



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



VITOR FERNANDO NOGUEIRA

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE PLANTA ANANICANTE DE “LIMÃO” TAHITI POR LISIMETRIA DE PESAGEM

ARARAS SP - 2025



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



VITOR FERNANDO NOGUEIRA

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE PLANTA ANANICANTE DE “LIMÃO” TAHITI POR LISIMETRIA DE PESAGEM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Agrônoma – CCA – UFSCar para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Douglas Roberto Bizari

ARARAS SP – 2025

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus avós, que sempre me apoiam e me incentivam incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, primeiramente, Michelle Zanardi e Juliano Nogueira, por me incentivarem a estudar e a não desistir, apesar de todas as nossas dificuldades.

Agradeço aos amigos queridos que a graduação me proporcionou por todo o apoio e por serem as pessoas brilhantes e maravilhosas que são. Sem eles a graduação não teria sido a mesma.

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Dr. Douglas Roberto Bizari pela oportunidade de realizar este trabalho, pelas orientações e pela confiança.

Agradeço à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos e Embrapa Meio Ambiente pelo suporte e parceria para a realização deste experimento.

Agradeço à Universidade Federal de São Carlos, pela excelência em ensino, aos seus docentes e demais funcionários.

Agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização do presente trabalho. A todos, o meu muito obrigado!

“A única maneira de não cometer erros é fazendo nada. Este, no entanto, é certamente um dos maiores erros que se poderia cometer em toda uma existência.”

Confúcio

RESUMO

Este estudo quantificou a demanda hídrica de planta ananicante de “limão” Tahiti (*Citrus latifolia Tanaka*) enxertada em porta-enxerto IAC 10/152, utilizando lisimetria de pesagem em ambiente protegido. O experimento, conduzido em Araras-SP (2020-2024), monitorou parâmetros biométricos (altura, área de projeção da copa) e variáveis agrometeorológicas, correlacionando-as com a evapotranspiração da cultura (ETc) e o coeficiente de cultura (Kc). Os resultados indicaram um consumo hídrico médio de 139,30 mm, com picos de até 1.077,91 mm na fase produtiva, e uma relação exponencial entre área da copa e ETc ($R^2 = 0,853$). O Kc médio foi de 0,60, variando sazonalmente: mínimo (0,21–0,31) no estágio inicial/inverno e máximo ($>1,0$, atingindo 1,66) na maturação/primavera-verão. O crescimento vegetativo mostrou-se sensível à sazonalidade climática, com maior desenvolvimento em temperaturas $>23^{\circ}\text{C}$ e radiação solar elevada (23–35 MJ), enquanto invernos com amplitude térmica acentuada (3–37,4 $^{\circ}\text{C}$) reduziram a taxa de crescimento. Conclui-se que o manejo irrigatório do “limão” Tahiti ananicante deve considerar a expansão da copa e as variações fenológicas para otimização hídrica, com Kc ajustável conforme a fase fenológica.

Palavras-chave: Consumo de água, evapotranspiração, manejo de irrigação, gotejamento, citricultura.

ABSTRACT

This study quantified the water demand of dwarfing 'Tahiti' lime plants (*Citrus latifolia* Tanaka) grafted onto IAC 10/152 rootstock, using weighing lysimetry in a protected environment. The experiment, conducted in Araras-SP (2020–2024), monitored biometric parameters (height, canopy projection area) and agro-meteorological variables, correlating them with crop evapotranspiration (ET_c) and the crop coefficient (K_c). The results indicated an average water consumption of 139.30 mm, with peaks of up to 1,077.91 mm during the productive phase, and an exponential relationship between canopy area and ET_c ($R^2 = 0.853$). The average K_c was 0.60, varying seasonally: minimum (0.21–0.31) during the initial stage/winter and maximum (>1.0, reaching 1.66) at maturation/spring-summer. Vegetative growth proved sensitive to climatic seasonality, with greater development at temperatures >23°C and high solar radiation (23–35 MJ), while winters with significant thermal amplitude (3–37.4°C) reduced the growth rate. It is concluded that the irrigation management of dwarfing 'Tahiti' lime should consider canopy expansion and phenological variations for water optimization, with K_c adjustable according to the phenological stage.

Keywords: Water consumption, evapotranspiration, irrigation management, drip irrigation, citrus cultivation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental extraída do Google Earth no dia 14 de maio de 2025. Araras, SP, 2025.....	20
Figura 2. Imagem do local do ensaio “in loco”. Araras, SP, 2025.....	21
Figura 3. Imagem da central de controle e da planta contida no lisímetro. Araras, SP, 2025.....	22
Figura 4. Croqui do layout do projeto. Araras, SP, 2025.....	23
Figura 5. Estação meteorológica automática da universidade. Araras, SP, 2025.....	24
Figura 6. Realização das medições de altura, diâmetro da copa na linha e na entrelinha, diâmetro do tronco do porta-enxerto e do caule da copa. Araras, SP, 2024.....	26
Figura 7. Acompanhamento temporal da altura, área de projeção da copa e coeficiente de cultura (K_c) de limeira ácida Tahiti. Araras, SP, 2020/24	33
Figura 8. Relação entre consumo hídrico da cultura e área de projeção da copa. Araras, SP, 2025.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físicas do solo da área de plantio das mudas de lima ácida Tahiti. Araras, SP, 2020.....	20
Tabela 2. Resumo dos dados agrometeorológicos coletados pela estação durante o período de 2020 a 2024. Araras, SP, 2025.....	26
Tabela 3. Resumo dos dados agrometeorológicos coletados pela estação durante o período de 2020 a 2024. Araras, SP, 2025.....	28
Tabela 4. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” em todo o período (2020-2024). Araras, SP, 2025.....	29
Tabela 5. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” no período de 2020 a 2021. Araras, SP, 2025.....	30
Tabela 6. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão Tahiti” no período de 2021 a 2022. Araras, SP, 2025.....	31
Tabela 7. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” no período de 2022 a 2023. Araras, SP, 2025.....	32
Tabela 8. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” no período de 2023 a 2024. Araras, SP, 2025.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. Importância econômica e social da citricultura brasileira	13
2.1.1. Importância do cultivo de lima ácida Tahiti no Brasil	13
2.2. Adensamento de plantio na cultura da lima ácida Tahiti	15
2.3. Importância da irrigação em citricultura	15
2.4. Estimativa do consumo hídrico e métodos para determinação da evapotranspiração em citros	16
3. OBJETIVOS	19
3.1. Objetivo geral	19
3.2. Objetivos específicos	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1. Local do ensaio	20
4.2. Instalação do experimento e condução da irrigação	21
4.3. Análise biométrica das plantas	25
4.4. Análise estatística	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6. CONCLUSÃO	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

A lima ácida Tahiti (*C. latifolia* Tanaka) popularmente conhecida como “limão” Tahiti é uma fruta de importância econômica no Brasil. Ela desempenha um papel significativo na geração de emprego e renda em muitos municípios e é cultivada tanto por pequenos produtores quanto por médios produtores (SILVA, 2023).

De acordo com dados da FAO de 2025, o Brasil produz cerca de 1,6 milhão de toneladas de limões e limas por ano, especialmente o “limão” Tahiti, que é comum na culinária brasileira e em bebidas como a caipirinha. O estado de São Paulo lidera a produção nacional, com 57% da área plantada e 73% da produção (DE LIMA, 2023). Em termos de vendas internacionais, em 2023, o Brasil exportou 166,6 mil toneladas de “limão”, gerando um faturamento de US\$ 172,34 milhões (IBGE, 2023).

Do total da produção brasileira, o Centro De Estudos Avançados Em Economia Aplicada– Cepea (2024) informou que 15% são destinados à exportação e 85% ao mercado interno sendo 70% destinado para o consumo “in natura” e 30% para a indústria (GERALDINI, RIBEIRO, 2019). Ademais, de acordo com dados do SEBRAE (2016), o resíduo industrial da produção de suco é usado como matéria-prima nas indústrias alimentícia, farmacêutica e de rações devido à sua composição de fibras, pectina e vitamina C juntamente com o óleo essencial da casca que é um produto altamente valorizado.

Para atender a demanda do mercado, e reduzir os riscos do excesso hídrico prolongado, uma tendência que tem se destacado na citricultura brasileira, particularmente nos anos recentes, é a adoção da irrigação (PIRES et al., 2005).

O incremento da produtividade, em porcentagem, pode variar dependendo da região, as práticas culturais, a combinação copa e porta-enxerto, o manejo e o método de irrigação e o clima. Porém, aumentos de 20% até mesmo de 100% pela adoção de irrigação em citrus foram observados no Brasil em diferentes regiões (COELHO et al., 2006; PIRES et al., 2011; SILVEIRA et al., 2020).

