

**INSTITUTO AGRONÔMICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRICULTURA
TROPICAL E SUBTROPICAL**

**SELEÇÃO DE CITRANDARINS ANANICANTES
TOLERANTES AO ESTRESSE HÍDRICO**

FERNANDA ROVERSSI

**Orientador: Prof. Dr. Fernando Alves de Azevedo
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Mariângela Cristofani-Yaly**

Tese apresentada como requisito para
obtenção do título de **Doutora** em
Agricultura Tropical e Subtropical, Área de
Concentração em Sistemas de Manejo e
Qualidade Ambiental

Campinas, SP
2026

Ficha elaborada pela bibliotecária do Núcleo de Documentação Científica do Instituto Agrônômico

R874s Roverssi, Fernanda.
Seleção de citrandarins ananícantes tolerantes ao estresse hídrico /
Fernanda Roverssi. Campinas, SP, 2026. 66 fls. :

Orientador: Fernando Alves de Azevedo.
Coorientadora: Mariângela Cristofani-Yaly.
Tese (Doutorado) em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto
Agrônômico,

1. Citrus. 2. Tolerância à seca. 3. Plantas ananícantes.
4. Adensamento. 5. DArTseq. 6. BLAST. I. Azevedo, Fernando Alves
II. Cristofani-Yaly, Mariângela. III Título.

CDD 634.3

ATA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

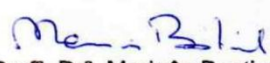
Aos 1º de junho de 2026, às 09h00, reuniu-se a banca examinadora homologada pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, composta pelos membros abaixo listados visando à defesa de tese de doutorado de Fernanda Roverssi, para obtenção do título de "**DOUTORA**", conforme Processo SAA nº PRT336/2022. A sessão presidida pelo Prof. Dr. Fernando Alves de Azevedo, orientador da aluna, foi realizada em sessão pública aberta. Iniciados os trabalhos, a candidata submeteu-se ao exame de sua tese, intitulada "Seleção de citrandarins ananizantes tolerantes ao estresse hídrico". Terminado o exame, procedeu-se ao julgamento, cujo resultado foi o seguinte:

Prof. Dr. Fernando Alves de Azevedo - IAC	APROVADA (X) REPROVADA ()
Profª. Drª. Marinês Bastianel - IAC	APROVADA (X) REPROVADA ()
Prof. Dr. Evandro Henrique Schinor – UFSCar (participação remota)	APROVADA (x) REPROVADA ()
Profª. Drª. Valdenice Moreira Novelli - IAC	APROVADA (X) REPROVADA ()
Prof. Dr. Rodrigo Gazaffi – USFCar (participação remota)	APROVADA (x) REPROVADA ()

Apurados os resultados, constatou-se que a candidata foi habilitada, fazendo jus, portanto, ao título de "**DOUTORA EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL**", na área de concentração: Sistema de Manejo e Qualidade Ambiental, do que, para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pelos membros da comissão examinadora:



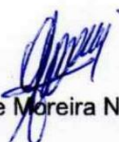
Prof. Dr. Fernando Alves de Azevedo - IAC



Profª. Drª. Marinês Bastianel - CCSM

Documento assinado digitalmente
 EVANDRO HENRIQUE SCHINOR
Data: 03/06/2026 08:51:44 -0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Evandro Henrique Schinor - UFSCar



Profª. Drª. Valdenice Moreira Novelli - IAC

Documento assinado digitalmente
 RODRIGO GAZAFFI
Data: 03/06/2026 09:08:58 -0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Gazaffi – USFCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, Dr. Fernando Alves de Azevedo, pela oportunidade, orientação, ensinamentos e paciência por todos esses anos.

Agradeço à minha família pelo amor, apoio e incentivo para seguir em frente nessa trajetória, e por sempre acreditarem em mim.

À minha coorientadora, Dra. Mariângela Cristofani-Yaly, que tem me acompanhado desde o início, sempre me incentivando a seguir na carreira acadêmica.

Agradeço à Dra. Luciane Santini-Gazaffi, pela sua disponibilidade de solucionar meus problemas, pelos ensinamentos e pela paciência ao longo desse período.

Ao Instituto Agrônomo, à Pós-Graduação do IAC e aos professores, pelo aprendizado de qualidade que foram capazes de proporcionar ao longo da minha formação.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa, junto ao Programa de Pós-graduação do IAC.

Aos meus amigos Fernando Trevisan Devite, Ana Júlia Borim de Souza, Ana Carolina Costa Arantes, Biana Pelissari Gadanhoto, Gustavo Henrique Colombo e Thiago Peitl Monteiro por toda ajuda prestada no meu trabalho, sem eles, esse trabalho não existiria.

Agradeço aos meus colegas e toda equipe do Centro de Citricultura, pela ajuda, apoio e pelos bons momentos compartilhados ao longo desses anos.

Agradeço à equipe da Cutrale, pela área experimental, especialmente ao Luís Fernando Herrera e ao Bruno Eugênio pelo apoio em campo.

E a todos que aqui não citei, mas que contribuíram diretamente ou indiretamente para a execução desse trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	02
Importância da laranja Pera para o Brasil.....	02
Porta-enxertos para citros.....	03
Adensamento de plantio para citros.....	04
Tolerância à seca.....	06
Citrandarins híbridos de <i>C. sunki</i> x <i>P. trifoliata</i> cv Rubidoux.....	08
Biotecnologia aplicada à citros.....	09
3 OBJETIVOS	11
Objetivos específicos	11
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
4.1 Caracterização da área experimental e das variedades.....	12
4.2 Desenvolvimento vegetativo.....	14
4.3 Avaliação da produtividade e análises físico-químicas dos frutos.....	14
4.4 Tolerância à seca.....	15
4.5 Distribuição de raízes das plantas.....	16
4.6 Análise da anatomia de raízes.....	17
4.7 Seleção de marcadores moleculares associados à resistência à seca e ao porte induzido à variedade copa.....	17
4.8 Anotação funcional das sequências em genoma de <i>Citrus</i>	18
4.9 Análises estatísticas.....	18
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
5.1 Desenvolvimento vegetativo.....	19
5.2 Produtividade e análises físico-químicas dos frutos.....	22
5.2.1. Produtividade da laranja Pera em porta-enxertos citrandarins.....	22
5.2.2. Análises físico-químicas dos frutos.....	25
5.3 Tolerância à seca.....	28

5.4	Distribuição de raízes das plantas.....	32
5.5	Análise da anatomia de raízes.....	34
5.6	Análise de componentes principais.....	36
5.6.1.	Análise de componentes principais de laranja Pera sobre 20 porta-enxertos.....	36
5.6.2.	Componentes principais integrando características radiculares e desempenho agrônômico de laranja Pera sobre 10 porta-enxertos.....	39
5.7	Seleção de marcadores moleculares DArTseq associados à resistência à seca e ao porte induzido à variedade copa.....	40
5.8	Anotação funcional.....	41
5.8.1.	Marcadores putativamente associados à tolerância à seca.....	43
5.8.2.	Marcadores putativamente associados ao porte ananicante.....	46
6	CONCLUSÕES	49
7	LITERATURA CITADA.....	50
	APÊNDICE.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Porta-enxertos e genitores avaliados no experimento, nome comercial e número de registro no MAPA.....	13
Tabela 2. Altura, diâmetro e volume de copa de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos (PE), em Gavião Peixoto-SP e Barretos-SP, 2025.....	20
Tabela 3. Tolerância à seca em laranja Pera sobre diferentes porta-enxertos (PE), avaliada por nota de enrolamento foliar. Em Barretos e Gavião Peixoto-SP.....	29
Tabela 4. Massa seca (g m^{-3}) e área radicular (cm^2m^{-3}) de diferentes porta-enxertos e profundidades de solo.....	32
Tabela 5. Marcadores moleculares DArTseq alinhados ao genoma de referência de <i>Citrus sinensis</i> (assembly DVS_A1.0) do banco de dados do NCBI.....	42
Tabela 6. Resumo da anotação funcional de genes putativamente relacionados à tolerância à seca em citrandarins.....	43
Tabela 7. Resumo da anotação funcional de genes putativamente relacionados a redução de vigor em citrandarins.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Precipitação, temperatura máxima, média e mínima em duas localidades do estado de São Paulo, por quatro anos. (A) Barretos, (B) Gavião Peixoto.....	13
Figura 2. Índice de crescimento vegetativo (ICV) de laranja Pera em diferentes porta-enxertos de 2022 a 2025. (A) Barretos e (B) Gavião Peixoto.....	21
Figura 3. Produção acumulada (kg planta^{-1}) em cinco anos de avaliação. Laranja Pera em 20 porta-enxertos nas regiões: (A) Barretos-SP, (C) Gavião Peixoto-SP. Produtividade acumulada (t ha^{-1}) em cinco anos de avaliação. Laranja Pera em 20 porta-enxertos nas regiões: (B) Barretos-SP, (D) Gavião Peixoto-SP.....	23
Figura 4. Produção (kg planta^{-1}) (A), produtividade ajustada (t ha^{-1}) (B) e eficiência produtiva (kg m^{-3}) (C), de laranja Pera em 20 porta-enxertos, em Barretos e Gavião Peixoto, 2024.....	24
Figura 5. Massa (A), índice tecnológico (B) e rendimento do suco (C) de frutos de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos. Barretos e Gavião Peixoto-SP, 2024.....	27
Figura 6. Sólidos solúveis totais (D), acidez titulável (E) e Ratio (F) de frutos de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos. Barretos e Gavião Peixoto-SP, 2024.....	28
Figura 7. Potencial de água (MPa) na folha de laranja Pera em 20 porta-enxertos: (A) 2022, (B) 2025 e (C) Média de potencial hídrico da cidade. Em Gavião Peixoto e Barretos. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre porta-enxerto e maiúscula no mesmo porta-enxerto entre cidades, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$).....	31
Figura 8. Massa seca de raiz em g m^{-3} (A) e área radicular em cm^2m^{-3} (B), de porta-enxertos, em duas profundidades. Barretos – SP.....	33
Figura 9. Características anatômicas do xilema radicular de porta-enxertos citrandarins: (A) Frequência de elementos de vasos do xilema e (B) Diâmetro médio de vasos do xilema (μm) em raízes de 10 porta-enxertos citrandarins em Barretos-SP, 2023. E (C) microscopia eletrônica de varredura de raízes de 10 porta-enxertos sob aumento de 150x 300 μm	35
Figura 10. Biplot dos componentes principais para laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos em Barretos-SP. Variáveis: produtividade t ha^{-1} (Y), índice tecnológico (TI), eficiência produtiva (PE), potencial hídrico (WP), tolerância seca (DS) e volume de copa (CV).....	36
Figura 11. Biplot dos componentes principais para laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos em Gavião Peixoto-SP. Variáveis: produtividade t ha^{-1} (Y), índice tecnológico (TI), eficiência produtiva (PE), potencial hídrico (WP), tolerância seca (DS) e volume de copa (CV).....	37
Figura 12. Biplot dos componentes principais para laranja Pera enxertada em 10 porta-enxertos em Barretos. Variáveis: produtividade t ha^{-1} (Y), potencial hídrico (WP), tolerância seca (DS), volume de copa (CV), massa de raiz (RM) área radicular (RA), diâmetro dos vasos xilemáticos da raiz (XD) e frequência de vasos xilemáticos na raiz (XF).....	40

Figura 13. Diagrama de Venn dos marcadores moleculares DArTseq associados à altura, diâmetro e volume de copa induzido.....	41
Figura 14. Anotação funcional dos marcadores candidatos DArTseq. (A) distribuição de espécies correspondentes as sequências associadas à tolerância à seca; (B) distribuição de Hits dos marcadores associados à tolerância à seca; (C) distribuição de espécies correspondentes as sequências associadas a redução de vigor e (D) distribuição de Hits dos marcadores associados a redução de vigor.....	43

RESUMO

No Brasil, a maioria dos pomares de citros não é irrigada, e a florada geralmente ocorre em época de menor precipitação (agosto/setembro), tornando-se necessário o uso de porta-enxertos tolerantes ao déficit hídrico, especialmente em sistemas de plantio adensado. O objetivo deste trabalho foi caracterizar porta-enxertos quanto ao porte ananicante e à tolerância à seca, além de identificar marcadores moleculares DArTseq associados a essas características, utilizando a estratégia de BSA (*Bulked Segregant Analysis*) *in silico*. Os experimentos foram conduzidos nos municípios de Gavião Peixoto e Barretos – SP, utilizando-se a laranja Pera enxertada em 18 citrandarins e dois citrumelos. Foram avaliados tolerância à seca, produtividade, volume de copa, distribuição de raízes, anatomia radicular e seleção de marcadores moleculares associados a essas características. Os resultados apontam que os porta-enxertos mais ananizantes induzem maior eficiência produtiva e índice tecnológico. No entanto, o maior volume de copa parece estar associado à uma maior tolerância à seca. A abordagem BSA associada aos marcadores DArTseq permitiu a seleção de 12 marcadores moleculares possivelmente associados a redução de porte (6) e à tolerância à seca (6). A anotação funcional dos genes colocalizados aos marcadores revelou genes candidatos envolvidos em processos como sinalização de estresse, regulação hormonal, ajuste celular, respostas de defesa e desenvolvimento vegetal. Esses resultados apontam para o controle multigênico e multifatorial do fenótipo, indicando que a tolerância à seca e a regulação do crescimento vegetativo são características complexas, provavelmente controladas por mais de um gene. No entanto, as associações marcadores/características identificadas aqui são de natureza exploratória e necessitam validação adicional para confirmar a contribuição desses genes.

