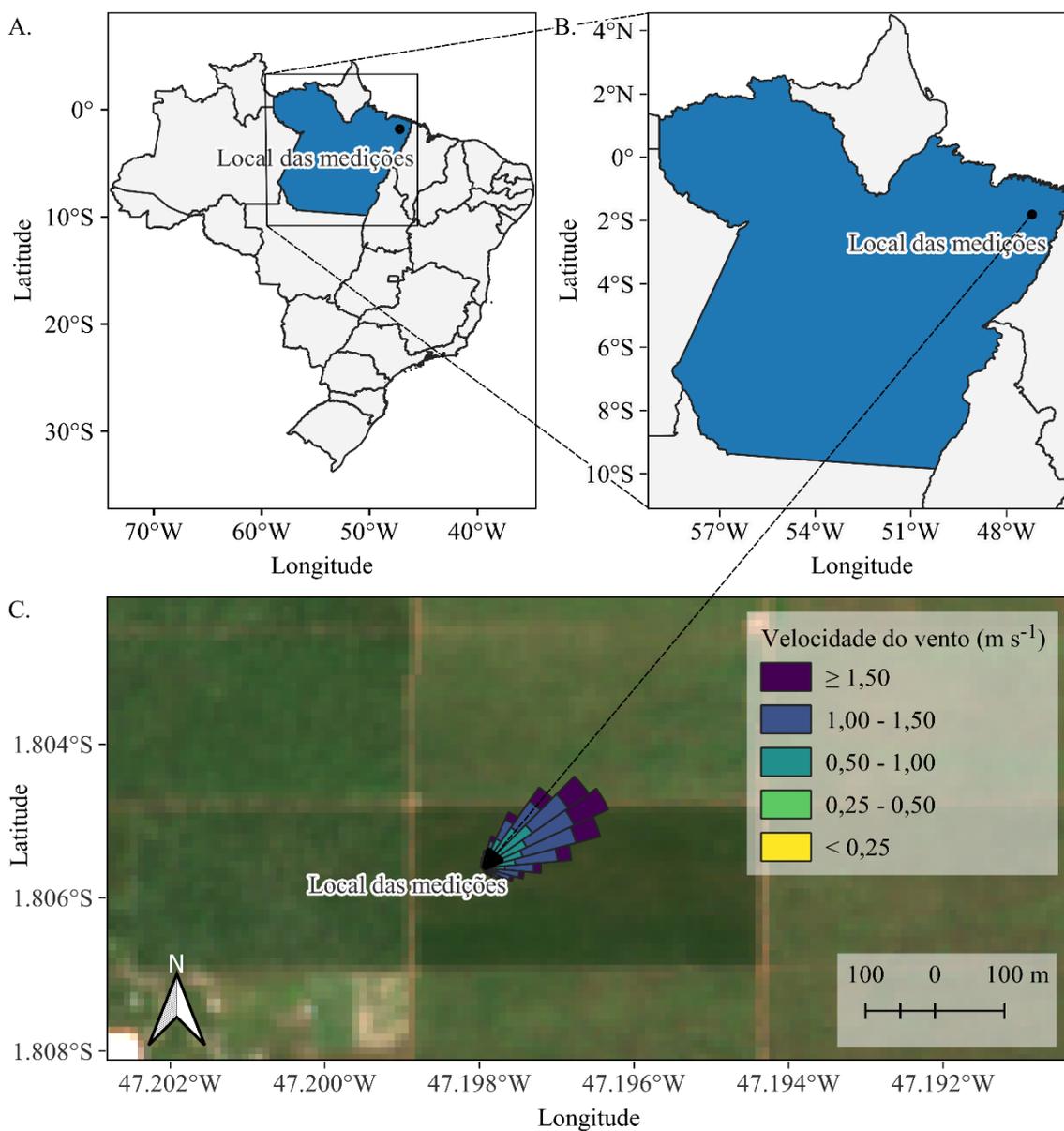


Figura II.1 — Localização do experimento no Brasil (A), no estado do Pará (B) e imagem de satélite mostrando o plantio onde o experimento foi conduzido em agosto de 2020 (C).