A irrigação é necessária para repor o consumo de água pelas culturas geralmente quantificado pela água perdida pela evaporação da superfície do solo e pela transpiração (MOURA, 1992; REICHARDT, 1985). Diante disso, medir a quantidade adequada de água da evapotranspiração pelo sistema solo-planta-atmosfera é essencial para o planejamento, dimensionamento e gerenciamento da irrigação, para

assim, repor corretamente a quantidade de água que supra as perdas por evapotranspiração, garantindo o desenvolvimento das plantas em condições ideais.

Uma maneira de monitorar o consumo de água pelas plantas é utilizando lisímetros eletrônicos de pesagem. Este método automatiza a medição com células de carga colocadas embaixo de uma estrutura impermeável ou suporte, registrando a variação de peso. Dessa forma, quando as plantas consomem água ou ocorre evaporação, há uma redução no peso do volume de controle, que é proporcional à evapotranspiração. Esta é determinada com base na diferença de peso medida em intervalos de menos de 24 horas por essas células de carga, instaladas dentro dos lisímetros, entre uma irrigação e outra. (ARRIETA, 2022).

Assim, considerando o exposto, o objetivo do trabalho foi determinar a necessidade hídrica de uma planta ananicante de “limão” Tahiti, por lisimetria de pesagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância econômica e social da citricultura brasileira

As frutas cítricas consolidaram-se no segundo lugar do ranking das frutas mais produzido e consumido no mundo, desempenhando um papel crucial tanto na economia quanto na alimentação humana. Devido ao seu valor nutricional e versatilidade, essas frutas são frequentemente alvo de estudos científicos e análises de mercado, reforçando sua relevância social. No contexto global, o Brasil se destaca como um dos principais produtores e exportadores, liderando o setor em várias categorias de citros. (DINIZ, 2024).

Na safra 2023/2024, a produção global de citros chegou a 103 milhões de toneladas, demonstrando a força desse segmento agrícola. Entre as variedades mais cultivadas, a laranja se destaca, com uma colheita aproximada de 47,4 milhões de toneladas. Nesse cenário, o Brasil é líder do mercado, contribuindo com cerca de 15,3 milhões de toneladas – o que representa 32,28% do total mundial (USDA, 2024). Essa liderança abrange não apenas a produção de frutas frescas, mas também o processamento de derivados, como o suco de laranja, amplamente exportado.

A região Sudeste do Brasil, especialmente o cinturão citrícola de São Paulo e do Triângulo/Sudoeste de Minas Gerais, destaca-se como o epicentro da citricultura nacional, responsável por 83,9% da produção total do país (IBGE, 2021). Segundo projeções do Fundo de Defesa da Citricultura – Fundecitrus (2023) a safra 2025/2026 de laranja por exemplo pode chegar a 314,60 milhões de caixas (40,8 kg). Esse sucesso vai além da quantidade produzida, refletindo um modelo de eficiência que abrange todas as etapas do processo produtivo, desde o cultivo cuidadoso das frutas até a industrialização e a transformação em suco, um dos produtos mais valorizados no mercado global.

2.1.1. Importância do cultivo de lima ácida Tahiti no Brasil

Além das laranjas, os limões e limas também vêm ganhando espaço no mercado internacional. Nos últimos anos, sua produção tem registrado crescimento sig-

nificativo, impulsionada pelo aumento da demanda e pela adaptação a diferentes climas. A Embrapa (2024) divulgou que a área colhida em 2023/2024 do “limão” Tahiti alcançou a marca de 66.339 ha com rendimento médio de 25,97 t/ha. Esse avanço tem gerado um cenário bastante promissor para o setor, a produção nacional alcança aproximadamente 1,7 milhões de toneladas de limões atualmente. Enquanto a maior parte dessa produção atende ao mercado interno, o crescimento das exportações também merece destaque (USDA, 2023; FAO, 2022).

No que diz respeito ao mercado interno, a dinâmica da distribuição reflete uma forte presença de pequenos produtores, que desempenham um papel essencial na cadeia produtiva. Esses agricultores levam suas colheitas principalmente para feiras livres, centrais de abastecimento (Ceasas) e supermercados, garantindo o suprimento constante de limões frescos para atender à demanda local. Essa proximidade entre produtores e consumidores reforça a importância desse elo na economia regional e no abastecimento do mercado interno (COSTA et al., 2022). No entanto, além do mercado interno, o Brasil também tem ampliado sua presença no mercado internacional, especialmente na União Europeia (TAVARES et al., 2023)

No cenário das exportações de “limões” brasileiros, a União Europeia se destaca como o principal mercado consumidor, com os Países Baixos e o Reino Unido liderando as importações. Em menor escala, outros países como Espanha, Bélgica, Argentina e Chile também figuram como destinos relevantes para o produto nacional. Nesse contexto, é importante ressaltar que os Países Baixos desempenham um papel estratégico nesse processo, funcionando como um grande centro de distribuição dentro do continente europeu. A partir da Holanda, os “limões” são redistribuídos principalmente para Alemanha, França e Portugal, consolidando sua importância no fluxo comercial dessa fruta (DEL FIORI, 2025).

A demonstrada liderança brasileira no mercado global de “limões” resulta não apenas de condições climáticas favoráveis, mas também de investimentos em tecnologia. A produção de “limão” no Cinturão, como é conhecido como maior polo citrícola do país, teve um salto qualitativo e quantitativo graças à modernização do setor, com práticas agrícolas mais eficientes – como irrigação controlada, manejo integrado de pragas, uso de reguladores vegetais para safras fora de época, melhor controle nutricional e adensamento (AMARO et al., 2003; MONTEIRO, 2024).

2.2. Adensamento de plantio na cultura da lima ácida Tahiti

A utilização de porta-enxertos que reduzem o porte das plantas, como o trifoliata “Flying Dragon”, tem se mostrado uma estratégia relevante para o manejo eficiente de pomares cítricos. Essa técnica facilita os tratos culturais durante todas as fases do desenvolvimento do pomar, além de simplificar a colheita, tornando-se especialmente importante em sistemas de plantio adensado (MARO, 2024).

O adensamento, por sua vez, desempenha um papel importante na modernização da citricultura, pois possibilita a otimização do uso da terra e promove uma maior cobertura vegetal, reduzindo a exposição do solo à erosão. Além disso, como mais plantas por hectare, essa prática contribui para elevar a produção por área, acelerando o retorno sobre o investimento inicial. Esse aspecto é particularmente relevante considerando os altos custos envolvidos na implantação de pomares cítricos, o que torna o adensamento uma estratégia economicamente vantajosa (SANTOS, 2024).

No caso específico da lima ácida Tahiti, o emprego de porta-enxertos ananizantes – que reduzem o porte das plantas – também tem demonstrado resultados bastante positivos. Um estudo conduzido por Stuchi et al. (2003) avaliou o desempenho de lima ácida Tahiti enxertada em “Flying Dragon”, comparando diferentes densidades de plantio. O aumento do adensamento proporcionou ganhos significativos, mesmo sem o uso de irrigação suplementar o que demonstrou o potencial dessa abordagem para maximizar a eficiência produtiva.

2.3. Importância da irrigação em citricultura

De acordo com dados da Fundecitrus (2023), a área irrigada de citros no cinturão agrícola brasileiro representa 45% do total, equivalente a aproximadamente 177.757 hectares, conforme o inventário realizado em 2025. Esse número demonstra um crescimento significativo de 26% em relação ao inventário de 2022, evidenciando a expansão dessa prática entre os produtores. As regiões como Triângulo Mineiro (TMG) e Bebedouro (BEB) por exemplo possuem as maiores áreas irrigadas, com 98% e 84% de área total, respectivamente.

A irrigação desempenha um papel essencial na melhoria da produtividade e qualidade dos frutos. Quando bem conduzida, essa prática contribui para características como maior tamanho e peso, coloração mais intensa e maior teor de óleos es-

senciais na casca. Para garantir resultados satisfatórios, é fundamental compreender a fenologia da lima ácida Tahiti, uma vez que suas necessidades hídricas variam conforme as fases de desenvolvimento (COELHO et al., 1993).

Diante disso, a irrigação é estratégica devido à irregularidade pluviométrica, que muitas vezes causa déficits hídricos em determinadas épocas críticas do ano. Entre os métodos mais utilizados nas áreas citrícolas, destacam-se a microaspersão e o gotejamento. O gotejamento se destaca por sua alta eficiência, permitindo um controle preciso da umidade e da aeração do solo, além de minimizar o risco de erosão ao evitar o escoamento superficial (BOZELLI, 2023).