Palavras-chave: Adensamento, BLAST, *Citrus*, DArTseq, tolerância à seca, plantas ananizantes.

ABSTRACT

In Brazil, most citrus orchards are not irrigated, and flowering generally occurs during the period of lowest rainfall (August/September), making the use of drought-tolerant rootstocks essential, particularly in high-density planting systems. The objective of this study was to characterize rootstocks with respect to dwarfing potential and drought tolerance, as well as to identify DArTseq molecular markers associated with these traits using an *in silico* Bulk Segregant Analysis (BSA) strategy. The experiments were conducted in the municipalities of Gavião Peixoto and Barretos, São Paulo State, Brazil, using ‘Pera’ sweet orange grafted onto 18 citrandarins and two citrumelos. Drought tolerance, yield, canopy volume, root distribution, root anatomy, and the selection of molecular markers associated with these traits were evaluated. The results indicate that the most dwarfing rootstocks induced greater yield efficiency and a higher technological index. However, larger canopy volume appears to be associated with greater drought tolerance. The BSA approach combined with DArTseq markers enabled the identification of 12 molecular markers putatively associated with reduced tree size (6) and drought tolerance (6). Functional annotation of the genes co-localized with these markers revealed candidate genes involved in stress signaling, hormonal regulation, cellular adjustment, defense responses, and plant development. These findings suggest that both drought tolerance and vegetative growth regulation are complex, polygenic, and multifactorial traits, likely controlled by multiple genes. However, the marker–trait associations identified in this study are exploratory in nature and require further validation to confirm the contribution of these candidate genes.

Keywords: High-density planting, BLAST, *Citrus*, DArTseq, drought tolerance, dwarfing plants.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como principal produtor e exportador de suco de laranja. Em 2024, produziu cerca de 15,7 milhões de toneladas de frutos, em uma área colhida de 565 mil hectares. São Paulo é o principal estado produtor de citros do Brasil, com 12 milhões de toneladas (t) de frutos, correspondendo a 77% da produção nacional de laranja (IBGE, 2026).

Apesar da importância econômica, a área cultivada no cinturão citrícola (São Paulo, Triângulo Mineiro e sudoeste de Minas Gerais), tem passado por um processo de encolhimento, passando de 856 mil hectares (ha) em 2000 para 565 mil ha em 2024 (IBGE, 2026). Entretanto, houve um aumento na densidade de plantio, de 330 plantas/ha em 1980 para 591 plantas/ha em 2023. Atualmente, as árvores produtivas totalizam 182,71 milhões e ocupam uma área de 362 mil hectares. Esses valores representam um aumento de aproximadamente 12,7 milhões árvores, equivalente a 7,5% sobre o inventário de 2022, além de 5,2% da área produtiva (Fundecitrus, 2025a).

Esse aumento do sistema produtivo ocorre em um cenário de vários desafios fitossanitários e ambientais. Por se tratar uma cultura perene, a planta de citros permanece continuamente exposta a estresses bióticos e abióticos. Além de necessitar ao redor de cinco anos para atingir a plena produção (Mattos Junior et al., 2005). Desse modo, a implantação da produção de citros requer projetos de longo prazo com ações no controle de doenças, desde a produção do material de propagação até a pós-colheita, no caso de comércio *in natura* de frutas.

Nesse contexto, a escolha do porta-enxerto tem papel fundamental para a citricultura. Apesar da importância econômica dos citros para o Brasil e da ampla diversidade e variedade de citros, a produção de porta-enxertos ainda é restrita a um pequeno número de variedades. A baixa diversificação de genótipos de porta-enxertos em pomares limita a expansão da citricultura, restringindo o aumento da produtividade e a redução de custos por meio de tratamentos fitossanitários e outras práticas hortícolas (Domingues et al., 2021). Dessa forma, a ampliação da variabilidade genética atual dos citros e a potencialização do material existente ressaltam a importância de continuar os programas de melhoramento apoiados em ferramentas de biotecnologia (Machado et al., 2011).

Entre as características de interesse, conferidas às copas pelos novos porta-enxertos, podem-se destacar o porte ananicante e a tolerância à seca. Plantas de porte baixo prometem aumentar a eficiência dos tratamentos fitossanitários e reduzir os custos das colheitas. Entretanto, sistemas de cultivo adensado implicam maior número de plantas por hectare, o que pode exigir maior consumo de água. Contudo, porta-enxertos ananizantes têm pouca capacidade de

transportar água do solo para a variedade copa (Martínez-Cuenca et al., 2016). Assim, o uso de porta-enxertos ananicanos ou semiananicanos, e porta-enxertos tolerantes ao estresse hídrico, associados a copas de boa produtividade, torna-se uma alternativa extremamente interessante para a cultura.

Portanto, diante das mudanças climáticas que limitam a produção global de alimentos, o desenvolvimento de novas variedades de citros mais resistentes a múltiplos tipos de estresses abióticos, com características de produtividade aprimoradas, é um objetivo importante. Programas eficientes de melhoramento de citros necessitam de fenotipagem e genotipagem precisas do germoplasma de citros para identificar características essenciais ligadas ao aumento da produtividade e à tolerância à fatores abióticos (Dahro et al., 2023).

2. REVISAO DE LITERATURA

2.1. Importância da laranja Pera para o Brasil

As laranjas doces [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] predominam na maioria dos países citrícolas, no Brasil, e particularmente no estado de São Paulo, elas encontram boas condições edafoclimáticas para cultivo comercial. A laranja Pera (*C. sinensis* Osbeck) é a principal variedade de citros do Brasil, pois seus frutos apresentam excelente qualidade para os mercados interno e externo de fruta fresca e para a industrialização (Pio et al., 2005).

Em 2025, o cultivo de laranja Pera representou 36% do total produzido no cinturão citrícola, ocupando um total de 143 mil hectares (Fundecitrus 2025a). Os frutos dessa variedade apresentam boas características como: teor de suco de 52%; 11,8 °Brix; 0,95% de acidez e 12,5 de Ratio. A maturação dos frutos acontece na meia-estação, entre julho e outubro (Pio et al., 2005).

O limão Cravo (*C. limonia* Osbeck) já foi o principal porta-enxerto para essa cultivar, no entanto, devido ao declínio e a morte súbita dos citros (MSC) esse porta-enxerto foi substituído por porta-enxertos tolerantes a essas doenças, como as tangerinas Cleópatra (*C. reshni* hort. ex Tanaka) e Sunki [*C. sunki* (Hayata) hort. ex Tanaka] e o citrumelo Swingle (*C. paradisi* Macfaden x *Poncirus trifoliata* Rafinesque) (Pompeu Junior e Blumer, 2008).

O citrumelo Swingle, é uma variedade incompatível com a laranja Pera, formando plantas pouco produtivas e de vida curta. Enquanto, as tangerineiras Cleópatra e Sunki, apesar de serem porta-enxertos tolerantes à tristeza, ao declínio e à morte súbita compatíveis com a laranjeira Pera, têm como restrições a baixa tolerância à seca e à gomose de *Phytophthora*. Dessa forma, torna-se indispensável, a seleção de novos porta-enxertos compatíveis com a

laranjeira Pera e tolerantes aos fatores abióticos e bióticos limitantes à citricultura (Pompeu Junior e Blumer, 2014).

2.2. Porta-enxertos para citros

Os citros podem ser propagados por sementes, alporquia, estaquia e enxertia, sendo esta última a técnica mais utilizada, pois proporciona maior uniformidade das mudas, precocidade no início da produção e aumento na produtividade, além da obtenção de mudas geneticamente idênticas à planta-mãe (Andrade e Martins, 2003).

Além disso, citros originados de sementes retêm características juvenis por um longo período, como crescimento vertical vigoroso, abundância de espinhos que podem danificar os frutos, caule angular e demora para iniciar o florescimento, reforçando a necessidade da utilização de porta-enxertos (Machado et al., 2005).

Os porta-enxertos são selecionados por seu desempenho em diferentes condições edafoclimáticas e sua tolerância a doenças. Na citricultura, são utilizados por influenciar boas características agrônômicas às variedades-copa. Pompeu Júnior (2005) destaca que estes induzem alterações no desenvolvimento vegetativo, precocidade de produção, época de maturação e peso dos frutos, permanência dos frutos na planta, capacidade de absorção, síntese e utilização de nutrientes, tolerância à salinidade, resistência à seca e ao frio, bem como resistência ou tolerância a pragas e doenças. Portanto, a escolha do porta-enxerto é uma das decisões mais importantes na implantação de pomares comerciais de citros.

No entanto, a produção e comercialização de porta-enxertos é restrita a um pequeno número de variedades. Segundo dados da Fundecitrus (2025b), o porta-enxerto citrumelo Swingle [*C. paradisi* Macfad. cv. Duncan × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.] representou 59% dos porta-enxertos em mudas comercializadas em 2024, seguido pelo limão Cravo (*Citrus limonia* Osbeck) com 21% e citrandarins 11%, indicando um aumento significativo no uso dos citrandarins.

O limão Cravo (*Citrus limonia* Osbeck) já foi o porta-enxerto mais utilizado, devido às suas excelentes características, como maior vigor, boa produtividade e longevidade às copas, compatibilidade com todas as copas, e tolerância à seca. No entanto, apresenta suscetibilidade ao declínio, à morte súbita (MSC), ao nematoide dos citros (*Tylenchulus semipenetrans* Cobb.), à exocorte, à xiloporose e à verrugose (Oliveira et al., 2008).

Devido a MSC, porta-enxertos tolerantes vem sendo utilizado como estratégia, a exemplo da tangerina Cleópatra (*Citrus reshni* Hort. ex Tanaka), trifoliatas e citrumelo Swingle. No entanto, todos esses são mais suscetíveis à seca do que o limão Cravo, fragilizando ainda

mais a citricultura (Pompeu Junior et al., 2022). Além disso, o citrumelo Swingle é incompatível com a laranja Pera, principal variedade copa de laranjeira no Brasil (Pompeu Junior e Blumer, 2014).

A tangerina Sunki (*Citrus sunki*) começou a ser utilizada como porta-enxerto em 1985, devido sua resistência ao declínio dos citros e boa produtividade de frutos (Pompeu Junior, 2005). Estudos em seleções de *C. sunki* têm demonstrado seu potencial de tolerância à seca. A seleção ‘Sunki Tropical’, por exemplo, apresenta capacidade de suportar os efeitos da seca sem comprometer a qualidade dos frutos, sendo uma alternativa para substituir o limão Cravo (*C. limonia* Osb) em áreas semiáridas (Sousa et al., 2022).

Outra variedade é o trifoliata (*Poncirus trifoliata*), um porta-enxerto com potencial ananicante, que pode se expressar com maior ou menor intensidade, dependendo de condições edafoclimáticas, da variedade copa e uso da irrigação. Plantas mais vigorosas podem ser obtidas com este porta-enxerto, porém menores que as obtidas com outros porta-enxertos, podendo ser consideradas como semiananizantes. No entanto, tem se mostrado mais sensíveis à seca que a maioria dos demais porta-enxertos. Copas de laranja enxertadas sobre trifoliata têm demonstrado tolerância à morte súbita dos citros. Além disso, esse porta-enxerto é compatível com um grande número de cultivares de copa de citros, mas é incompatível com laranja Pera (*C. sinensis* L. Osbeck.) e tangor Murcott (*C. reticulata* Blanco × *C. sinensis* L. Osb.).

Apesar de serem gêneros diferentes, *Poncirus* e *Citrus* hibridizam facilmente com diversas espécies de citros (Bassanezi et al., 2003; Pompeu Junior, 2005).

No entanto, os plantios comerciais permanecem limitados a poucas variedades, o que consiste em um risco fitossanitário bastante elevado. Assim, a diversificação da matriz produtiva é essencial para evitar problemas já vivenciados pela citricultura brasileira (Oliveira et al., 2014).

Nesse sentido, os citrandarins, híbridos de microtangerinas com trifoliatas, foram desenvolvidos com a intenção de reunir as vantagens das tangerinas, como a tolerância ao declínio e a exocorte, com as características dos trifoliatas, entre elas a resistência à gomose, à tristeza e a indução de plantas de pequeno porte, com elevadas produções por metro cúbico de copas e frutos de excelente qualidade (Pompeu Junior, 2005).

2.3. Adensamento de plantio para citros

Com o surgimento e expansão do Huanglongbing (HLB ou greening), uma das doenças mais severas dos citros e que tem causado perdas econômicas significativas, novas estratégias de produção têm sido adotadas na citricultura, entre elas o plantio adensado. Para o

cultivo adensado, é necessária a utilização de porta-enxertos que induzam um menor porte a cultivar copa. Alguns porta-enxertos são capazes de reduzir o tamanho da copa ao diminuir o vigor da planta (Donadio et al., 2019).

Plantas de citros de porte baixo apresentam diversas vantagens, como maior eficiência produtiva e possibilidade de implantação de pomares com elevadas densidades de plantio, resultando em maior produção por unidade de área. Além disso, o tamanho menor facilita a colheita, inspeção, pulverização e erradicação de plantas no controle do HLB, atendendo as demandas dos citricultores no controle de pragas, doenças e seus vetores (Stuchi et al., 2012).

Um porta-enxerto ananicante é definido como aquele que, em combinação com a variedade copa e independente da influência de patógenos ou ambiente, resulta em uma planta adulta com altura inferior a 2,5 m de altura (Castle, 1979).