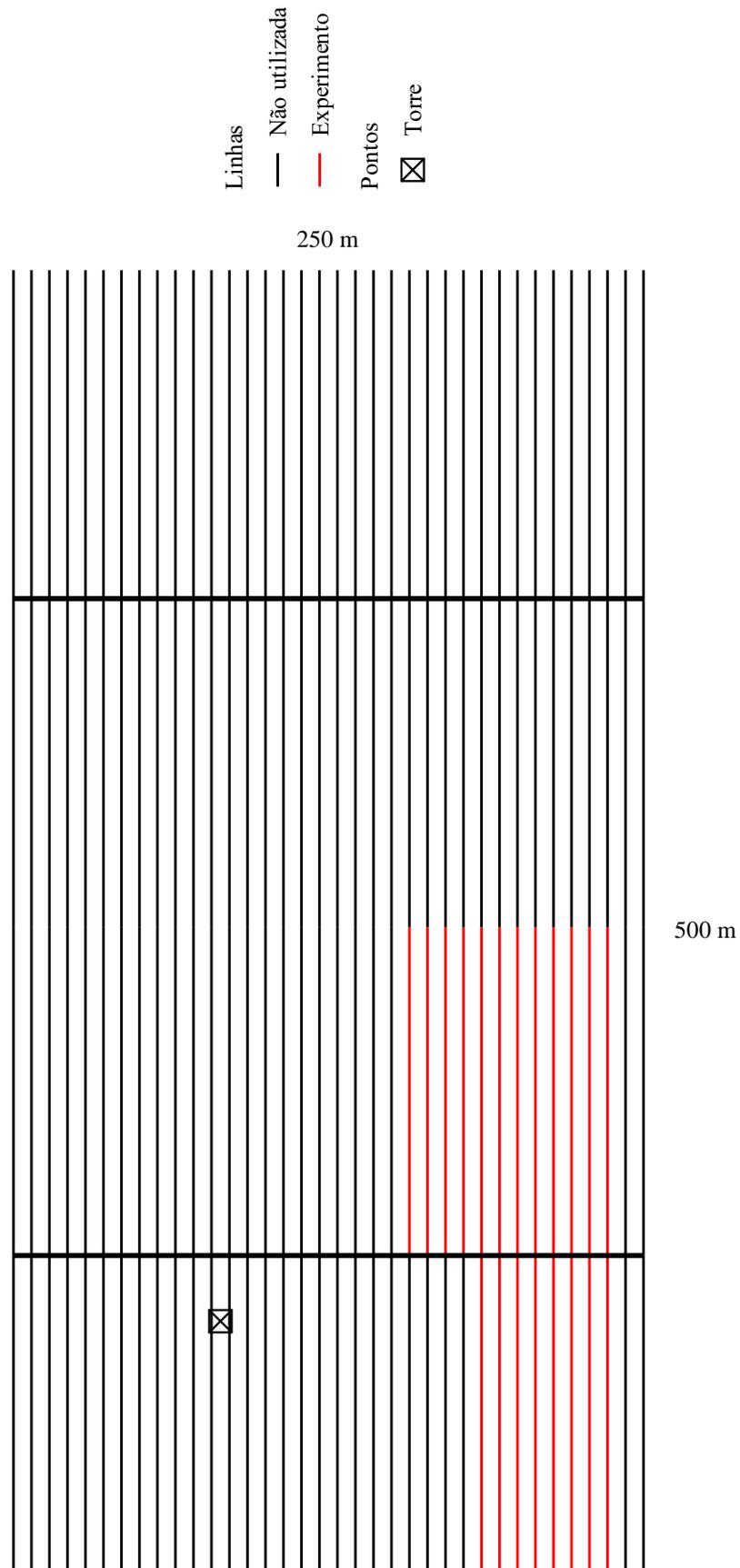


Figura II.2 — Croqui do plantio do experimento, com destaque para a área onde foi instalada a torre micrometeorológica e a área onde foi realizada a diferenciação das lâminas de irrigação (em vermelho). As linhas mais grossas indicam a tubulação de irrigação central. As linhas mais finas indicam as linhas de plantio.

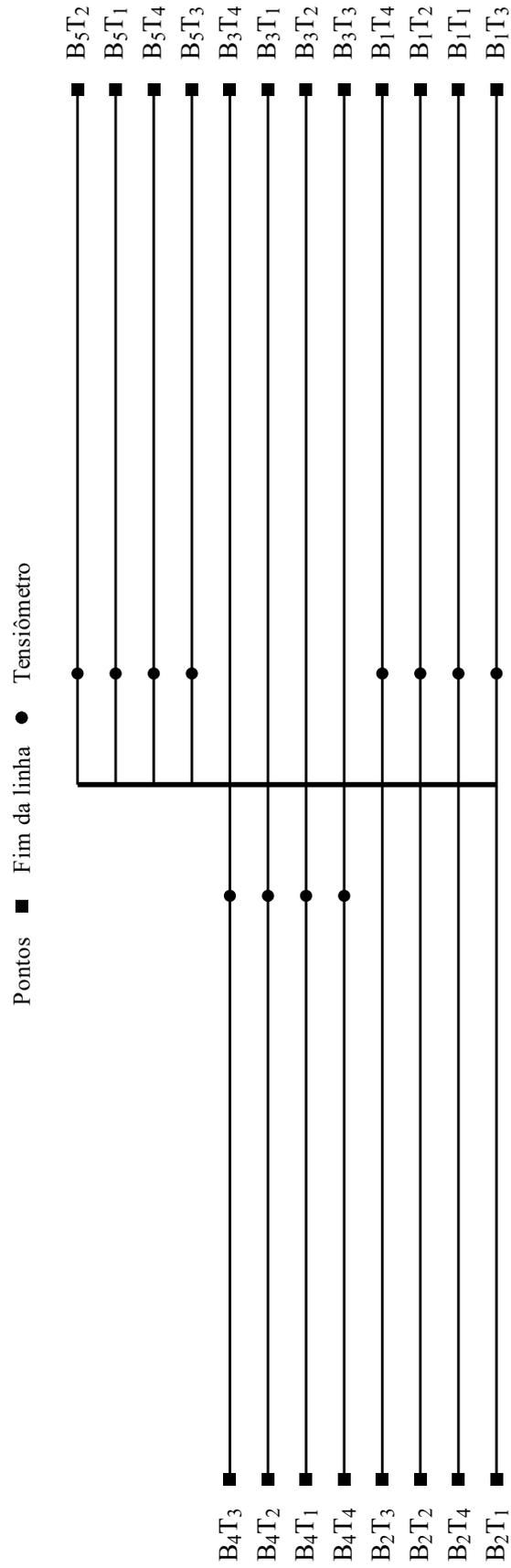


Figura II.3 — Destaque para a área onde o experimento com as lâminas de irrigação foi conduzido. B indica “bloco” e T indica o tratamento.