A irrigação por gotejamento é uma alternativa eficiente para os pomares de citrus, pois permite uma distribuição precisa de água e nutrientes diretamente na zona radicular das plantas, reduzindo desperdícios e minimizando o déficit hídrico. Esse método melhora a absorção dos nutrientes e favorece o crescimento saudável das árvores, além de contribuir para a redução do risco de doenças na parte aérea, uma vez que mantém as folhas secas. Com isso, torna-se uma opção sustentável que otimiza os recursos hídricos, melhora a saúde do pomar e impulsiona a produtividade de forma equilibrada (RIVULIS, 2025).

2.4. Estimativa do consumo hídrico e métodos para determinação da evapotranspiração em citros

De acordo com Bozelli (2023) O consumo anual de água pelas plantas cítricas varia entre 600 e 1.200 milímetros, dependendo das condições climáticas locais. No Estado de São Paulo, por exemplo, estima-se que o consumo médio diário seja de cerca de 3 milímetros em pomares irrigados, enquanto em áreas não irrigadas esse valor cai para aproximadamente 1,5 milímetros por dia. Esses dados reforçam a importância da adoção de práticas adequadas de irrigação para maximizar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas citrícolas, garantindo tanto a viabilidade econômica quanto a preservação dos recursos naturais (BOZELLI, 2023).

Para planejar e operar um projeto de irrigação visando a máxima produção e a qualidade do produto é fundamental adotar o uso racional da água. Isso requer conhecimentos específicos sobre a inter-relação entre solo, água, planta e atmosfera, além de um manejo adequado da irrigação. Esses elementos são essenciais para

garantir que os recursos hídricos sejam utilizados de forma eficiente e sustentável (DA SILVA, 2020).

O alto déficit hídrico é uma realidade em muitas regiões, tornando as práticas de irrigação indispensáveis para assegurar a produtividade agrícola. No entanto, diante da escassez de recursos hídricos, faz-se necessário buscar formas de otimizar o uso da água na irrigação. Para isso, é fundamental estimar corretamente a demanda evapotranspirativa ou evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultura (K_c), que é utilizado para calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c). Esses parâmetros permitem ajustar a quantidade de água aplicada às necessidades específicas da planta, promovendo eficiência no uso desse recurso tão valioso (COSTA et al., 2023).

A demanda hídrica das plantas, que varia sazonalmente e de acordo com as fases fenológicas (SOUSA et al., 2021). Com base nesse entendimento, torna-se essencial determinar a lâmina de água ideal a ser aplicada em cada estágio do desenvolvimento da planta. Essa prática não apenas garante processos fundamentais, como a floração, o pegamento e o crescimento dos frutos, mas também influencia diretamente na qualidade final do produto. Além disso, um manejo adequado da irrigação pode reduzir a concentração de sólidos solúveis totais, apesar de parecer desvantajosa para a indústria, enquanto aumenta a acidez total e os teores de açúcares no suco de plantas cítricas atendendo nichos específicos de mercado (SILVA JUNIOR, 2022)

O conhecimento preciso sobre a demanda hídrica da cultura também constitui um elemento estratégico na redução do desperdício de água durante a irrigação. Ao ajustar a quantidade de água aplicada às necessidades reais da planta, é possível evitar o uso excessivo desse recurso, promovendo uma produção mais sustentável. Nesse sentido, a determinação correta da demanda hídrica se torna uma ferramenta indispensável para otimizar o uso da água e garantir a viabilidade econômica e ambiental dos sistemas agrícolas (PEDDINTI; KAMBHAMMETTU, 2019).

Para definir essa quantidade de água, a evapotranspiração (ET) tem sido amplamente utilizada como um parâmetro essencial para gerenciar a irrigação de forma mais eficaz, maximizando o aproveitamento desse recurso. A ET engloba dois processos distintos: a transpiração das plantas e a evaporação do solo. Essa variável pode ser estimada por meio de equações matemáticas ou medida diretamente. No entanto, o método mais comum envolve o uso de fórmulas que demandam informa-

ções climáticas e fisiológicas, as quais nem sempre estão acessíveis aos agricultores (CARVALHO, 2020).

Dentre os métodos empregados para estimar a evapotranspiração (ET), destacam-se aqueles baseados no balanço de energia, como o método da Razão de Bowen, e os aerodinâmicos, como o modelo de Penman-Monteith. Esses métodos são amplamente adotados em nível global. No entanto, se baseiam em modelos matemáticos indiretos (PEREIRA, 2024)

Uma alternativa para medir a ETc de forma direta são os lisímetros. Esses dispositivos consistem em recipientes preenchidos com solo, instalados no campo, e permitem mensurar a evapotranspiração quando cultivados com determinada espécie vegetal. Quando não há cobertura vegetal, eles possibilitam medir apenas a evaporação do solo (VALBUENA MATERÁN et al., 2009). Assim, os lisímetros se apresentam como uma ferramenta prática para obtenção de dados precisos sobre o consumo hídrico das culturas, embora sua implementação possa exigir certos ajustes e investimentos.

Os lisímetros são equipamentos projetados para medir, de forma quantitativa, o consumo hídrico das plantas. Além disso, possuem relevância crítica na modelagem de dados relacionados ao balanço hídrico do solo (Martinez et al., 2014) e são amplamente empregados para calibrar sensores de umidade do solo. Dentre os tipos mais utilizados, destacam-se os lisímetros de pesagem, que operam por meio da medição da diferença de massa. Esse sistema permite avaliar a quantidade de água perdida pela planta e pelo solo para a atmosfera ao longo do tempo. Quando combinados com tecnologias modernas de pesagem e sistemas digitais de coleta de dados, esses dispositivos sobressaem-se pôr sua alta precisão (Carvajal et al., 2017).

Diante do exposto, fica evidente que a estimativa precisa da evapotranspiração (ETc) é um pilar fundamental para o manejo hídrico eficiente na citricultura, especialmente para cultivos estratégicos como a lima ácida Tahiti. Os métodos baseados em lisimetria, pela sua acurácia ao medir diretamente o consumo hídrico, consolidam-se como ferramentas científicas indispensáveis (Alam et al., 2024).

Assim, a pesquisa com lisímetros em pomares de lima ácida Tahiti não apenas responde à necessidade de sustentabilidade hídrica em regiões com déficit pluvial, mas também viabiliza ganhos econômicos pela otimização da produtividade e qualidade dos frutos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Determinar a necessidade hídrica de uma planta ananicante de “limão” Tahiti cultivada em um lisímetro de pesagem.

3.2. Objetivos específicos

a) Determinar o coeficiente de cultura (K_c) de uma planta jovem de “limão” Tahiti ananicante;

b) Determinar as curvas biométricas de crescimento da parte aérea da cultura e relacioná-las ao consumo hídrico.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local do ensaio

O experimento foi conduzido em área experimental do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar (CCA – UFSCar), do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental (DRNPA) apresentando como fatores climáticos a temperatura média anual de 21,4°C, com a mínima no mês de julho de 17,7°C e a máxima no mês de fevereiro de 24,1°C. A pluviosidade média anual é de 1.441 mm com escassez hídrica entre os meses de abril e outubro (SENTELHAS et al., 2003). Na figura 1 está destacada a localização da área experimental.



Figura 1. Localização da área experimental extraída do Google Earth no dia 14 de maio de 2025. Araras, SP, 2025.

O solo da área é um Latossolo Vermelho Distrófico (YOSHIDA; STOLF, 2016), com horizonte A moderado e de textura argilosa. As frações texturais, para as profundidades de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas do solo da área de plantio das mudas de lima ácida Tahiti. Araras, SP, 2020.

Camada (m)	Frações texturais (%)		
	Argila	Silte	Areia
0-0,20	53	30	17
0,20-0,40	60	23	17

Fonte: Autoral

Neste local, o regime térmico do ar segue de perto as estações do ano, mudando gradualmente com médias mensais altas no verão, leve redução no outono, valores mais baixos no inverno e aumento na primavera. Esse modelo climático é característico do clima tipo Cwa pela classificação de Köppen, (1948), sendo mesotérmico com verões quentes e estação seca de inverno, com temperatura média inferior a 18°C, mas superior a 3°C no mês mais frio, e temperatura média superior a 22°C no mês mais quente (ANGELOCCI et al., 2013). A seguir, a figura 2 mostra a área do ensaio.



Fonte: Autoral

Figura 2. Imagem do local do ensaio “in loco”. Araras, SP, 2025.

4.2. Instalação do experimento e condução da irrigação

Na área experimental foram plantadas 24 mudas de “limão” Tahiti, distribuídas em 3 linhas, espaçadas de 3,0 m, sendo que em cada uma delas contém 8 plantas, com espaçamento de 2,0 m entre elas. O experimento foi realizado em ambiente protegido constituído por filme aditivado de 150 μ na cobertura (sistema guarda-chuva) para evitar a influência da chuva e laterais abertas.