O porta-enxerto *P. trifoliata* var. *monstrosa* cv ‘Flying Dragon’ é um dos principais porta-enxertos ananizantes comerciais, com uma redução de aproximadamente 30% do tamanho das plantas. Sua origem é uma provável mutação de *P. trifoliata* e é tolerante ao vírus da tristeza, à gomose de *Phytophthora* e aos nematoides, porém é suscetível a exocorte. Apresenta pouca adaptação aos tipos de solo, com fraco desenvolvimento em solos alcalinos e arenosos, mas induz tolerância às baixas temperaturas. Apresenta incompatibilidade com a laranja Pera, tangor Murcott e limão Siciliano e é suscetível ao estresse hídrico (Stuchi et al., 2003).

Outro exemplo de trifoliata é o Rubidoux, que é capaz de reduzir em 42% o tamanho da copa de laranja Valência, em 46% de laranjas de umbigo e em 72% o de pomelos (Bitters et al., 1979).

Além do Flying Dragon, existem outros porta-enxertos ananizantes híbridos de trifoliatas, como citrandarins, citranges e citrumelos que representam alternativas para pomares de citros em sistemas de plantio de alta densidade (Gonzatto et al., 2022).

Existem seleções de híbridos em programas de melhoramento da Espanha (Martínez-Cuenca et al., 2016) e nos programas de melhoramento conduzidos no Brasil, pelo Instituto Agrônomo IAC (Schinor et al., 2013) e pela Embrapa (Ramos et al., 2015). Segundo Schinor et al. (2013), alguns híbridos de tangerina Sunki x *Poncirus trifoliata* foram capazes de induzir nanismo a cultivar copa laranja Pera, podendo ser utilizados em plantios de alta densidade. Citrandarins comerciais como IAC 1710 (semi-vigoroso) e IAC 1697 (semi-vigoroso) apresentaram bom desempenho no norte do estado de São Paulo (Girardi et al., 2021a).

Seleções híbridas de Forner-Alcaide também conferem resposta de nanismo, em particular Forner-Alcaide 517 e Forner-Alcaide 418 cujo comportamento agrônomo foi

testado em condições de campo. Ambos os porta-enxertos apresentam menores volumes de copa, mas maior eficiência produtiva quando comparados com o porta-enxerto citrange Carrizo (Forner-Giner et al., 2014).

Os citrumelos F80 e F81 foram originados do cruzamento do pomelo Duncan com *P. trifoliata*, diversos citrumelos dessa série vem sendo avaliados devido seu bom comportamento. Os citrumelos F80-6, F80-5, F80-3 e F80-18 induziram plantas de laranja Valência (*C. sinensis* [L.]Osborne) com altura e diâmetro de copas inferiores a 2 m, mas com maiores eficiências produtivas (Pompeu Junior e Blumer, 2011). Para Pompeu Junior et al. (2022), os citrumelos F80-5, F80-3 e F81-18 induziram árvores mais baixas de laranja Valência, em comparação com os citrumelos W2 e Swingle, e maior eficiência produtiva, e o F80-5 levou também à produção precoce e menor diâmetro de copa, possibilitando maior densidade de plantio.

Copas de laranja Valência em porta-enxertos de citrandarin IPEACS-239 e IPEACS-256 e híbrido de pomelo US-802, apresentaram baixo vigor, alta eficiência produtiva e altas propriedades industriais para suco de laranja, sendo, portanto, alternativas potenciais para plantios de alta densidade (Domingues et al., 2021). Além de ananizantes, esses porta-enxertos influenciam positivamente nas qualidades dos frutos e eficiência produtiva, demonstrando o potencial de materiais ananizantes.

Em maçãs, porta-enxertos ananizantes são amplamente utilizados na produção comercial para reduzir o vigor da copa, permitindo plantios em alta densidade e aumento de produtividade. Apesar do uso desses porta-enxertos ananizantes, o mecanismo básico ou fundamental do nanismo induzido por porta-enxertos ainda é desconhecido (Foster et al., 2015). Neste sentido, Foster et al. (2015) realizaram um trabalho de mapeamento genético e identificaram dois *loci*, Dw1 e Dw2, como os principais responsáveis pelo nanismo induzido pelo porta-enxerto em macieiras. Estes mesmos autores realizando um estudo comparativo de transcriptomas entre porta-enxertos ananizantes e com porte padrão, verificaram que os porta-enxertos ananizantes de maçã exibem um desequilíbrio na alocação de carboidratos e redução no crescimento e metabolismo celular (Foster et al., 2017).

2.4. Tolerância à seca

A redução de desenvolvimento da variedade copa, quando enxertada em porta-enxertos ananizantes, tem sido relacionada a potenciais hídricos mais baixos na folha e no caule, em comparação com aqueles enxertados em porta-enxertos vigorosos. Esse efeito é provavelmente consequência da elevada resistência à condutividade hidráulica, o que pode

levar a um déficit hídrico nas folhas durante períodos de alta demanda evaporativa, resultando no fechamento dos estômatos (Martínez-Cuenca et al., 2016).

Consequentemente, os porta-enxertos ananicanos têm pouca capacidade de transportar água do solo para a variedade copa. Uma menor condutividade hidráulica foi observada em plantas de laranja Navelina enxertadas em porta-enxertos ananicanos (Forner-Alcaide 517 e Forner-Alcaide 418) em comparação com as enxertadas sobre o citrange Carrizo. De acordo com este estudo, os porta-enxertos ananicanos apresentavam alta concentração de vasos do xilema com diâmetros menores quando comparados com citrange Carrizo (Forner-Giner et al., 2014).

Embora a resistência, encontrada na região da enxertia ao transporte de água e as características anatômicas do xilema, em particular o número e o diâmetro dos vasos, possam limitar o desenvolvimento da planta como um todo, a distribuição de carboidratos também é uma restrição importante. Assim, a redução da translocação de fotoassimilados das folhas para as raízes limita o desenvolvimento radicular e contribui para a maior disponibilidade desses compostos na copa, o que resulta no aumento do transporte de fotoassimilados para os frutos. Isso explica a alta eficiência de produção e a boa qualidade dos frutos que esses porta-enxertos exercem sobre as copas (Martínez-Cuenca et al., 2016).

O porte baixo aumenta a eficiência dos tratamentos fitossanitários e reduz os custos das colheitas. Entretanto, com o cultivo adensado, um maior número de plantas por hectare pode exigir maior consumo de água. Assim, o emprego de porta-enxertos ananicanos ou semiananicanos, tolerantes ao estresse hídrico, associado a copas com boa produtividade, é extremamente interessante para a cultura. Portanto, com a escassez iminente do recurso hídrico, é vital encontrar variedades de porta-enxertos mais tolerantes ao estresse hídrico.

No Brasil, a maioria dos pomares de citros não é irrigada (45% de área irrigada total) e a florada geralmente ocorre em agosto/setembro, época de menor ocorrência de chuvas. O ano de 2024 foi mais seco que o habitual no cinturão citrícola, destacam-se os meses de junho a setembro (período crítico para o primeiro florescimento das laranjeiras) que, juntos, registraram precipitação acumulada de 69 milímetros em média no cinturão, o que representa um volume 55% abaixo da média histórica. Além disso, a elevação da média da temperatura máxima em 3,2°C nos meses de agosto e setembro, prejudicou o pegamento dos frutos da primeira florada (Fundecitrus, 2025a). De acordo com o Monitor de Secas do Brasil (ANA, 2026) houve o agravamento da seca, passando de moderada para grave, no norte do estado, em decorrência das chuvas abaixo da média, no mês de julho de 2024.

No mesmo período, no ano seguinte, houve avanço da seca moderada no noroeste e centro do estado de São Paulo, além do agravamento da seca no norte, passando da categoria moderada para grave, no mês de julho em 2025 (ANA, 2026).

Este fato, torna necessário o uso de porta-enxertos tolerantes à seca e/ou mais eficientes sob restrição hídrica, como é o caso do limão Cravo. O limão Cravo é considerado tolerante à seca porque tem raízes profundas, grande absorção de água pelas raízes e alta condutividade hidráulica (Ribeiro et al., 2014). Esses atributos são considerados mecanismos de resistência à seca (Taiz e Zeiger, 2017). Outras características relacionadas a tolerância à seca, ajuste osmótico e o controle do estresse oxidativo foram atribuídos aos porta-enxertos de limão Cravo e tangerina Sunki durante a estação de menor disponibilidade de água no solo (Gonçalves et al., 2016). Entretanto, sua suscetibilidade à morte súbita dos citros (MSC) motivaram o uso de porta-enxertos tolerantes, como o citrumelo Swingle (Pompeu Junior e Blumer, 2008).

2.5. Citrandarins híbridos de *C. sunki* x *P. trifoliata* cv Rubidoux

O Centro de Citricultura Sylvio Moreira/IAC vem realizando desde 1990, um amplo programa de melhoramento genético de citros via cruzamentos dirigidos. Populações de híbridos obtidas a partir de cruzamentos entre diversas variedades de citros, selecionadas por marcadores moleculares, as quais foram estabelecidas em várias regiões do estado de São Paulo, constituindo-se em uma rede experimental de novos genótipos. Dentre estes novos híbridos, citrandarins, híbridos de *C. sunki* x *P. trifoliata* cv Rubidoux, foram selecionados por apresentarem boa produtividade, compatibilidade com a variedade copa laranja Pera e alguns apresentaram tolerância à seca comparável à do limão Cravo. Os citrandarins selecionados também conferiram à variedade copa laranja Pera diferentes portes de planta, porte normal, semiananicante e ananicientes (Cristofani-Yaly et al., 2007; Schinor et al., 2013).

Os resultados obtidos foram utilizados para o Registro das Cultivares no Registro Nacional de Cultivares (RNC), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA): Citrandarins – IAC 3155, 3070, 3007, IAC 3152 Itajobi, IAC 3299 Muriti, IAC 3010 Pindorama, IAC 3128 Guanabara e IAC 3026 Santa Amélia.

As variedades, citrumelo Swingle, citrumelo Swingle W2 e citrandarin Sunki x Benecke foram utilizados como variedades padrão neste estudo. O citrumelo Swingle é originado de um cruzamento entre o pomelo Duncan (*C. paradisi*) e *P. trifoliata*, essa variedade é considerada tolerante à tristeza, à exocorte, à xiloporose e ao declínio, resistente à gomose de *Phytophthora*, ao nematóide dos citros e à morte súbita dos citros. As cultivares enxertadas em citrumelo

Swingle produzem frutos de qualidade superior àqueles obtidos sobre o limão Cravo. No entanto, esse porta-enxerto é incompatível com laranja Pera, tangor Murcott e limão Siciliano. Esse fato torna necessário o uso de uma variedade inter-enxerto, compatível com as duas partes envolvidas, para a formação de plantas longevas e produtivas (Pompeu Junior, 2005).

O citrumelo W2 surge como uma alternativa ao citrumelo Swingle para regiões endêmicas para a morte súbita dos citros, visto que ele se assemelha ao Swingle na produção e dimensões das plantas. No entanto, o diferencial do citrumelo W2 é a sua compatibilidade com a laranjeira Pera (Pompeu Junior et al., 2022).

O citrandarin Sunki x Benecke IAC 1697 (US-812 na Flórida) é altamente produtivo, produzindo frutos de boa qualidade em árvores de porte moderado e apresentando tolerância ao vírus da tristeza dos citros (CTV) e à ferrugem dos citros. Além disso, é compatível com laranja-doce [*C. sinensis* (L.) Obsbeck], toranja (*C. paradisi* Macf.), tangerina (*C. reticulata* Blanco), tangelo (*C. reticulata* × *C. paradisi*) e outros híbridos de citros (Bowman e Rouse, 2006). O Sunki x Benecke (IAC 1697) induziu maior precocidade de produção à laranjeira Pera, sem apresentar sintomas de incompatibilidade, nem sintomas de tristeza ou declínio (Pompeu Junior e Blumer, 2014).

2.6. Biotecnologia aplicada à citros

A biotecnologia tem auxiliado o programa de melhoramento de citros via hibridação controlada, através do uso de marcadores moleculares, em estudos de diversidade genética, hibridação, mapeamento genético e seleção de alelos de resistência a doenças, visando à seleção assistida por marcadores – SAM (Curtolo et al., 2017; Lima et al., 2018). As tecnologias de sequenciamento (NGS-*next generation sequencing*), possibilitam a detecção de polimorfismo de DNA através da comparação de milhões de segmentos de leitura (*reads*) dos genomas de diferentes cultivares de uma espécie. O polimorfismo de DNA mais abundante, revelado por esta estratégia, é o polimorfismo de base de DNA (substituição ou transição de base), conhecido como SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) tem se mostrado ferramentas poderosas na geração de marcadores de DNA e identificação de novos polimorfismos (Ellegren, 2014).

A plataforma DarTseqTM Diversity Arrays Technology (DArT) é uma metodologia que combina o uso de método de redução de complexidade do genoma com as tecnologias de sequenciamento, proporcionando milhares de marcadores dominantes (DArTseq). Em citros, os marcadores DArTseq foram utilizados para a construção de mapas genéticos altamente densos de marcadores de *C. sunki* e *P. trifoliata* (Curtolo et al., 2018). Estes mapas foram utilizados

para a localização de QTLs e eQTLs para resistência à gomose de *Phytophthora* (Lima et al., 2018) e tolerância a *Candidatus Liberibacter asiaticus* (Soratto et al., 2020).

Outra ferramenta interessante que pode auxiliar na seleção de variedades de porta-enxertos ananizantes e tolerantes à seca é BSA (*Bulked segregant analysis*) proposta por Michelmore et al. (1991). A técnica BSA inicia-se com a construção de uma população segregante em que duas amostras de DNA são geradas a partir de progênies com fenótipos contrastantes e genotipadas com marcadores moleculares polimórficos entre os genitores. Com o desenvolvimento da tecnologia de sequenciamento de DNA, as abordagens de BSA baseadas em sequenciamento de última geração (NGS) aceleram drasticamente o processo de identificação de genes (Schneeberger, 2014). Em citros, Xu et al., (2010) e Cuenca et al. (2013) utilizaram a técnica BSA para mapear um *locus* de resistência ao nematoide dos citros e um para mancha marrom de alternária, respectivamente.

A herança da característica ananizante foi estudada em uma progênie de polinização aberta de Flying Dragon por Cheng e Roose (1995). Os autores concluíram que a característica é determinada por um único gene dominante para o qual Flying Dragon é heterozigoto. Neste estudo, a BSA foi utilizada para identificar três marcadores moleculares RAPD ligados ao gene ananizante.

Essas abordagens foram usadas com sucesso para identificar genes candidatos para características importantes em arroz (Takagi et al., 2015; Zheng et al., 2016), milho (Haase et al., 2015), cevada (Mascher et al., 2014) e soja (Dobbels et al., 2017). Song et al. (2017) demonstraram com sucesso a aplicação do NGS e BSA para detectar simultaneamente dois genes (qCC1 e qCC2) que governam a cor dos cotilédones em soja. A principal vantagem desse método é que ele pode rapidamente associar *loci* às regiões genômicas candidatas. Esses resultados sugeriram que o BSA-seq poderia acelerar o mapeamento de *locus* controlando características qualitativas, mesmo se uma característica for controlada por mais de um *locus*. A associação gene x fenótipo representa um importante passo para desvendar os mecanismos envolvidos nessas características. Nesse contexto, o Programa de Melhoramento já realizou a genotipagem da população de 272 híbridos de *C. sunki* × *P. trifoliata* e obteve mapas de ligação gênica com marcadores DArT-seq e com SNPs para *P. trifoliata* e *C. sunki* através da Diversity Arrays Technology Ltd. (DArT P / L, Canberra, Austrália) (<http://www.diversityarrays.com>) (Curtolo et al., 2018). Essa mesma população foi usada recentemente para construir um mapa multiplataforma de alta densidade e para identificar QTLs de resposta ao HLB em diversos ensaios (Santini-Gazaffi et al., submitted).

Novos métodos vêm sendo desenvolvidos buscando acelerar e otimizar a identificação de *loci* genômicos, como BSA QTL-seq que utiliza a reconstrução em massa guiada pelo genótipo por meio de bioinformática, permitindo o mapeamento simultâneo de múltiplas características a partir do mesmo conjunto de dados genotípicos (Esposito et al., 2026).

A associação entre sequências genômicas e suas respectivas funções biológicas é um dos principais desafios na análise de dados. A anotação funcional permite a categorização de genes em classes funcionais, possibilitando compreender o significado fisiológico de grandes conjuntos de genes e identificar diferenças funcionais entre subgrupos de sequências (Conesa et al., 2005). A interpretação funcional é uma etapa fundamental na análise de dados, o esquema de anotação funcional mais difundido, e provavelmente mais abrangente para sequências de genes e proteínas, é a Gene Ontology (GO) (Ashburner et al., 2000).

Apesar dos avanços na compreensão dos efeitos dos porta-enxertos sobre o vigor e a tolerância à seca das variedades copa, ainda são escassos os estudos que integrem a caracterização fenotípica com informações moleculares. Nesse contexto, abordagens que combinem a fenotipagem de precisão com ferramentas genômicas, como a Análise de Segregantes Agrupados (BSA, *Bulked Segregant Analysis*) e marcadores DArTseq, representam estratégias promissoras para a identificação de regiões genômicas e marcadores associados a essas características complexas, contribuindo para o desenvolvimento de programas de melhoramento mais eficientes.

Este estudo oferece uma integração única da fenotipagem em campo com a abordagem BSA *in silico*, combinada com marcadores DArTseq, para investigar a tolerância à seca e as características de nanismo em porta-enxertos de citrandarins em condições de campo.

3. OBJETIVO

Caracterizar porta-enxertos ananizantes e porta-enxertos tolerantes à seca para a variedade copa da laranja Pera, avaliando aspectos fitotécnicos, além de selecionar marcadores moleculares DArTseq associados a essas características.

3.1. Objetivos específicos

- Analisar o desenvolvimento vegetativo das plantas;
- Avaliar a qualidade dos frutos, a produtividade e a eficiência de produção de laranja Pera enxertadas em diferentes porta-enxertos;
- Avaliar a tolerância à seca nas diferentes combinações de copas e porta-enxertos;

- Analisar a distribuição radicular e realizar análises morfológica e anatômica de raízes das combinações;
- Identificar marcadores moleculares associados com a redução de vigor e tolerância à seca de diferentes combinações copa/porta-enxertos, utilizando a estratégia de BSA e marcadores moleculares do tipo DArTseq.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área experimental e das variedades

O experimento foi instalado em dois municípios do estado de São Paulo, em 2013: Gavião Peixoto, na Região Central/SP – Fazenda Santa Amélia I, latitudes 21°45'58,91” Sul e 48°25'26,59” Oeste, 594 m de altitude, solo Latossolo Vermelho Distrófico e clima Cwa de Köppen, planalto subtropical; Barretos, na Região Norte/SP – Fazenda Guanabara, latitudes 20°30'32.30” Sul e 48°36'33.99” Oeste, 536 m de altitude, solo Latossolo Vermelho Distroférrico, e clima Aw, tropical.

Latossolos Vermelhos Distróficos é caracterizado por apresentar baixa fertilidade enquanto o Latossolo Vermelho Distroférrico apresenta mesma baixa fertilidade, mas tem maior teor de Fe₂O₃ (Ferro) (Santos et al., 2018).

Foram estabelecidos experimentos com laranja Pera (*Citrus sinensis* Osbeck) enxertada em 20 porta-enxertos, sendo 18 citrandarins: 17 híbridos provenientes do cruzamento entre *Citrus sunki* x *Poncirus trifoliata* cv. Rubidoux e Sunki x Benecke - SB (IAC 1697) proveniente do cruzamento entre *C. sunki* x *P. trifoliata* cv. Benecke; mais os citrumelos W2 (W2), e Swingle (SW) [*C. paradisi* Macfad. x *P. trifoliata* (L.) Raf.].

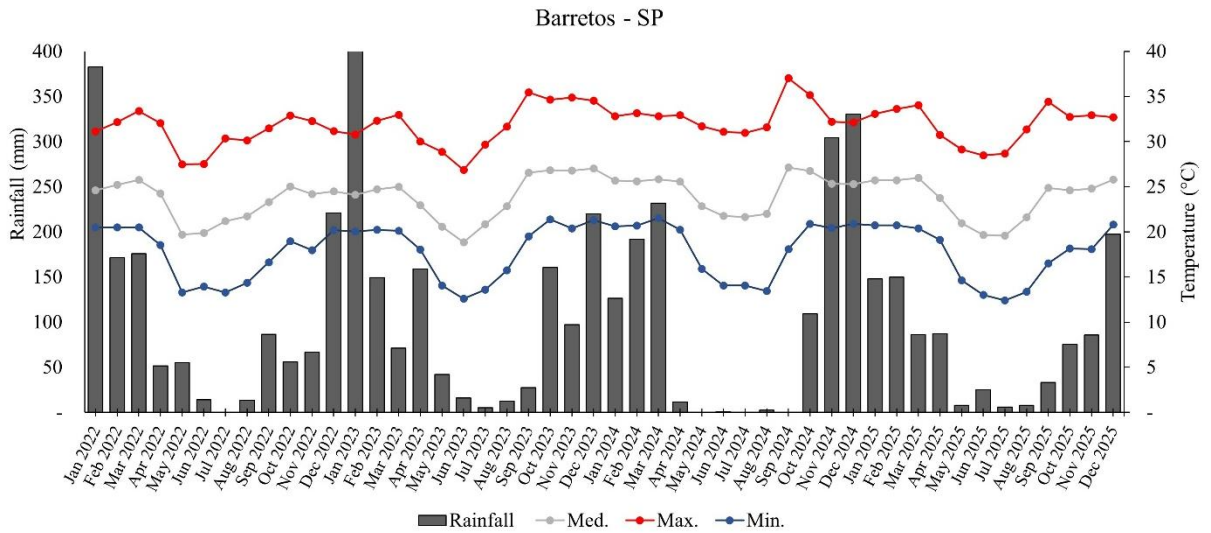
Em ambos os experimentos o delineamento foi em blocos casualizados, com três repetições e número variável de plantas por parcela, em espaçamento de 6,5 x 2,8 m (550 árvores por hectare). As plantas foram cultivadas sob o padrão e práticas recomendadas para o cultivo de laranja doce no Brasil, sem poda e raleio de frutos. As plantas daninhas foram controladas por corte mecânico da vegetação natural (*Urochloa* spp.) nas entrelinhas, suplementado por aplicações de herbicidas ao longo das linhas de plantas. O experimento foi conduzido com irrigação suplementar conforme indicação para a cultura.

Em relação ao clima, Barretos apresenta temperaturas ligeiramente superiores às de Gavião Peixoto, sendo março o mês mais quente e maio o mais frio. Em relação à precipitação, em Barretos houve menor volume anual de precipitação em comparação a Gavião Peixoto, no entanto, ambos os locais apresentaram um padrão semelhante de precipitação, com os meses de

verão sendo os mais chuvosos, especialmente janeiro e dezembro. Os meses de junho, julho e agosto apresentaram menores volumes de chuva nas duas localidades (Figura 1). De modo geral, houve menor precipitação em 2025 e 2024 em comparação a 2022.

Tabela 1. Porta-enxertos avaliados no experimento, nome comercial e número de registro no MAPA.

Sigla	Parentais	Nome comercial	RNC/ MAPA
H18	<i>C. sunki</i> x <i>P. trifoliata</i> cv. Rubidoux	-	-
H26		IAC 3026 Santa Amélia	44688
H47		-	-
H68		-	-
H70		-	-
H73		-	-
H110		-	-
H124		-	-
H128		IAC 3128 Guanabara	44689
H137		-	-
H139	<i>C. sunki</i> x <i>P. trifoliata</i> cv. Benecke	-	-
H148		-	-
H150		-	-
H151		-	-
H152		IAC 3152 Itajobi	36027
H248	<i>C. paradisi</i> Macfad. × <i>P. trifoliata</i> (L.) Raf.	-	-
H299		IAC 3299 Muriti	36025
SB		IAC 1697	21832
SW		Citrumelo Swingle	-
W2		Citrumelo Swingle W2	56558



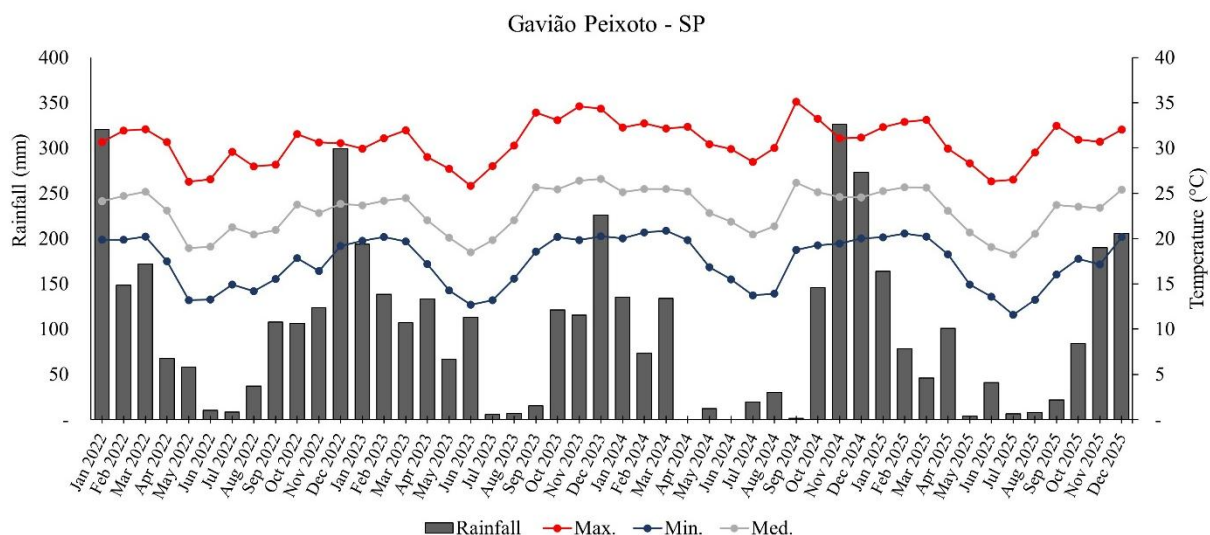


Figura 1. Precipitação, temperatura máxima, média e mínima em duas localidades do estado de São Paulo, por quatro anos. (A) Barretos, (B) Gavião Peixoto.

4.2. Desenvolvimento vegetativo

O desenvolvimento de planta, representado pelo volume de copa, expresso em m^3 , foi mensurado em fevereiro e novembro de 2023, outubro de 2024 e junho de 2025 em três repetições, uma planta por parcela. A variável foi determinada através de régua graduada pela determinação da altura de planta em metros (H) e paralelamente ao solo a uma altura de 1,5 metros para o diâmetro (D), em seguida o volume de copa (V) foi calculado pela equação de Mendel (1956). $V = \frac{2}{3} \times \pi \times (D/2)^2 \times H$.