Para o correto manejo da irrigação, a lâmina de água aplicada foi determinada pela reposição da evapotranspiração da cultura (ETc) medida nos lisímetros, respei-

tando-se o turno de rega de 4 dias. Cada lisímetro possui área de 1,68m² e comportava uma planta. Eram apoiados sobre células de carga e ligados a um coletor de dados (Campbell Scientific Inc). Os dados eram armazenados a cada 30 minutos. A Figura 3 mostra uma imagem geral da planta contida no lisímetro e seu painel de controle e a Figura 4 mostra um layout do projeto com o sistema de irrigação, plantas e o lisímetro.



Fonte: Autoral

Figura 3. Imagem da central de controle e da planta contida no lisímetro. Araras, SP, 2025.

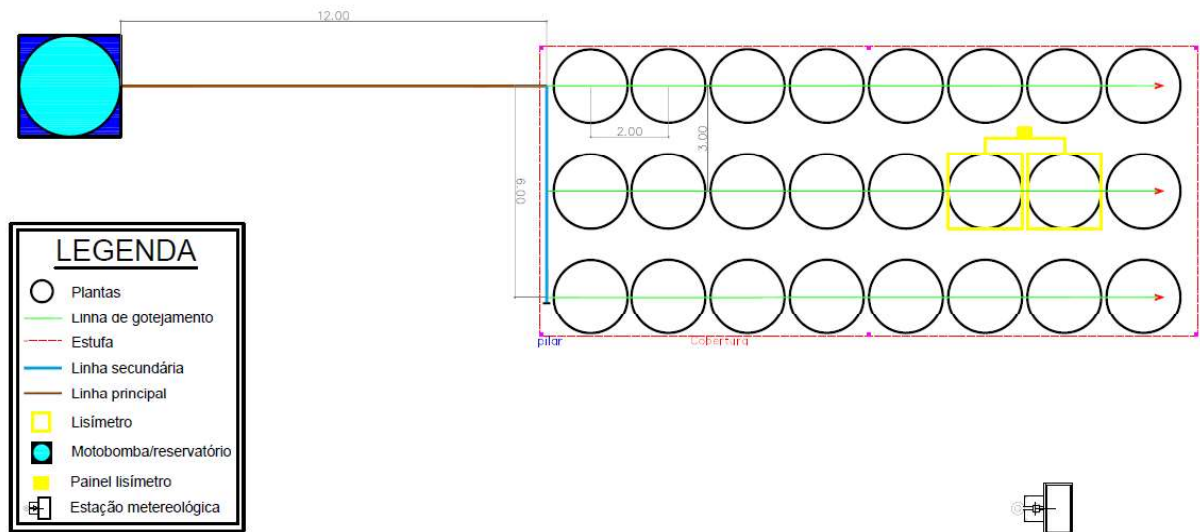


Figura 4. Croqui do layout do projeto. Araras, SP, 2025.

O consumo hídrico apurado era aquele referente à diferença de peso de duas leituras consecutivas e totalizado ao final do dia. Uma estação meteorológica completa fazia parte do instrumental disponível, fornecendo em base horária e diária as medidas da evapotranspiração (ET_o).

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Os dados (temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) utilizados para se estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) foram medidos em uma Estação Meteorológica Automática (EMA) da universidade instalada próximo à área experimental podendo ser vista na figura 4 e são apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3 e foram calculados pela Equação 1.



Figura 5. Estação meteorologia automática da universidade. Araras, SP, 2025.

$$ET_o = \frac{\{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times [900 \div (T + 273)] \times u_2 \times (e_s - e_a)\}}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (1)$$

Em que:

- R_n - radiação líquida na superfície da cultura, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;
- G - densidade de fluxo de calor do solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;
- T - temperatura média diária do ar a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$;
- u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, ms^{-1} ;
- e_s - pressão de vapor de saturação, kPa;
- e_a - pressão parcial de vapor, kPa;
- Δ - inclinação da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- γ - coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

Conforme descrito por Medeiros et al. (2003), o cálculo da evapotranspiração a partir de dados obtidos por lisímetro baseia-se na variação da massa do conjunto solo-caixa, sendo essa diferença determinada pela subtração da menor massa da maior. Esse procedimento é realizado diariamente, com a massa sendo derivada a partir da conversão do sinal elétrico gerado pelo equipamento.

A partir desses dados, a lâmina de água evapotranspirada é calculada dividindo-se a diferença de massa pela área superficial da caixa lisimétrica, que é de 1,68 m², de acordo com a equação 2 do referido estudo.

$$ETc = (MMA - MME) \div A \quad (2)$$

Em que: ETc - evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;
 MMA - massa maior, Kg;
 MME - massa menor, Kg;
 A - área da caixa, m².

A partir da obtenção dos valores de evapotranspiração da cultura (ETc), da evapotranspiração de referência (ETo), a relação entre as duas permitiu obter-se os valores de coeficiente de cultura (Kc) com a equação 3 para cada fase fenológica ao longo dos ciclos da cultura.

$$Kc = ETc \div ETo \quad (3)$$

Em que: Kc: coeficiente de cultura, adimensional;
 ETc: evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;
 ETo: evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹.

4.3. Análise biométrica das plantas

Nas análises biométricas como a altura de plantas, diâmetro da copa na linha e na entrelinha de plantio utilizou-se uma trena. Também foram medidas, com auxílio de paquímetro, os diâmetros do tronco (porta-enxerto) e do caule da copa, respectivamente a 5 cm abaixo e acima do ponto de enxertia, e posteriormente o índice de área foliar foram realizadas segundo metodologia descrita por Coelho Filho et al. (2005) com os dados coletados, mensalmente, em um período de 2020 a 2024.

Na figura 6 é possível observar como foram realizadas algumas medições realizadas ao longo do experimento.



Figura 6. Realização das medições de altura, diâmetro da copa na linha e na entre-linha, diâmetro do tronco do porta-enxerto e do caule da copa. Araras, SP, 2024.

4.4. Análise estatística

Os resultados foram analisados estatisticamente com o auxílio do programa Excel®, passando por análise exploratória (estatística descritiva) para verificar a normalidade dos dados, ou a necessidade de transformação para sua normalização, bem como a variabilidade e a ocorrência de dados discrepantes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os dados agrometeorológicos sazonais coletados entre junho de 2020 e maio de 2024, abrangendo quatro ciclos completos das estações. Os valores correspondem às temperaturas do ar (Tar, em °C), umidade relativa (UR, em %) e radiação solar global (Qg, em MJ), com seus respectivos máximos, mínimos e médias por período compreendidos aos intervalos entre biometrias.

Tabela 2. Resumo dos dados agrometeorológicos coletados pela estação durante o período de 2020 a 2024. Araras, SP, 2025.

PERÍODO	ESTAÇÃO	Tar (°C)			UR (%)			Qg (MJ)		
		max	min	média	max	min	média	max	min	média
26/06/2020 - 20/09/2020	INVERNO	35.80	4.6	21.6	100	26	72	27	0.3	18.5
21/09/2020 - 19/12/2020	PRIMAVERA	39.50	11.6	23.7	100	28	82	35	6.6	23.9
20/12/2020 - 19/03/2021	VERÃO	33.80	15.6	23.7	100	43	92	32	8	23
20/03/2021 - 19/06/2021	OUTONO	33.10	9.5	20.6	100	25	85	27	3.2	18.8
20/06/2021 - 20/09/2021	INVERNO	37.40	3	19.9	100	24	73	26	1.9	18.6
21/09/2021 - 19/12/2021	PRIMAVERA	37.70	11.9	22.6	100	20	85	33	5	21.1
20/12/2021 - 19/03/2022	VERÃO	33.90	15.2	23.8	100	41	91	30	5.5	20.1
20/03/2022 - 19/06/2022	OUTONO	31.90	4.9	20.2	100	37	89	24	6.1	16.2
20/06/2022 - 20/09/2022	INVERNO	34.60	8.2	19.7	100	32	79	28	5.2	17.1
21/09/2022 - 19/12/2022	PRIMAVERA	34.30	9.6	21.9	100	35	88	34	5.2	22.5
20/12/2022 - 19/03/2023	VERÃO	33.00	15.5	22.9	100	31	95	30	3	20.2
20/03/2023 - 19/06/2023	OUTONO	33.20	6.5	20.3	100	39	91	26	1.8	16.8
20/06/2023 - 20/09/2023	INVERNO	34.80	7.5	20.5	100	33	83	25	2.9	16.7
21/09/2023 - 19/12/2023	PRIMAVERA	39.10	11.8	24.8	100	32	87	33	2.7	23.1
20/12/2023 - 19/03/2024	VERÃO	34.90	15.6	24.6	100	50	93	33	4.4	23.3
20/03/2024 - 09/05/2024	OUTONO	33.30	14.1	23.6	100	46	90	25	3.8	17.4
Resumo										
Média		35.0	10.3	22.2	100.0	34.2	86.0	29.3	4.1	19.8
Total		-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoral

É possível notar grande amplitude térmica nos invernos (até 34,4°C), contrastando com a estabilidade térmica dos verões. A umidade relativa média permaneceu alta (>85%), exceto em invernos (<80%), com episódios críticos de seca na primavera (UR mínima de 20%). A radiação solar foi mais intensa nas primaveras (médias >23 MJ), enquanto invernos registraram os menores valores (médias <18 MJ). Destaca-se ainda o aumento da temperatura média nas primaveras (+1,1°C entre 2020–2023) (Tabela 2).