Adicionalmente foi calculado Índice de crescimento vegetativo (ICV) adaptado de Benincasa (2003), onde P é o volume de copa e t o tempo em anos $ICV = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$, calculado com a média da variável volume de copa, do ano inicial 2022 a 2025.

4.3 Avaliação da produtividade e análises físico-químicas dos frutos

A produção total de frutos da parcela foi determinada com dinamômetro digital. Foram colhidas três repetições e três plantas por parcela. Os valores de produção foram expressos em kg de fruto planta⁻¹ (De Negri et al., 2005).

A produtividade ajustada foi obtida através da densidade de plantio ajustada (DPA). Para calcular a produtividade por hectare foi utilizada a produção por planta multiplicada pelo número de plantas utilizada por hectare $[10000 / (6,5 \times 2,8)]$, onde 6,5x2,8 (metros) é o espaçamento utilizado na área do experimento. O mesmo cálculo foi utilizado para a produtividade ajustada, porém variando o espaçamento de cada combinação copa/porta-

enxerto, conforme o diâmetro da planta (d) mensurado no campo, ajustando-o então com a seguinte equação (De Negri et al., 2005): $\frac{10.000}{d+2,5m} \times (0,75 \times d)$.

Para a eficiência produtiva, usou-se a produção dos dois anos (2023 e 2024) em kg frutos planta⁻¹, dividido pelo volume de copa (m³), expresso em kg de fruta por m³.

Análises físico-químicas dos frutos relacionadas à qualidade do fruto foram realizadas através da coleta de 15 frutos por parcela e as análises foram realizadas no Laboratório de Qualidade e Pós-Colheita, do Centro de Citricultura Sylvio Moreira/IAC, em Cordeirópolis, SP. Os frutos foram colhidos em julho (Barretos) e em setembro (Gavião Peixoto) de 2024. Foram determinados:

a) Massa: a massa total dos frutos obtidos, em uma balança marca Filizola com capacidade de 15 kg, com sensibilidade 5 g;

b) Sólidos solúveis totais (SST): o teor de sólidos solúveis foi determinado por leitura direta no refratômetro B&S, modelo RFM 330 e expresso em °Brix. Os dados foram corrigidos pela temperatura e pela acidez do suco;

c) Acidez: a acidez foi obtida por titulação de 25 mL de suco, com uma solução de hidróxido de sódio, de normalidade 0,3125 e usando-se fenolftaleína como indicadora;

d) Relação sólidos solúveis/acidez (Ratio): calculando-se a relação sólidos solúveis/acidez fazendo-se o valor da acidez igual a 1;

e) Rendimento de suco: determinado após esmagamento do fruto na extratora OIC (Organização Internacional Centenário) modelo OTTO 1800 (filtro com diâmetro interno = 26,11 mm; comprimento = 265 mm; furos de diâmetro = 0,6 mm; área de vazão = 20%) e calculado através da relação massa do suco/massa do fruto e expresso em porcentagem;

f) Índice tecnológico (IT): $IT = [\text{Rendimento em suco (\%)} \times \text{SST} \times 40,8] / 10.000$ conforme proposto por Di Giorgi et al. (1990).

4.4 Tolerância à seca

As avaliações de déficit hídrico foram realizadas em julho de 2022 e 2025, período caracterizado por baixa precipitação e menor temperatura, representando condição de estresse ambiental para comparação entre genótipos.

Foram realizadas avaliações de potencial da água na folha conforme a metodologia citada por Kaufmann (1968), através de câmara de pressão de Scholander. Para isso, foram coletadas folhas das variedades em estudo, não danificadas no terço médio da planta, às 04h00 da manhã, de acordo com as recomendações de Machado et al. (2002). Imediatamente após a

coleta, as folhas foram armazenadas, individualmente, em sacos hermeticamente fechados, acondicionados em caixa térmica contendo gelo e, logo em seguida, colocadas na câmara de pressão (Câmara de Scholander da Tecnal Equipamentos Científicos - modelo 3115P80G4V22) e os valores foram expressos em megapascal (MPa).

Em complemento ao potencial da água na folha, foi realizada avaliação visual de tolerância à seca, essas avaliações consistiram na atribuição de notas visuais, baseando-se na presença e/ou ausência de enrolamento foliar característico de plantas sob estresse hídrico, com três repetições por tratamento, conforme utilizado por Stuchi et al. (2000). Foram atribuídas notas, variando de 1 a 3, onde: (1) enrolamento foliar expressivo, com ou sem aspecto de secas; (2) enrolamento foliar pouco expressivo, folhas levemente enroladas e; (3) limbo foliar normal, ausência de enrolamento foliar. Para as duas análises foram utilizadas três repetições, uma planta por parcela, totalizando três repetições biológicas por genótipo.

4.5 Distribuição de raízes das plantas

A distribuição de raízes foi avaliada em 10 variedades do experimento, sendo dois *bulks* (cinco combinações de porta-enxertos ananizantes e cinco combinações de porta-enxertos não ananizantes). O experimento foi realizado em Barretos, com duas repetições, uma planta por parcela.

As raízes das plantas que compõem os *bulks* foram avaliadas, em fevereiro de 2023, utilizando-se método descrito por Böhm (1979). Foram coletadas duas repetições, uma planta por parcela, em cada tratamento, com trado de caneca à 50 cm do tronco, em duas profundidades do solo (0 a 20 cm e 20 a 40 cm).

As raízes coletadas foram lavadas utilizando peneiras com 2 mm de malha, posteriormente foi mensurada a massa úmida, em balança semi-analítica. Após, as raízes foram secas em estufa a 65°C por 72 horas e posteriormente, aferida a massa seca das raízes. Utilizando-se do medidor de área foliar LI-COR LI-3100C foi mensurada a área radicular em cm².

Para os cálculos, foi considerado que cada amostra coletada com o trado possui o mesmo volume. O volume do trado foi calculado utilizando a fórmula: $V = \pi D^2.H/4$. Em que D = diâmetro de 0,07m e H = altura de 0,22m. Assim o volume final do trado é de 0,000847 m³. Os valores obtidos foram ajustados para 1 m³.

4.6 Análise da anatomia de raízes

Foram feitas observações em microscopia eletrônica de varredura (MEV) das raízes dos indivíduos dos *bulks* (item 4.5). Para isso as amostras foram coletadas em fevereiro de 2023, a 50 cm do tronco das plantas e a 20 cm de profundidade, em dois pontos por tratamento, lavadas e armazenadas em solução FAA (formaldeído 37%, ácido acético glacial, etanol 70%) (Johansen, 1940).

As amostras de raízes foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) TM4000Plus Hitachi Microscópio, do Centro de Citricultura Sylvio Moreira, do Instituto Agrônômico (IAC). As imagens obtidas foram analisadas pelo software ImageJ, para obtenção do diâmetro dos vasos e frequência dos vasos do xilema radicular por seção. O diâmetro dos vasos do xilema (DV) foi calculado a partir da média de duas medições perpendiculares entre si na parte mais larga do lúmen de cada vaso (Olmstead et al., 2006).

4.7 Seleção de Marcadores moleculares associados à resistência à seca e ao porte induzido à variedade copa

A busca pelas regiões do genoma associadas às características ananizantes e de tolerância à seca se deu pelo uso da técnica *Bulk Segregant Analysis - BSA in silico* (Bello et al., 2014), com modificação da estratégia de BSA descrita por Michelmore et al. (1991), utilizando de procedimentos de bioinformática. Os híbridos fazem parte de um programa de melhoramento que envolve a população segregante derivada de *C. sunki* × *P. trifoliata*, previamente genotipada com marcadores DArTseq (Curtolo et al., 2018), permitindo a integração de dados fenotípicos e moleculares. Os marcadores DArTseq utilizados foram codificados como 0 (ausente) ou 1 (presente).

A seleção das plantas para compor os bulks para porte induzido foi feita utilizando os dados estatísticos de: altura da copa (m), diâmetro da copa (m) e volume de copa (m³). Considerando os grupos com diferença estatística entre si pelo Scott-Knott ($\alpha = 0,05$).

Para seleção dos bulks relacionados a tolerância à seca, foi utilizada nota visual de enrolamento foliar do ano de 2024. Da mesma forma, a seleção dos bulks tolerante/intolerante foi realizada considerando os grupos com diferença estatística entre si pelo Scott-Knott ($\alpha = 0,05$). Sendo grupo A tolerante e grupo B intolerante.

A associação de marcadores DArTseq com dados fenotípicos foi avaliada agrupando-se os 17 híbridos analisados em dois *bulks* (A e B). Esses *bulks* foram formados a partir de grupos com valores extremos, identificados por meio da análise de variância e do teste de Scott-Knott para cada característica avaliada. Calculou-se a frequência alélica (presença/ausência) para cada

locus e determinou-se o contraste entre as frequências de cada *bulk* utilizando o índice $\Delta Allele_{index}$. Esse índice, adaptado de Takagi et al. (2013), é calculado da seguinte forma: $\Delta Allele_{index} = Allele\ frequency_{Bulk\ A} - Allele\ frequency_{Bulk\ B}$. A significância estatística do índice $\Delta Allele$ foi avaliada pelo teste de Fisher (Fisher, 1922), com nível de significância $\alpha = 0.05$.

A seleção de marcadores associados ao porte da planta adotou uma abordagem conservadora, concentrando-se apenas naqueles associados a todas as características avaliadas: altura, diâmetro e volume da copa. Um diagrama de Venn (<https://bioinformatics.psb.ugent.be/webtools/Venn/>) foi elaborado utilizando os marcadores moleculares significativamente associados a cada característica, e apenas aqueles correspondentes à interseção dos conjuntos de dados foram selecionados para análises posteriores.

4.8 Anotação funcional das sequências em genoma de Citrus

Após a seleção dos marcadores DArTseq por BSA *in silico*, as sequências foram alinhadas utilizando o BLASTn (The Basic Local Alignment Search Tool), com genoma de referência de *Citrus sinensis* com o ID RefSeq GCF_022201045.2, do banco de dados nr (nonredundant) do National Center for Biotechnology Information - NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Sequências gênicas localizadas mais próximas dos marcadores foram anotadas utilizando software Blast2GO v. 6.0.3. (Conesa et al., 2005).

A busca por similaridade foi realizada por BLASTx, com banco de dados nr do NCBI, filtro taxonômico Viridiplantae (green plants), e-value cutoff 1×10^{-5} . Posteriormente as sequências foram analisadas usando InterProScan para identificar domínios conservados. Em seguida foi realizado o mapping de termos Gene Ontology (GO) e a anotação funcional com base nos candidatos GO obtidos.

4.9 Análises estatísticas

Todos os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e do teste de comparação de médias Scott-Knott, adotando-se nível de significância de $\alpha = 0,05$. Quando necessário, foi aplicada a transformação de Box-Cox (Box e Cox, 1964) para normalizar a distribuição dos dados. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (versão 4.4.2; Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria) (R Core Team, 2024), com os

pacotes ExpDes.pt (Ferreira et al., 2021) e MASS (Venables et al., 2002). Para as análises de distribuição de raízes os dados foram avaliados pelo teste de Tukey a 5%.

Análises multivariadas utilizando análise de componentes principais (ACP) foram conduzidas com base em uma matriz de correlação entre potencial hídrico, tolerância à seca, índice tecnológico, produtividade, eficiência produtiva e volume de copa, para analisar a interação das respostas fisiológicas na produtividade com diferentes combinações de copa/porta-enxerto. Os dados da PCA foram normalizados e apresentados em um biplot das distâncias dos componentes principais em relação aos seus valores médios. A PCA foi realizada usando o pacote FactoMineR no R (Lê et al., 2008). A formação de clusters foi realizada utilizando pacote “NbClust” no (Charrad et al., 2014), método Within-Cluster Sum of Squares (WSS).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desenvolvimento vegetativo

O experimento da cidade de Barretos/SP proporcionou incrementos positivos no crescimento da maioria dos porta-enxertos, enquanto em Gavião Peixoto/SP somente citrumelo Swingle (SW) apresentou valores superiores (Tabela 2).

Em Barretos, os porta-enxertos H248, H70, H151, H139, H124, H18 e W2 induziram maior altura ($\geq 3,5$ m) e maior volume de copa (> 30 m³) em laranja Pera. Enquanto os híbridos citrandarins H110, H68, H137 e H26 formaram plantas mais baixas ($\leq 2,8$ m) e consequentemente, menor volume de copa (≤ 20 m³).

Em Gavião Peixoto, as copas em H128 e H18 não diferem de SW e W2, com maior altura de plantas ($> 3,4$ m) e maior volume de copa (> 33 m³). Enquanto os citrandarins H110, H73, H137, H68 e H26 induziram menor altura das plantas ($< 2,4$ m), resultaram em plantas menos vigorosas (> 20 m³).

Os dados corroboram com resultados obtidos por Schinor et al. (2013), onde observaram menor altura e volume da copa de laranja Pera, enxertadas sobre citrandarins H26, H110 e H137. Estudos com o porta-enxerto *P. trifoliata* e alguns de seus híbridos, apontam sua capacidade de reduzir a altura e o volume de copa de laranja Valência em condições de sequeiro (Domingues et al., 2021). Segundo Pompeu Junior et al. (2005), um porta-enxerto ananicante é definido como aquele que, resulta em uma planta adulta com altura inferior a 2,5 m de altura, independente da influência do clima, do solo ou da irrigação.

Tabela 2. Altura, diâmetro e volume de copa de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos (PE), em Gavião Peixoto-SP e Barretos-SP, 2025.

PE	Barretos			Gavião Peixoto		
	Altura (m)	Diâmetro (m)	Volume (m ³)	Altura (m)	Diâmetro (m)	Volume (m ³)
H18	3,50 a	4,73 a	41,45 a	3,47 a	4,33 a	34,03 b
H26	2,17 f	3,67 b	15,27 c	1,63 e	3,27 c	9,31 d
H47	3,00 c	4,07 b	26,02 b	3,10 b	4,09 b	27,19 c
H68	2,63 e	3,67 b	18,56 c	2,13 d	2,83 d	9,04 d
H70	3,70 a	4,33 a	36,37 a	2,97 b	4,27 a	28,33 c
H73	2,80 d	3,93 b	22,67 b	2,20 d	3,07 d	10,85 d
H110	2,83 d	3,73 b	20,70 c	2,30 d	2,76 d	9,38 d
H124	3,53 a	4,47 a	36,92 a	3,10 b	4,27 a	29,59 c
H128	3,40 b	4,27 a	32,73 a	3,57 a	4,42 a	36,43 b
H137	2,53 e	3,60 b	17,25 c	2,13 d	3,27 c	11,98 d
H139	3,57 a	4,07 b	30,88 a	2,93 b	3,80 b	22,44 c
H148	2,87 d	3,87 b	22,42 b	2,53 c	3,20 c	13,64 d
H150	3,73 a	3,67 b	26,75 b	2,63 c	3,47 c	16,60 d
H151	3,63 a	4,00 b	30,69 a	2,47 c	3,72 c	17,94 d
H152	3,30 b	3,80 b	25,19 b	3,07 b	4,33 a	30,17 c
H248	3,70 a	4,13 a	33,68 a	2,97 b	4,31 a	29,02 c
H299	3,10 c	4,00 b	26,01 b	3,17 b	3,91 b	25,54 c
IAC 1697	3,37 b	4,47 a	35,54 a	2,93 b	4,65 a	33,32 b
SW	3,20 b	4,07 b	27,73 b	3,57 a	4,53 a	38,52 b
W2	3,60 a	4,20 a	33,27 a	3,57 a	4,82 a	43,58 a
CV (%)	4,73	7,46	16,75	4,73	7,46	16,75

Médias seguidas da mesma letra minúscula entre porta-enxerto e maiúscula entre cidades, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$).

O citrumelo Swingle (SW) é um porta-enxerto vigoroso que induziu maior crescimento da copa laranja Valência (Devite et al., 2025). Para Pompeu Junior e Blumer (2011), ambos os porta-enxertos SW e W2 proporcionaram laranjeiras maiores e mais produtivas, com a mesma eficiência produtiva que as formadas sobre o limão Cravo. Dessa forma podemos inferir que os porta-enxertos H18 e H128 são variedades vigorosas, visto que não diferenciam das variedades padrão SW e W2, além de serem mais vigorosas independentemente do local.

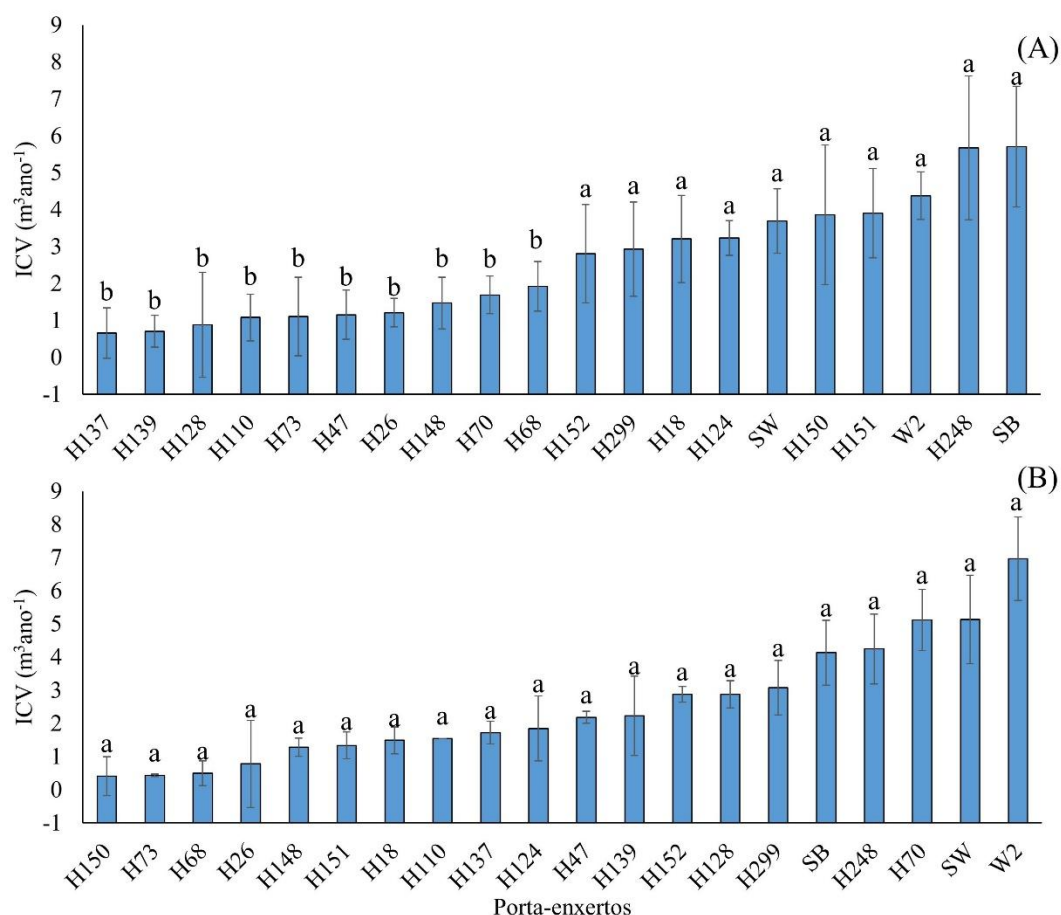


Figura 2. Índice de crescimento vegetativo (ICV) de laranja Pera em diferentes porta-enxertos de 2022 a 2025. (A) Barretos e (B) Gavião Peixoto.

De acordo com o resultado do ICV das plantas em Barretos, a laranja Pera sobre os porta-enxertos SB, H248, W2, H151, H150, SW, H124, H18, H299 e H152 apresentou maior crescimento ao longo de quatro anos, com valor de $ICV > 2 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$. Em Gavião Peixoto, não houve diferença estatística, no entanto, as variedades W2, SW, H70, H248, SB, H299, H128 e H152 também apresentaram $ICV > 2 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$ (Figura 2). O ICV indica a velocidade de crescimento ao longo do período de observação. Todo crescimento resulta da produção de matéria suficiente para atender as necessidades metabólicas da planta e ainda promover a formação de novos tecidos (Benincasa, 2003).

Os resultados do índice de crescimento vegetativo (ICV) condizem com os obtidos para o vigor de copa. De forma geral, os porta-enxertos que induziram maior altura e maior volume de copa, como H248, H70, H151, H124, H18 e W2 também apresentaram maior taxa de crescimento vegetativo ao longo do período de avaliação. Enquanto os citrandarins H110, H68, H137 e H26 induziram plantas de menor porte e com menor ICV em Barretos. Esse comportamento demonstra que os porta-enxertos mais vigorosos não apenas originam copas

maiores, mas também sustentaram maiores taxas de crescimento ao longo do desenvolvimento das plantas.

Vários trabalhos têm demonstrado a importância do uso de porta-enxertos ananizantes ou semiananizantes para a citricultura. Porta-enxertos ananizantes, restringem significativamente o crescimento vegetativo e o desenvolvimento de brotos, reduzindo assim os locais disponíveis para alimentação e oviposição de psíldeos, sendo considerados promissores para estratégias de manejo do HLB, ao diminuir as populações de vetores e o potencial de disseminação da doença (De Carvalho et al., 2026).

Em densidades de plantio mais elevadas, a incidência de HLB foi predominantemente menor, devido a maior facilidade no controle do vetor e a remoção de árvores com sintomas de HLB. O plantio de árvores em alta densidade também contribuiu para o aumento da rentabilidade dos agricultores em áreas endêmicas da doença (Moreira et al., 2019).

Além disso, porta-enxertos menos vigorosos permitiriam funcionalidades como, menor necessidade de poda, facilidade de manejo e, principalmente, a viabilidade da colheita mecanizada (Costa et al., 2021).

5.2 Produtividade e Análises físico-químicas dos frutos

5.2.1. Produtividade da laranja Pera em porta-enxertos citrandarins

Em relação à produção (kg planta^{-1}), em Gavião Peixoto o porta-enxerto SW apresentou maior produção acumulada (Figura 3C) ao longo de cinco safras ($384,15 \text{ kg planta}^{-1}$), enquanto em Barretos o híbrido H139 apresentou a maior produção acumulada ($380,77 \text{ kg planta}^{-1}$) (Figura 3A). Por outro lado, ao considerar a produtividade acumulada por área (t ha^{-1} acumulada), o híbrido H150 se destaca com maiores valores em ambas as localidades, com $300,74 \text{ t ha}^{-1}$ em Barretos (Figura 3B) e $228,71 \text{ t ha}^{-1}$ em Gavião Peixoto (Figura 3D), (Tabela S1 e S2). Na comparação entre as localidades, pode-se observar que, em geral, a produção de Barretos foi superior à de Gavião Peixoto.

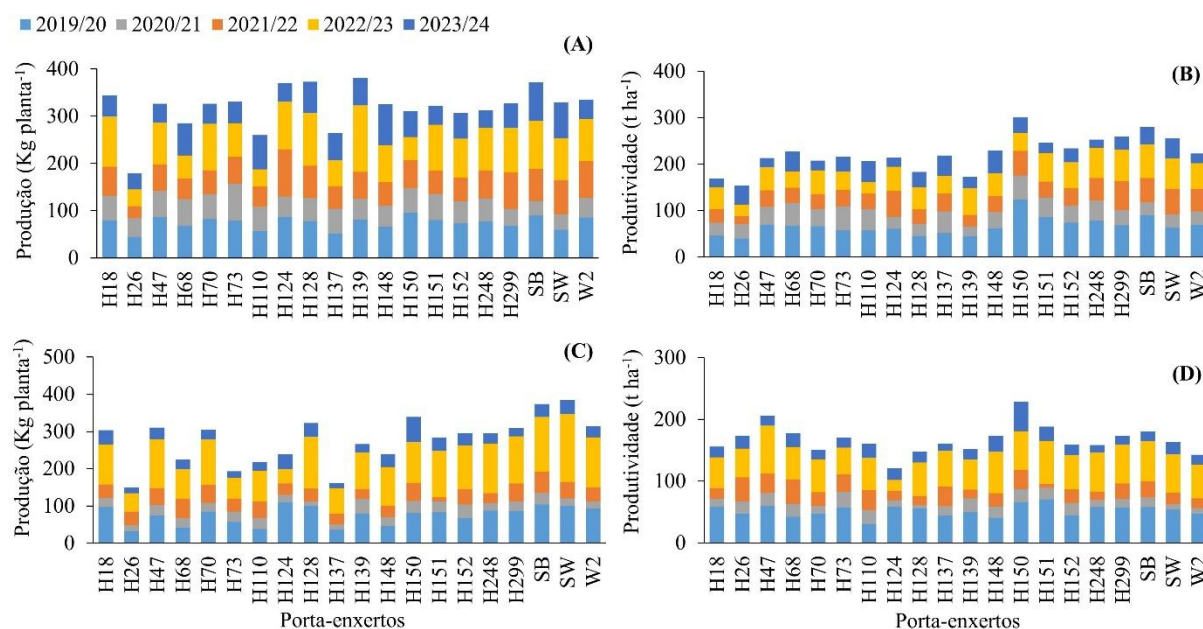


Figura 3. Produção acumulada (kg planta^{-1}) em cinco anos de avaliação. Laranja Pera em 20 porta-enxertos nas regiões: (A) Barretos-SP, (C) Gavião Peixoto-SP. Produtividade acumulada (t ha^{-1}) em cinco anos de avaliação. Laranja Pera em 20 porta-enxertos nas regiões: (B) Barretos-SP, (D) Gavião Peixoto-SP.

Em 2024, em Barretos, as plantas nos porta-enxertos H68, H110, H128, H148 e IAC 1697 (SB) apresentaram maior produção por planta, não diferindo do SW. Em Gavião Peixoto, no entanto, apenas a laranja Pera sobre o citrandarin H150 apresentou produção significativamente superior ($67,4 \text{ kg planta}^{-1}$), diferindo das demais (Figura 3A). Esses mesmos porta-enxertos apresentam valores superiores a produtividade nacional e estadual. Em 2024 o Brasil produziu cerca de $27,7 \text{ t ha}^{-1}$ e o estado de São Paulo produziu $33,7 \text{ t ha}^{-1}$ (IBGE, 2026).

Analisando os valores de produção ajustada ao espaçamento de plantio, as plantas em H26 e H137 também se destacam com maiores valores de produtividade por área, junto com H68, H110, H148, IAC 1697 (SB) e SW em Barretos (Figura 3B). Os valores de eficiência produtiva foram maiores para H26, H68, H73, H110, H137 e H148 (Figura 3C).