A Tabela 3 complementa a análise agrometeorológica com dados sazonais de velocidade do vento, precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o) no período de junho de 2020 a maio de 2024. Os valores incluem máximos e médias para velocidade do vento, totais e médias diárias para precipitação, e somatórios sazonais para ET_o.

Tabela 3. Resumo dos dados agrometeorológicos coletados pela estação durante o período de 2020 a 2024. Araras, SP, 2025.

PERÍODO	ESTAÇÃO	Vel vento (m s ⁻¹)		Chuva (mm) Total	ET _o (mm)	
		max	med		Média	soma
26/06/2020 - 20/09/2020	INVERNO	13.8	1.1	65.2	2.9	250
21/09/2020 - 19/12/2020	PRIMAVERA	13.6	1.3	369.6	4.8	426
20/12/2020 - 19/03/2021	VERÃO	16	1	517.3	4.4	391
20/03/2021 - 19/06/2021	OUTONO	32.4	0.9	93.9	3.2	290
20/06/2021 - 20/09/2021	INVERNO	10.8	1.1	42.7	3.3	307
21/09/2021 - 19/12/2021	PRIMAVERA	13.6	1.2	326.8	4.1	361
20/12/2021 - 19/03/2022	VERÃO	14.2	0.9	579.1	3.9	348
20/03/2022 - 19/06/2022	OUTONO	9.28	0.9	173.2	2.8	252
20/06/2022 - 20/09/2022	INVERNO	10.6	1	53.6	3	272
21/09/2022 - 19/12/2022	PRIMAVERA	11.7	1.3	455.2	4.2	377
20/12/2022 - 19/03/2023	VERÃO	12.6	1	752.1	3.8	338
20/03/2023 - 19/06/2023	OUTONO	9.28	0.7	381.5	2.8	258
20/06/2023 - 20/09/2023	INVERNO	11.3	1	43.7	2.9	271
21/09/2023 - 19/12/2023	PRIMAVERA	20.9	1.1	435.8	4.7	418
20/12/2023 - 19/03/2024	VERÃO	19.1	0.7	513.8	4.5	406
20/03/2024 - 09/05/2024	OUTONO	8.6	0.6	186.2	3.2	162
Resumo						
Média		14.2	1.0	-	3.7	-
Total		-	-	4989.7	-	5126

Fonte: Autoral

Nota-se extremos climáticos significativos, como a rajada de 32,4 m s⁻¹ (outono/2021) e chuva intensa de 752,1 mm (verão/2023). Verificou-se déficit hídrico sistêmico (ET_o > Chuva em 80% dos períodos), agravado no inverno (ET_o 4x maior que precipitação). Destaca-se a sazonalidade marcante: verões chuvosos (>500 mm) contrastando com invernos secos (<65 mm), enquanto primaveras registraram as maiores ET_o (>360 mm) (Tabela 3).

Foram encontradas diferenças entre o crescimento vegetativo e o consumo hídrico em função das mudanças de estação do ano considerando o período de coleta dos dados.

Tabela 4. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” em todo o período (2020-2024). Araras, SP, 2025.

Painel A: toda a amostra						
Variáveis	média	mediana	desvio-padrão	C.V.	mínimo	máximo
Altura da planta (cm)	153.59	152.00	51.36	0.33	45.00	210.00
Área de projeção da copa (m ²)	3.24	2.85	2.40	0.74	0.20	7.80
Consumo do período (mm)	139.30	61.37	225.44	1.62	16.59	1077.91
Kc do período	0.60	0.44	0.36	0.60	0.21	1.66

Fonte: Autoral

A Tabela 4 mostra que altura teve variação de 45 cm (transplante) a 210 cm (maturidade). O crescimento mostrou-se mais acelerado nas estações de primavera e verão, associado a temperaturas médias acima de 23°C e radiação solar elevada (23–35 MJ). Em contraste, os invernos, caracterizados por maior amplitude térmica (3,0°C a 37,4°C em 2021), apresentaram redução no ritmo de desenvolvimento, possivelmente devido ao estresse térmico (Tabela 2).

A área de projeção da copa variou de 0,20 a 7,80 m² na média dos anos avaliados. A expansão foliar correlacionou-se positivamente com o consumo hídrico que obteve uma média de 139,30 mm por todo o período (DP: 225,44 mm), com pico de 1.077,91 mm e Kc de 1,66. Esse aumento exponencial (1.538% em 4 anos) reflete a sazonalidade do Kc: Valores baixos na fase inicial (Kc 0,21–0,31; inverno) e máximos na maturação (Kc >1,0; primavera/verão) (Tabela 4).

O coeficiente de variação (CV) destacou a maior sensibilidade do consumo hídrico (CV=1,62) e da área da copa (CV=0,74) às condições climáticas, enquanto a altura (CV=0,33) mostrou estabilidade ao final do período (Tabela 4).

Tabela 5. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão Tahiti” no período de 2020 a 2021. Araras, SP, 2025.

Painel B: período de 2020 a 2021						
Variáveis	média	mediana	desvio-padrão	C.V.	mínimo	máximo
Altura da planta (cm)	114.94	118.50	32.28	0.28	45.00	161.00
Área de projeção da copa (m ²)	1.40	1.50	0.95	0.68	0.20	3.00
Consumo do período (mm)	38.29	31.87	24.02	0.63	16.59	114.14
Kc do período	0.32	0.31	0.08	0.24	0.21	0.45

Fonte: Autoral

Na Tabela 5, o período inicial de cultivo do “limão Tahiti”, compreendido entre 2020 e 2021, apresentou uma altura média de 114,94 cm (DP = 32,28 cm), partindo de 45 cm no transplante até atingir 161 cm ao final do período. A área de projeção da copa atingiu média de 1,40 m² (DP = 0,95 m²), com valores entre 0,20 m² e 3,00 m², refletindo a fase de adaptação inicial da planta.

Quanto à demanda hídrica, observou-se um consumo médio de 38,29 mm (DP = 24,02 mm), variando de 16,59 mm a 114,14 mm. Esses valores estão diretamente relacionados ao baixo coeficiente de cultura médio Kc = 0,32 (DP = 0,08), o que era esperado da fase vegetativa inicial, que variou entre 0,21 e 0,45. O consumo hídrico reduzido mostrou-se compatível com o estágio fenológico da planta e com as condições climáticas do período, particularmente no inverno de 2020, quando se registrou ETo de 249,8 mm contra uma precipitação de apenas 65,2 mm (Tabela 3 e 5).

As principais limitações ao desenvolvimento inicial da cultura foram associadas às condições climáticas adversas. A amplitude térmica acentuada no inverno (variando de 3,0°C a 37,4°C), os ventos moderados (com média de 1,1 m s⁻¹) e os níveis limitados de radiação solar (entre 0,3 e 18,5 MJ) representaram desafios significativos para o estabelecimento da planta. Apesar desses fatores, o crescimento progressivo observado ao longo do período indica uma adaptação satisfatória da cultura (Tabela 3 e 5).

Tabela 6. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” no período de 2021 a 2022. Araras, SP, 2025.

Painel C: período de 2021 a 2022						
Variáveis	média	mediana	desvio-padrão	C.V.	mínimo	máximo
Altura da planta (cm)	160.2	154.5	35.32	0.22	110.00	218.00
Área de projeção da copa (m ²)	2.93	2.85	1.51	0.52	0.60	6.00
Consumo do período (mm)	67.15	59.68	50.64	0.75	28.16	245.57
Kc do período	0.53	0.44	0.22	0.43	0.21	0.85

Fonte: Autoral

O consumo hídrico médio foi de 67,15 mm (DP: 50,64 mm), mínimo de 28,16 mm e máximo de 245,57 mm. O coeficiente de cultura (Kc) apresentou média de 0,53 (DP: 0,22), variando de 0,21 a 0,85 (Tabela 6).