Em Gavião Peixoto, apenas a laranja Pera sobre o citrandarin H150 diferiu estatisticamente dos demais em produtividade por área. No entanto, em relação a eficiência produtiva, as copas em H26, H68, H110, H148 e H150 também apresentaram maiores valores. Importante ressaltar que os porta-enxertos com menor produção por planta deixam de diferir das demais ao se ajustar o espaçamento, evidenciando o efeito do adensamento sobre o desempenho produtivo.

Esses resultados corroboram com os obtidos por Schinor et al. (2013), em estudo conduzido em sequeiro no município de Colômbia/SP, onde também observaram alta produtividade de laranja Pera (kg m^{-3}) para o híbrido H68, enquanto H128 e H139 também apresentaram elevada produção por planta, concordando com os resultados obtidos neste estudo. Enquanto De Sousa et al. (2025), verificaram que o porta-enxerto H152 influenciou positivamente a produção (t ha^{-1}) de frutos em lima acida Tahiti, em comparação com Flying Dragon.

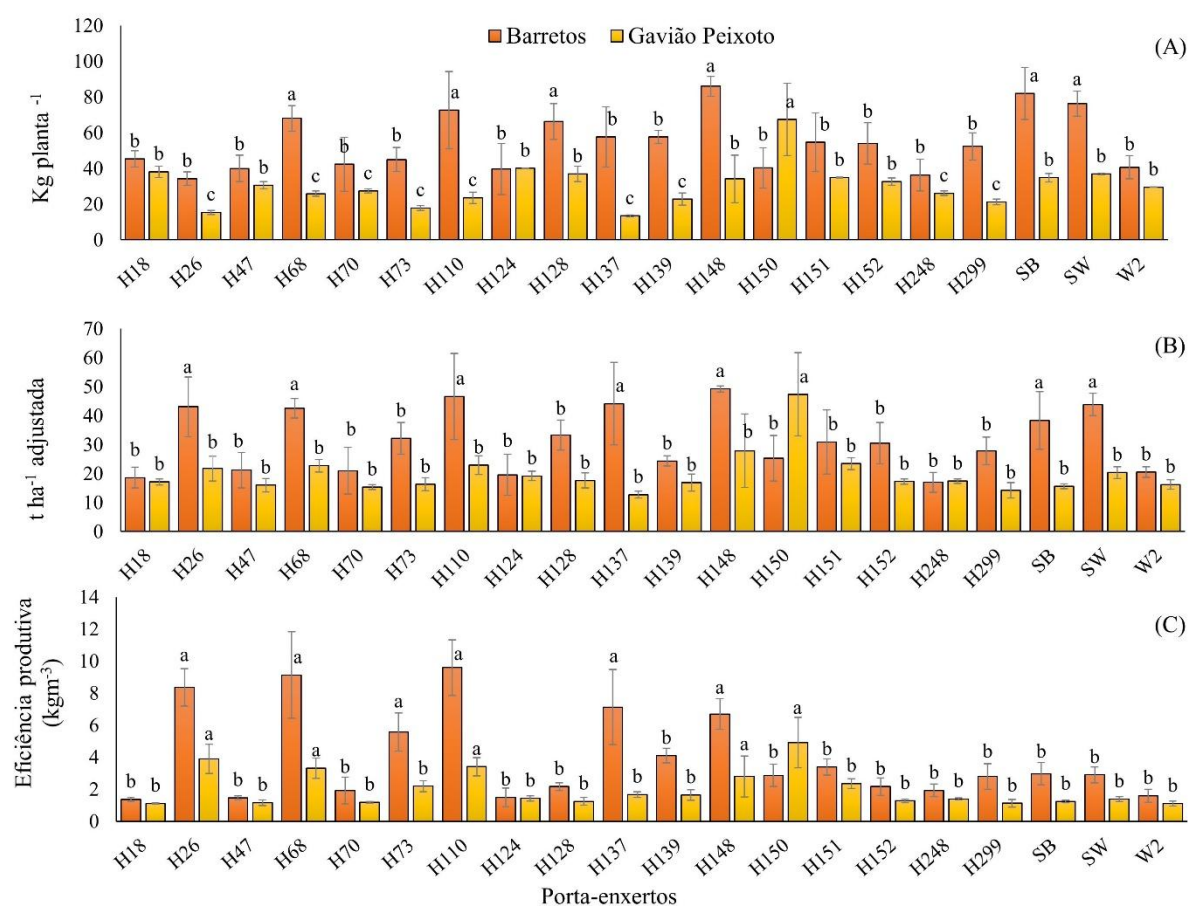


Figura 4. Produção (kg planta^{-1}) (A), produtividade ajustada (t ha^{-1}) (B) e eficiência produtiva (kg m^{-3}) (C), de laranja Pera em 20 porta-enxertos, em Barretos-SP e Gavião Peixoto-SP, 2024.

Em relação as variedades padrão, o citrumelo Swingle tem sido associado a boa produtividade das copas enxertadas nesse porta-enxerto. Para Devite et al. (2025), o citrumelo Swingle influenciou positivamente a produtividade por planta (kg planta^{-1}) de laranja Valência, destacando a capacidade de manter altos níveis de produção ao longo do tempo.

Estudos anteriores têm demonstrado o potencial produtivo de porta-enxertos ananizantes. Alguns porta-enxertos citrandarins semiananizantes e ananizantes, híbridos de Flying Dragon, se destacaram por induzir maior produtividade e qualidade de frutos na variedade de laranja doce Valência (Costa et al., 2021).

Segundo Devite et al. (2025), algumas combinações de citrandarins, como o IAC 1711 (*C. reticulata* Blanco ‘Changsha’ × *P. trifoliata* ‘English Large’), superaram o citrumelo Swingle (SW) em produtividade total, e em eficiência produtiva, como o IAC 1600 (*C. reshni* ‘Cleopatra’ × *P. trifoliata* ‘Rubidoux’), maximizando o rendimento em relação ao volume do enxerto.

Em laranja Valência, foi possível determinar uma maior eficiência produtiva para o porta-enxerto semianão IAC 1697, visto que este porta-enxerto diminuiu o tamanho da árvore, mas teve menor redução da produtividade em comparação com os porta-enxertos mais vigorosos e altamente produtivos (Girardi et al., 2021b). Esse comportamento é particularmente desejável em sistemas de plantio adensado, onde a produção por unidade de área é mais importante do que a produção individual por planta.

Dessa forma, pode-se inferir que porta-enxertos menos vigorosos apresentam menor produção individual, porém quando utilizados em sistemas adensados propiciam maior eficiência produtiva. Além disso, todas as variedades de porta-enxertos avaliadas se apresentaram iguais ou mais produtivas que a variedade comercial mais utilizada.

É evidente que o uso de espaçamentos mais adensados, ou seja, o arranjo adequado da copa no espaço disponível, é fundamental para porta-enxertos semiananizantes ou ananizante, pois permite um rendimento maior em relação à produtividade obtida na densidade de plantio convencional (Costa et al., 2021).

5.2.2. Análises físico-químicas dos frutos

As análises físico-químicas (Figura 5 e 6) revelaram diferenças para a maioria das variáveis avaliadas, com exceção da acidez em Barretos ($p > 0,05$). Os resultados evidenciam a influência do porta-enxerto na qualidade tecnológica dos frutos, tendo o porta-enxerto SW como padrão de referência para comparação.

Em Barretos, a laranja Pera enxertada sobre os porta-enxertos H26, H110, H124, H137 e H139 apresentou maior peso dos frutos, superior a SW. Os maiores teores de sólidos solúveis (SS) foram observados em H26, H47, H73, H148, H150, H151, H299 e SW, as quais atendem ao padrão de SS proposto pelo CEAGESP (2011), ≥ 10 °Brix. O Ratio foi maior em H68, H73,

H128, H150, H151, H299, SB e SW, indicando maior equilíbrio entre açúcares e acidez em comparação com os demais (Figura 6).

O índice tecnológico (IT), foi maior para H26, H47, H73, H128, H137, H148, H151, H152, H299, SB e SW. Já o rendimento de suco foi mais alto em H18, H26, H47, H68, H73, H110, H128, H137, H151, H152, H299, SB e SW. A acidez variou de 0,49 a 0,66 entre os porta-enxertos, sem diferença significativa (Figura 5).

Em Gavião Peixoto, os porta-enxertos H47, H68, H70, H73, H110, H128, H137, H139, H151, H248 e H299 induziram maior peso médio dos frutos na laranja Pera superando SW e W2. Os níveis de acidez foram maiores para H26, H47, H68, H70, H124, H137, H139, H150, H151, H248, H299, SB e SW. Os teores de sólidos solúveis foram maiores para os porta-enxertos H26, H47, H68, H137, H150, H151 e SW. O Ratio foi mais elevado em SW, W2, H18, H47, H73, H128, H148, H150 e H152 (Figura 5 e 6). Os maiores valores de SS em Gavião Peixoto, possivelmente estão relacionados à colheita mais tardia dos frutos para o experimento.

O índice tecnológico (IT) foi maior para H26, H47, H137, H150 e SW. O rendimento de suco em Gavião Peixoto foi maior para SW, seguido de H18, H73, H124, H128, H137, H148, H150, H151, H152, H248, H299 e SB, superiores a 50%. De forma geral, os porta-enxertos H47, H73, H128, H137, H150, H151 apresentaram desempenho semelhante ao Swingle e proporcionaram melhores índices de qualidade de fruto, indicando potencial para substituição sem prejuízo da qualidade dos frutos.

De acordo com Pereira et al. (2006), a acidez deve estar entre 0,5 e 1,0%. Nesse contexto, a maioria dos porta-enxertos utilizados induziram valores de acidez dentro da faixa adequada. As combinações de porta-enxertos atenderam ao padrão brasileiro proposto pelo CEAGESP, que define $\text{Ratio} \geq 9,5$, mínimo de sólidos solúveis de 10 °Brix e rendimento de suco acima de 45 % (CEAGESP, 2011).

Esses resultados corroboram estudos anteriores com citrandarins por Schinor et al. (2013), que também observaram diferenças significativas de qualidade de fruto entre esses híbridos, em particular, o H137 se destacou tanto por desenvolvimento vegetativo reduzido, quanto por desempenho do fruto de laranja Pera.

Além disso, outros estudos têm indicado um alto potencial em IAC 1697 (SB). Devite et al. (2025) verificaram maior rendimento de suco em laranja Valência sobre IAC 1697, ultrapassando 52% em todas as estações do ano, o que demonstra seu potencial para extração otimizada de suco. As plantas em H18, H47, H68, H73, H110, H128, H137, H152, H299, SB e SW apresentaram rendimento de suco superior a 52% em Barretos e em Gavião Peixoto destacam-se H73, H124, H137, H150, H248 e SW.

Para Silva et al. (2025), a laranja doce Pera enxertada em porta-enxerto IAC 1697 também produziu consistentemente níveis de suco superiores a 50%. Em laranja Valência, observou-se que o IAC 1697 produziu frutos com menor peso e maior teor de sólidos solúveis e acidez, resultando em melhor rendimento de frutos (Girardi et al., 2021b).

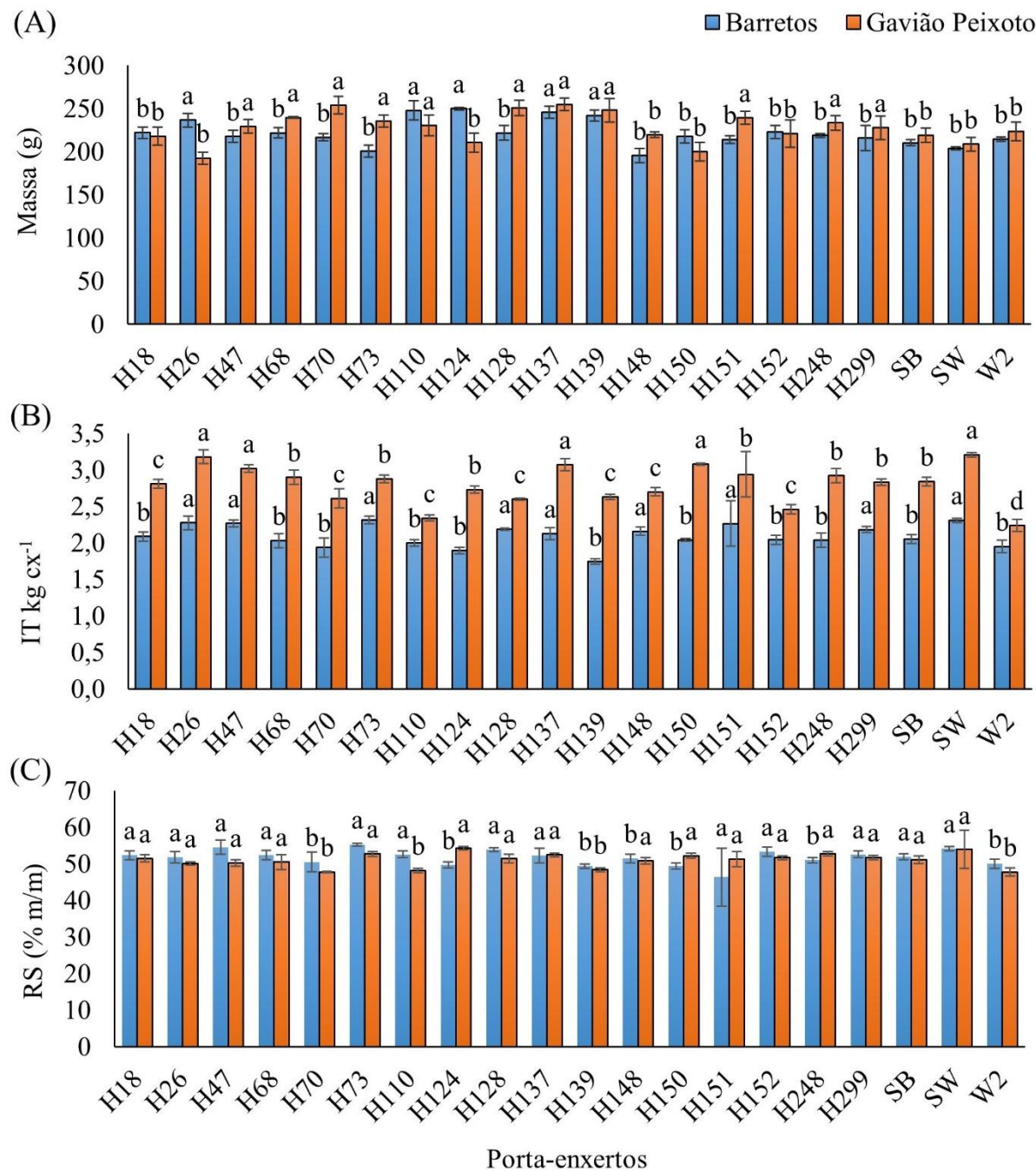


Figura 5. Massa (A), índice tecnológico (B) e rendimento do suco (C) de frutos de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos. Barretos e Gavião Peixoto-SP, 2024.