As temperaturas médias de 23,7°C no verão proporcionaram condições ideais para o crescimento vegetativo. A umidade relativa média de 91% no verão contribuiu para a estabilidade no desenvolvimento das plantas. Além disso, O pico de consumo (245,57 mm) no outono de 2022 correlacionou-se com Kc mais elevado (0,85) (Tabela 2 e 6).

Tabela 7. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” no período de 2022 a 2023. Araras, SP, 2025.

Painel D: período de 2022 a 2023						
Variáveis	média	mediana	desvio-padrão	C.V.	mínimo	máximo
Altura da planta (cm)	200.42	206.00	23.12	0.12	157.00	249.00
Área de projeção da copa (m ²)	5.15	4.25	1.66	0.32	3.50	8.10
Consumo do período (mm)	195.77	95.29	178.46	0.91	63.19	592.56
Kc do período	0.85	0.81	0.20	0.23	0.52	1.29

Fonte: Autoral

Na Tabela 7, a planta teve um incremento médio de 25% em relação à altura em relação ao período anterior, demonstrando crescimento estabilizado (CV = 0,12) em comparação com períodos anteriores. A área de projeção da copa apresentou média de 5,15 m² (DP = 1,66 m²), com variação entre 3,50 m² e 8,10 m², indicando pleno desenvolvimento do dossel vegetativo.

A demanda hídrica mostrou significativa elevação neste período, com consumo médio de 195,77 mm (DP = 178,46 mm) e extremos que variaram de 63,19 mm a 592,56 mm. Este padrão está diretamente associado ao aumento do coeficiente de cultura, que atingiu média de 0,85 (DP = 0,20) e máximo de 1,29, valores característicos da transição da fase vegetativa para reprodutiva da cultura. O pico de consumo

observado em abril de 2023 (592,56 mm) coincidiu com condições climáticas específicas: temperatura média de 23,6°C e radiação solar acumulada de 26,0 MJ (Tabela 2, 3 e 7).

Tabela 8. Desempenho agrônômico e demanda hídrica do “limão” no período de 2023 a 2024. Araras, SP, 2025.

Painel E: período de 2023 a 2024						
Variáveis	média	mediana	desvio-padrão	C.V.	mínimo	máximo
Altura da planta (cm)	217.75	208.50	18.13	0.08	205.00	249.00
Área de projeção da copa (m ²)	7.70	7.65	0.27	0.04	7.40	8.10
Consumo do período (mm)	627.44	549.55	276.41	0.44	332.73	1077.91
Kc do período	1.27	1.20	0.24	0.19	1.04	1.66

Fonte: Autoral

Na Tabela 8, a altura média foi de 217,75 cm (DP = 18,13 cm), com coeficiente de variação extremamente baixo (CV = 0,08), confirmando possível estabilização do crescimento vertical característica da transição de planta jovem para planta adulta. A área de projeção da copa apresentou média de 7,70 m² (DP = 0,27 m²), com variação mínima entre 7,40 m² e 8,10 m² (CV = 0,04), demonstrando que o dossel vegetativo atingiu sua máxima expressão dentro do período de estudo.

O consumo hídrico mostrou aumento significativo, com média de 627,44 mm (DP = 276,41 mm) e valores extremos entre 332,73 mm e 1.077,91 mm. Este último valor, registrado em maio de 2024, representa o pico absoluto de todo o período monitorado. O coeficiente de cultura (Kc) acompanhou esta tendência, com média de 1,27 (DP = 0,24) e máximo de 1,66, compatíveis com a fase de produção intensiva de frutos (Tabela 8).

Vale ressaltar que o consumo recorde ocorreu em condições de temperatura média de 23,6°C, radiação solar acumulada de 24,7 MJ. Diante disso, a baixa variabilidade nos parâmetros vegetativos (CV < 0,10) associada à alta demanda hídrica (CV = 0,44) pode ser explicada pela alocação prioritária de recursos para frutificação e estabilidade morfológica da planta adulta (Tabela 2 e 3).

Apresentam-se, na Figura 7, a área de projeção da copa, a altura da planta e o coeficiente de cultura (Kc) para o período estudado. Conforme demonstrado nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8, o gráfico reforça a visualização dos resultados e o que foi discutido anteriormente.

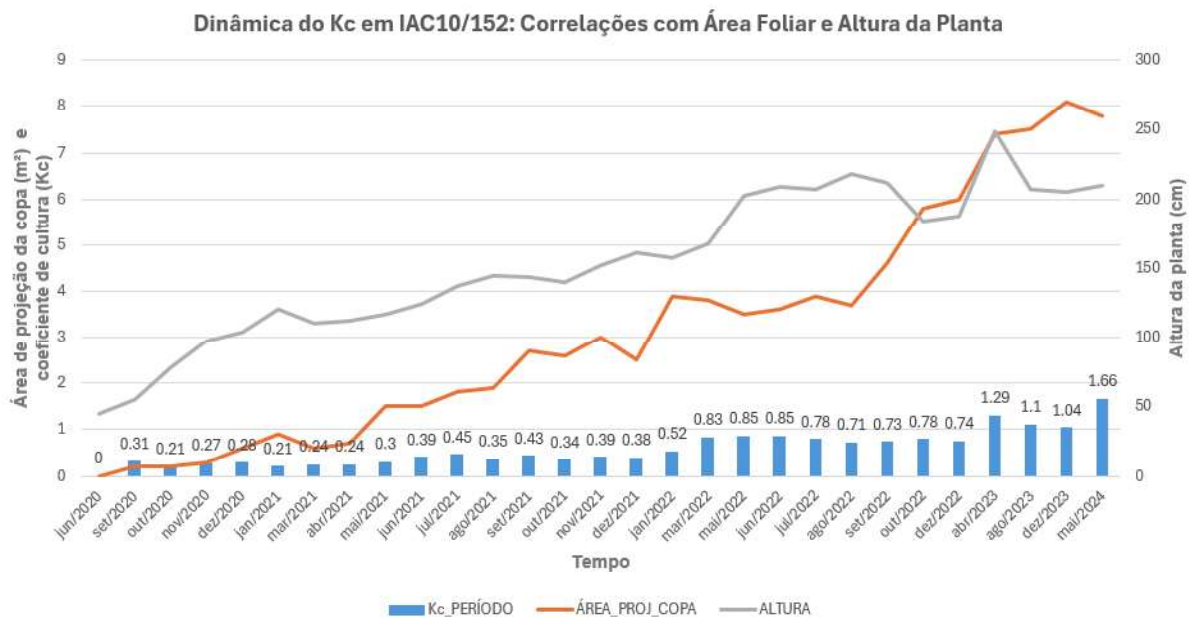


Figura 7. Acompanhamento temporal da altura, área de projeção da copa e coeficiente de cultura (Kc) de limeira ácida Tahiti. Araras, SP, 2020/2024.

A planta teve oscilações de crescimento em altura em função das condições climáticas no período de estudo relacionado com as diferentes estações do ano. Os picos maiores de crescimento em altura como no período de out/2022 - dez/2022 a abr/2023 pode ser atribuído a uma conjunção de fatores ambientais (temperaturas mais elevadas e maior radiação solar por exemplo) e fisiológicos o que representou o ápice do desenvolvimento vegetativo antes da transição para a fase reprodutiva, quando a planta direcionou seus recursos para a frutificação em 2023, explicando a posterior estabilização da altura (Figura 7).

Conforme demonstrado por fatores climáticos sazonais, como temperaturas mais baixas do outono/inverno, reduzem a taxa de transpiração foliar e a evaporação do solo. Especificamente, temperaturas inferiores a 20°C induzem os citros a um estado de dormência vegetativa, diminuindo seu crescimento e, conseqüentemente, o consumo de água. Além disso, nesse período, ocorre uma abscisão foliar parcial, que reduz a área disponível para transpiração – mesmo que a projeção da copa não se altere significativamente. Por fim, a menor radiação solar, caracterizada por dias mais curtos e menor intensidade luminosa, reduz a taxa fotossintética e a demanda hídrica das plantas durante a estação (DAVIES&ALBRIGO, 1994).

Ademais, a área de projeção da copa também teve variações significativas como é visto na Figura 7, demonstrando uma complexa interação entre fatores ambientais e processos fisiológicos.

A dinâmica da área de projeção da copa em “limão” Tahiti reflete respostas integradas aos ventos, mediadas por processos fisiológicos específicos. Estudos demonstram que ventos moderados (5-10 m/s) induzem tigmomorfogênese (GRACE, 1977), promovendo reforço estrutural via deposição acelerada de lignina nos tecidos vasculares (TELEWSKI, 2006). Contudo, ventos superiores a 15 m/s provocam reduções imediatas de 10-15% na área foliar, principalmente por abscisão mecânica (GARDINER et al., 2016).

Fisiologicamente, a redistribuição de auxinas (IAA) após estresse mecânico (CHEHAB et al., 2009) regula a reorientação do plano foliar, enquanto o aumento da síntese de precursores de lignina (HCT/CAD) em 30-45 dias (MOULIA et al., 2011) explica o desenvolvimento de copas compactas. Essas adaptações concordam com observações em *Citrus* spp., onde exposição crônica ao vento reduz a área projetada em 20-25% (DAVIES & ALBRIGO, 1994), com aumento proporcional na espessura da cutícula ($\geq 0.8 \mu\text{m}$ vs. $0.5 \mu\text{m}$ em condições protegidas) (SYVERTSEN & LLOYD, 1994).

Esta plasticidade fenotípica representa um *trade-off* evolutivo entre crescimento exploratório e estabilidade biomecânica (NICOTRA et al., 2010), sendo crucial para o manejo em regiões ventosas.

Observa-se que os maiores valores de Kc máximo foram registrados nos meses que coincidem com as estações de primavera/verão. Essa tendência decrescente de a partir de março/abril para o mês de junho e posterior retomada de valores maiores a partir de agosto/setembro é provavelmente relacionada à queda de temperatura do ar e da radiação solar no final do outono e início do inverno, conforme visto na Figura 7.

Ainda sobre a Figura 7, é possível observar que houve interação entre consumo hídrico e área da copa: quanto maior a área, maior o volume de água consumido. A Figura 8 evidencia uma forte relação exponencial positiva ($y=0,825e^{0,2189x}$) com um alto coeficiente de determinação ($R^2=0,853$) entre a área de projeção da copa (m^2) e o consumo hídrico ao longo dos 5 anos de monitoramento. O ajuste do modelo sugere que, para cada incremento unitário na área da copa, o consumo de água aumenta a uma taxa proporcional, característica típica de culturas perenes em fase de

crescimento ativo. Esse comportamento reforça a importância do monitoramento da área foliar para o manejo eficiente da irrigação, especialmente em condições de estufa, onde variáveis ambientais são parcialmente controladas.

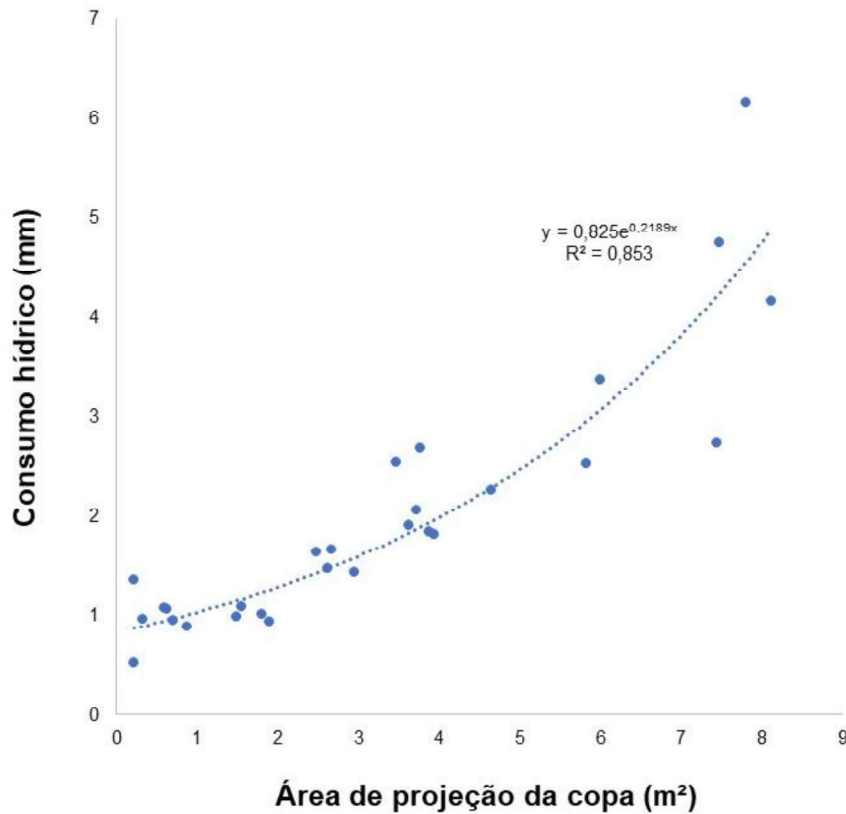


Figura 8. Relação entre consumo hídrico da cultura e área de projeção da copa. Araras, SP, 2025.

Junqueira (2009) destaca que a necessidade hídrica da lima ácida Tahiti, assim como para qualquer outra cultura, sofre variação de acordo com o estágio fenológico, sendo o desenvolvimento de frutos um dos estágios de maior demanda por água na cultura.

Essa tendência também foi observada por SILVA (2005), trabalhando com plantas jovens de lima-ácida Tahiti, com 8% de grau de cobertura, em Piracicaba SP, verificando que houve padrão sazonal da evapotranspiração, tendo a média de ETC variando entre $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$, no verão, e $0,66 \text{ mm dia}^{-1}$, no inverno

A esse respeito, Oliveira et al. (2008) destacam que porta-enxertos cítricos mais vigorosos apresentam uma melhor extração de água do solo, bem como tam-

bém induzem à formação de frutos de maior tamanho, com concentração mais baixa de sólidos solúveis e de casca grossa e rugosa.

Dessa forma, pode-se inferir que o porta-enxerto H152, ao apresentar um maior vigor e, conseqüentemente, uma maior capacidade de absorção de água do solo, apresentou uma alta resposta à irrigação, em termos de crescimento de plantas em altura.

6.CONCLUSÃO

A necessidade hídrica da planta IAC10/152 ananicante de "limão" Tahiti apresentou um consumo médio de 139,30 mm e picos de 1.077,91 mm, que aumentou exponencialmente ao longo do tempo e se relacionou fortemente com a área da copa.

Foi determinado o coeficiente de cultura (K_c), com média de 0,60, apresentando variação sazonal e fenológica, sendo baixo na fase inicial (0,21–0,31) e máximo na maturação ($>1,0$, chegando a 1,66).

As curvas biométricas de crescimento da parte aérea foram determinadas, com altura média de 153,59 cm e área de projeção da copa variando de 0,20 a 7,80 m², com maior crescimento na primavera/verão e redução no inverno.

Vale ressaltar que a cobertura da estufa não foi lavada com frequência podendo ter interferido nos resultados à medida que o acúmulo de partículas de solo no plástico de cobertura atrapalha a penetração dos raios solares. Desta forma, o pleno desenvolvimento da planta pode ter sido cessado por esta situação também.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAM, M. M. et al. A review of recent advances and future prospects in calculation of reference evapotranspiration in Bangladesh using soft computing models. *Journal of Environmental Management*, v. 351, 2024.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMARO, A. A.; CASER, D. V.; DE NEGRI, J. D. Tendências na produção e comércio do limão. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 33, n. 4, abr. 2003.
- ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. L. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- ARRIETA, R. G. Manejo da irrigação por lisimetria de pesagem na produção de mudas de hortaliças em ambiente protegido. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.
- BETTINI, B. A. Desempenho de lima ácida ‘Tahiti’ sobre diferentes porta-enxertos. 2019. Trabalho não publicado.
- BOZELLI, M. P. A. Avaliação do ciclo de vida dos sistemas de produção convencional e agroflorestal orgânico do limão Tahiti: um estudo comparativo. 2023. Trabalho não publicado.
- CARVAJAL, C. J. Weighing lysimetric system for the determination of the water balance during irrigation in potted plants. *Agricultural Water Management*, v. 183, p. 78–85, 2017.
- CARVALHO, R. S. C. et al. Lisímetro para medida da evapotranspiração na cultura do pimentão em sistema hidropônico com substrato. *Revista IRRIGA – Brazilian Journal of Irrigation & Drainage*, v. 25, n. 2, 2020.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (Cepea). Fruta mais exportada em valor: lima ácida Tahiti. Piracicaba: Cepea/Esalq-USP, 2024. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br>.
- CHEHAB, E. Wassim; EICH, Elizabeth; BRAAM, Janet. Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechano-stimulation. *Journal of experimental botany*, v. 60, n. 1, p. 43-56, 2009.
- COELHO FILHO, Maurício Antonio et al. Estimativa da área foliar de plantas de lima ácida 'Tahiti' usando métodos não-destrutivos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 27, p. 163-167, 2005.
- COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; SIMÕES, W. L.; COELHO, E. S. Irrigação em citros nas condições do nordeste do Brasil. *Laranja, Cordeirópolis*, v.27, n.2, p. 297-320, 2006.

- COELHO, Y. da S.; CUNHA SOBRINHO, A. P. da; MAGALHÃES, A. F. de J.; PASSOS, O. S.; NASCIMENTO, A. S. do; SANTOS FILHO, H. P.; SOARES FILHO, W. dos S. Lima ácida 'Tahiti' para exportação: aspectos técnicos da produção. Brasília: Embrapa-SPI; MAPA/SDR/Frupex, 1993. (Série Publicações Técnicas Frupex).
- COSTA, D. et al. Recomendações para a produção da lima ácida 'Tahiti' em áreas de agricultura de base familiar. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2022. (Circular Técnica, 307).
- COSTA, J. O.; COELHO, R. D.; GUIMARÃES, E. A.; QUILOANGO-CHIMARRO, C. A.; FERNANDES, A. L. T. Evapotranspiração, coeficiente de cultura e eficiência do uso da água de culturas frutíferas irrigadas no Projeto Jaíba. [Minas Gerais]: [s.n.], 2023. (Circular Técnica).
- DA SILVA, F. A. et al. Desenvolvimento vegetativo de limão Tahiti cultivado sob diferentes porta-enxertos e lâminas de irrigação. In: Semana de Agronomia da UESB (SEAGRUS), 2., 2020. Anais... v. 2, n. 1. ISSN 2526-8406.
- DAVIES, F. S.; ALBRIGO, L. G.; CITRUS, C. A. B. International. Wallingford, UK, 1994.
- DE LIMA, J. R. F.; DE LIMA, G. A. H.; SANTOS, J. V. da S. Análise da tendência e sazonalidade do limão Tahiti. 2023. Trabalho não publicado (ou sem dados de defesa).
- DEL FIORI, D. et al. Análise da competitividade brasileira no mercado mundial de limão e lima ácida e de seus principais competidores no mercado mundial. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 63, e287274, 2025.
- DINIZ, F. O. N. Análise da variabilidade molecular de seleções de limeira ácida 'Tahiti'. 2024.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Dados sobre a produção de limão no Brasil. Tambaú: Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/limao/b1_limao.pdf.
- FAO (Food and Agriculture Organization). Produção de cítricos no mundo: anuário estatístico 2022. Roma: FAO, 2022.
- FAO (Food and Agriculture Organization). Produção de limões e limas por país 2025. Disponível em: <https://worldostats.com/lemons-limes-production-by-country-2025/#>.
- FINHOLDT, G. et al. Desenvolvimento de uma estação meteorológica automática para manejo de irrigação. Revista Engenharia na Agricultura – REVENG, v. 19, n. 4, p. 313–328, 2011.

FUNDECITRUS. Inventário de árvores e estimativa da safra de laranja do cinturão citrícola de São Paulo e triângulo/sudoeste mineiro. Araraquara: Fundecitrus, 2023. p. 48–50.

GARDINER, Barry; BERRY, Peter; MOULIA, Bruno. Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant science*, v. 245, p. 94-118, 2016.

GERALDINI, F.; RIBEIRO, M. C. Lima ácida Tahiti: mercado e perspectivas para 2019. *Revista Hortifrutí Brasil (CEPEA–ESALQ/USP)*. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/upload/kceditor/files/Dia%20do%20Lima%cc%83o%20PD F.pdf>

GRACE, John. *Plant response to wind*. 1977.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo Agropecuário 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria.html>.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Produção agrícola municipal: culturas permanentes*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

JUNQUEIRA, L. P. Fenologia e características físicas da lima ácida ‘Tahiti’ cultivadas sob irrigação no Distrito Federal. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

MARO, L. A. C. Trifoliatoeiro ‘Flying Dragon’: potencial de uso e limitações. *Agropecuária Catarinense*, v. 37, n. 1, p. 7–9, 2024.

MARTINEZ, S. et al. Soil water balance: comparing two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations. *Agricultural Water Management*, v. 139, p. 53–63, 2014.

MEDEIROS, A. T.; SENTELHAS, P. C.; LIMA, R. N. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba – CE. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 23, n. 1, p. 21–30, 2003.

MONTEIRO, T. B. et al. Análise da competitividade brasileira no mercado internacional de limão e lima ácida. 2024. Trabalho não publicado (ou sem dados de defesa).

MOULIA, B. et al. Integrative mechanobiology of growth and architectural development in changing mechanical environments. *Mechanical integration of plant cells and plants*, p. 269-302, 2011.

MOURA, M. V. T. Determinação do consumo de água na cultura da cenoura (*Daucus carota* L.) através dos métodos lisimétricos e balanço hídrico sob condições de campo. 1992. 84 f. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

NICOTRA, Adrienne B. et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in plant science*, v. 15, n. 12, p. 684-692, 2010.

OLIVEIRA, R. P.; SOARES FILHO, W. S.; PASSOS, O. S.; SCIVITTARO, W. B.; ROCHA, P. S. G. Porta-enxertos para citros. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. (Documentos, 226).

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

PEREIRA, O. A. et al. Construção e calibração de sistema eletromecânico utilizado em lisímetro de pesagem. *Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, v. 28, n. 4, p. 560–565, 2024.

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

PIRES, R. C. M.; LUCHIARI, D. J. F.; ARRUDA, F. B.; MOSSAK, I. Irrigação. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU JUNIOR, J. (Orgs.). *Citros*, p. 369–408. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundação de Amparo à Pesquisa, 2005.

REICHARDT, K. Evaporação da água. In: *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 323–324.

RIVULIS. Irrigação por gotejamento. 2025. Disponível em:
<https://pt.rivulis.com/irrigacao-por-gotejamento/>

SANTOS, G. A. N. dos. Comportamento fisiológico e adaptação de combinações copa/porta-enxerto para limeira-ácida 'Tahiti' em condições de campo na região metropolitana de Manaus. 2024.

SEBRAE. O cultivo e o mercado do limão. Sebrae. Disponível em:
<<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-do-limao,9e7a9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>>.

SENTELHAS, P. C.; NUNES, L. H.; PEREZ A. CEPAGRI. 2003. Disponível em:
http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_038.html

SILVA JUNIOR, A. C. da S. et al. Uso racional da água em plantios de limão Tahiti, *Citrus latifolia* (Yu. Tanaka), na Amazônia Oriental. 2022.

SILVA, C. R. Evapotranspiração e desenvolvimento de limeira ácida 'Tahiti' na ausência e presença de estresse hídrico. 2005. 85 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

- SILVA, L. M. da et al. Análise de mercado e viabilidade agroeconômica de limeira ácida 'Tahiti' em plantio comercial no leste da Amazônia Brasileira. 2023.
- SILVEIRA, L. K.; PAVÃO, G. C.; DIAS, C. T. S.; QUAGGIO, J. A.; PIRES, R. C. M. Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: a long-term study on Pêra-IAC sweet orange. *Agricultural Water Management*, v. 231, p. 106019, 2020.
- SOUSA, D. D. P. et al. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of açaí palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. *Irrigation Science*, v. 39, n. 1, p. 5–22, 2021. DOI: 10.1007/s00271-020-00710-2.
- STUCHI, E. S.; DONADIO, L. C.; SEMPIONATO, O. R. Performance of Tahiti lime on *Poncirus trifoliata* var. *monstrosa* 'Flying Dragon' in four densities. *Fruits, Paris*, v. 58, n. 1, p. 13–17, 2003.
- SYVERTSEN, J. P.; LLOYD, J. J. Citrus. In 'Handbook of environmental physiology of fruit crops. Vol. II: subtropical and tropical crops'. (Eds B Schaffer, PC Andersen) pp. 65–99. 1994.
- TAVARES, A. P.; SILVA, A.; ARANTES, D. S.; ASSIS, E. M.; BARBOSA, J. T. Processo logístico na exportação de produtos agrícolas no Brasil e estado de São Paulo. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Curso Técnico em Logística) – Etec Dr. Geraldo José Rodrigues Alckmin, Taubaté, 2023.
- TELEWSKI, Frank W. A unified hypothesis of mechanoperception in plants. *American journal of botany*, v. 93, n. 10, p. 1466-1476, 2006.
- USDA (United States Department of Agriculture). Citrus: world markets and trade. 2024. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2024-07/citrus.pdf>.
- USDA (United States Department of Agriculture). Página principal do USDA. 2025. Disponível em: <https://www.usda.gov>.
- VALBUENA MATERÁN, F. J. Minilímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro® para medida da evapotranspiração de referência. *Revista UDO Agrícola, Sucre*, v. 9, n. 1, p. 243–258. 2009.
- YOSHIDA, F.A.; STOLF, R., 2016. Mapeamento digital de atributos e classes de solos da UFSCar – Araras/SP. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente*, vol. 3, n. 1, p. 1-11.