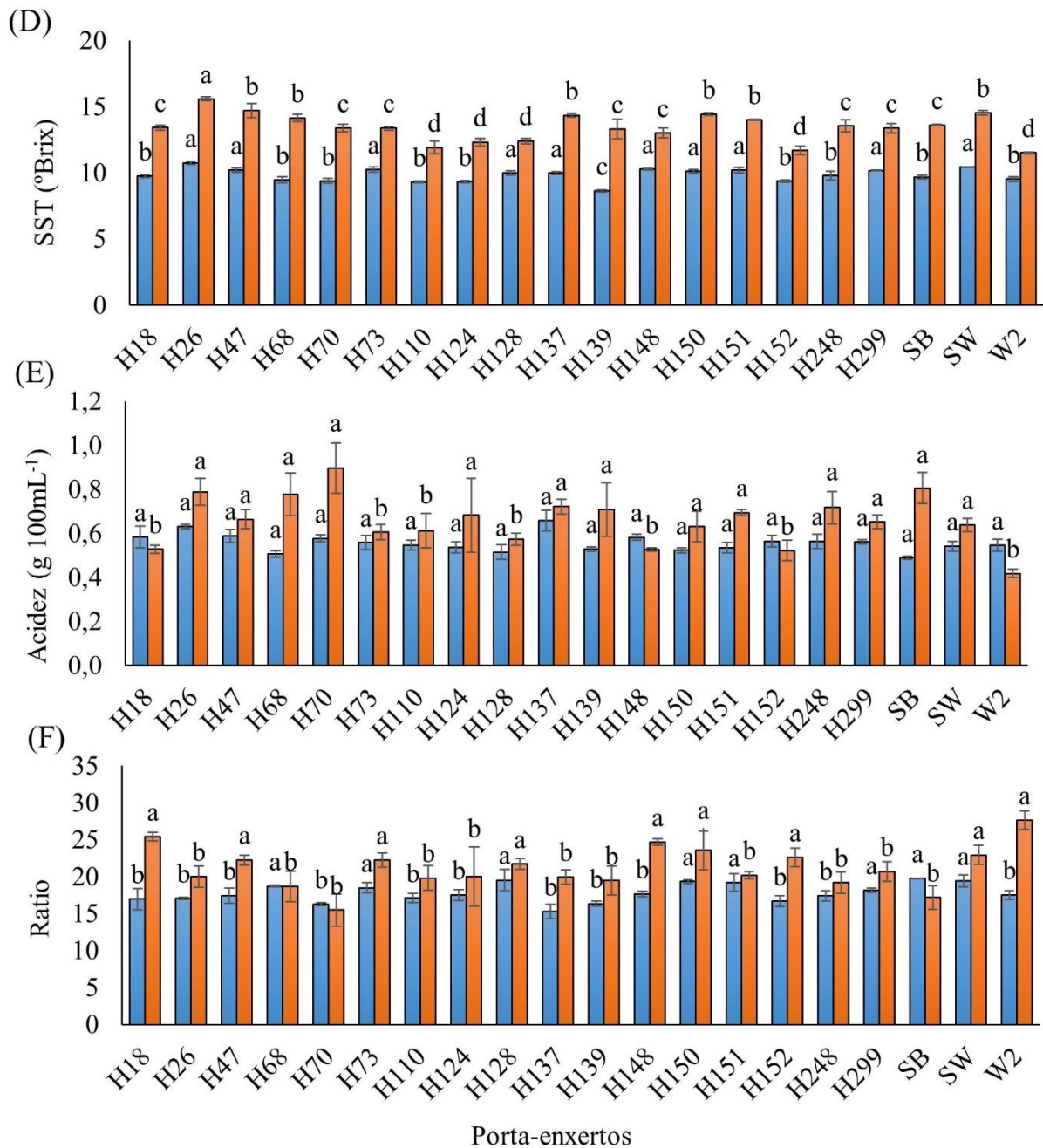


Figura 6. Sólidos solúveis totais (D), acidez titulável (E) e Ratio (F) de frutos de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos. Barretos e Gavião Peixoto-SP, 2024.

5.3 Tolerância à seca

Em Barretos, a laranja Pera sobre os híbridos H18, H70, H73, H110, H124, H139, H148, H150, H152, H248, H299 e SB apresentou maior tolerância à seca por avaliação visual, considerando a média de três anos de avaliação (Tabela 3), apresentando melhores notas de tolerância, com menor enrolamento foliar. Em Gavião Peixoto, a laranja Pera sobre H18, H70, H110, H124, H128, H152, H248, H299, SB e SW apresentaram melhores notas de enrolamento foliar, considerando a média de dois anos de avaliação.

De acordo com Schinor et al. (2013) notas de 1,0 a 1,3 caracterizam alta susceptibilidade, de 1,5 a 2,1 moderada susceptibilidade, enquanto notas entre 2,2 e 3 indicam tolerância à seca. No mesmo estudo, os citrandarins H152, H248 e H299 também apresentaram elevada tolerância à seca em laranja Pera.

O genitor feminino, *C. Sunki*, foi considerado mais tolerante, induzindo melhor nota em laranja Folha Murcha. Enquanto, o porta-enxerto *P. trifoliata* Flying Dragon induziu a menor resistência à seca (Cantuarias-Avilés et al., 2011). Em laranja Valência, a tangerina Sunki e alguns de seus híbridos induziram melhor tolerância à seca (Stuchi et al., 2000; Costa et al., 2021).

Em Barretos, no ano de 2024, as notas de enrolamento foliar foram menores, indicando maior estresse hídrico. Como pode ser visto na Figura 1, o ano de 2024 foi mais seco, com menor incidência de chuvas. Desde junho de 2023, o cinturão citrícola tem sido afetado pelo fenômeno El Niño, um dos cinco mais intensos já registrados, a combinação de altas temperaturas, elevadas taxas de evapotranspiração e um intenso déficit hídrico na região resultou em um baixo número de frutos por árvore (Fundecitrus, 2024).

Tabela 3. Tolerância à seca em laranja Pera sobre diferentes porta-enxertos (PE), avaliada por nota de enrolamento foliar. Em Barretos e Gavião Peixoto-SP.

PE	Barretos				Gavião Peixoto		
	2022	2024	2025	Média	2022	2025	Média
H18	1,33 b	2,67 a	2,33 a	2,11 a	2,33 a	2,33 a	2,33 a
H26	1,33 b	1,67 b	2,33 a	1,78 a	1,33 b	2,00 a	1,67 b
H47	2,00 a	1,00 b	2,00 a	1,67 a	1,67 b	2,00 a	1,83 b
H68	2,00 a	1,67 b	1,33 a	1,67 a	1,67 b	2,00 a	1,83 b
H70	2,33 a	1,67 b	2,00 a	2,00 a	2,67 a	2,00 a	2,33 a
H73	1,33 b	2,67 a	2,00 a	2,00 a	1,00 b	2,00 a	1,50 b
H110	2,67 a	1,33 b	2,33 a	2,11 a	2,67 a	2,00 a	2,33 a
H124	2,33 a	1,00 b	2,67 a	2,00 a	3,00 a	2,67 a	2,83 a
H128	1,67 b	1,67 b	2,00 a	1,78 a	2,33 a	2,33 a	2,33 a
H137	2,33 a	1,00 b	2,67 a	2,00 a	1,33 b	2,00 a	1,67 b
H139	2,00 a	2,33 a	1,67 a	2,00 a	1,67 b	2,00 a	1,83 b
H148	2,00 a	2,00 a	2,67 a	2,22 a	2,00 b	2,00 a	2,00 b
H150	2,00 a	2,00 a	2,33 a	2,11 a	2,00 b	1,67 a	1,83 b
H151	1,67 b	1,67 b	2,00 a	1,78 a	1,67 b	2,00 a	1,83 b
H152	2,33 a	2,00 a	2,00 a	2,11 a	2,67 a	2,33 a	2,50 a
H248	2,00 a	2,00 a	2,00 a	2,00 a	2,33 a	2,33 a	2,33 a
H299	2,00 a	2,00 a	2,00 a	2,00 a	2,00 b	2,33 a	2,17 a
IAC 1697	2,00 a	2,00 a	2,00 a	2,00 a	2,67 a	2,00 a	2,33 a
SW	1,67 b	2,00 a	2,00 a	1,89 a	2,33 a	2,33 a	2,33 a
W2	2,00 a	1,33 b	2,00 a	1,78 a	1,67 b	2,33 a	2,00 b
CV%	23,01				21,57		

Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$)

Em relação ao potencial hídrico foliar, os híbridos H152 e H110 apresentaram melhores valores, seguidos de H137, H248, H151, H148, H150, H70 e IAC 1697 (SB). Por outro lado, os porta-enxertos W2, H47, SW, H299 e H124 induziram valores mais negativos. Esses resultados indicam maior capacidade de manutenção do estado hídrico foliar nos primeiros porta-enxertos (Figura 7). Apesar de ser amplamente utilizado na citricultura, o citrumelo Swingle (SW) é uma variedade pouco tolerante à seca. Esse fato torna a citricultura vulnerável a esse tipo de evento climático (Pompeu Junior et al., 2022).

Considerando as localidades, em Barretos (maior déficit hídrico), as plantas em H68, H110, H137, H148, H150, H151, H152, H248, IAC 1697 (SB) e SW tiveram melhores valores de potencial hídrico. Em Gavião Peixoto as plantas em H70, H110, H152 foram melhores, seguidas de H18, H73, H124, H137, H151 e H299 (Tabela S7). De Souza et al. (2025), observaram como o citrandarin H152 influenciou positivamente o potencial hídrico em lima ácida Tahiti em condições de déficit hídrico. Nesse estudo o híbrido H152 manteve bom desempenho em ambas as localidades.

De modo geral, Gavião Peixoto apresentou clima mais ameno (-1,47MPa), onde as plantas apresentaram maior tolerância à seca, enquanto Barretos apresentou valores mais negativos (-1,57MPa), indicando condições mais severas de seca (Figura 7C). Esses resultados são consistentes com os dados de umidade do solo, visto que o experimento em Gavião Peixoto apresentou maior média de umidade (7% e 23,8%), enquanto Barretos apresentou menor média de umidade do solo (2% e 16,4%), em 2022 e 2025 respectivamente, demonstrando que o experimento estava sob maior estresse hídrico nesse local.

Conforme proposto por Devite et al. (2025), citrandarins demonstram melhor resposta fisiológica devido ao ajuste osmótico e regulação estomática aprimorados, em comparação com citrumelo Swingle, corroborando com os dados obtidos aqui. Resultados semelhantes foram observados em outros híbridos de *C. sunki* e *P. trifoliata* por Fadel et al. (2018), onde verificaram que a combinação envolvendo a laranja Valência sob tangerina Sunki $\times$ *P. trifoliata* ‘English’ não diferiu da laranja Valência enxertada em limão Cravo ‘Santa Cruz’, ambas com tolerância satisfatória à seca.

Além disso, alguns genótipos citrandarins, como Bitters e Furr (*C. sunki* $\times$ *P. trifoliata*), exibem estratégias morfológicas de aumento da área foliar e comprimento de raiz, voltada para a redução do consumo de água em condições de seca, podendo ser considerados porta-enxertos tolerantes enquanto o porta-enxertos Swingle mostrou-se mais sensível ao estresse hídrico (Modica et al., 2025). Para Morade et al. (2025), o estresse hídrico reduz o conteúdo de água

nos tecidos, o que afeta a morfologia da planta, o desenvolvimento das raízes e os processos físico-bioquímicos. Nessas condições, o número de folhas pode ser reduzido drasticamente. Para esses autores o híbrido X639 (*C. reshni* Hort ex Tan $\times$ *P. trifoliata* L. Raf.) demonstrou desempenho superior sob condições de estresse hídrico, mantendo o maior teor relativo de água e também se destacou nos parâmetros morfológicos da raiz e aumento do número de folhas com a reidratação.

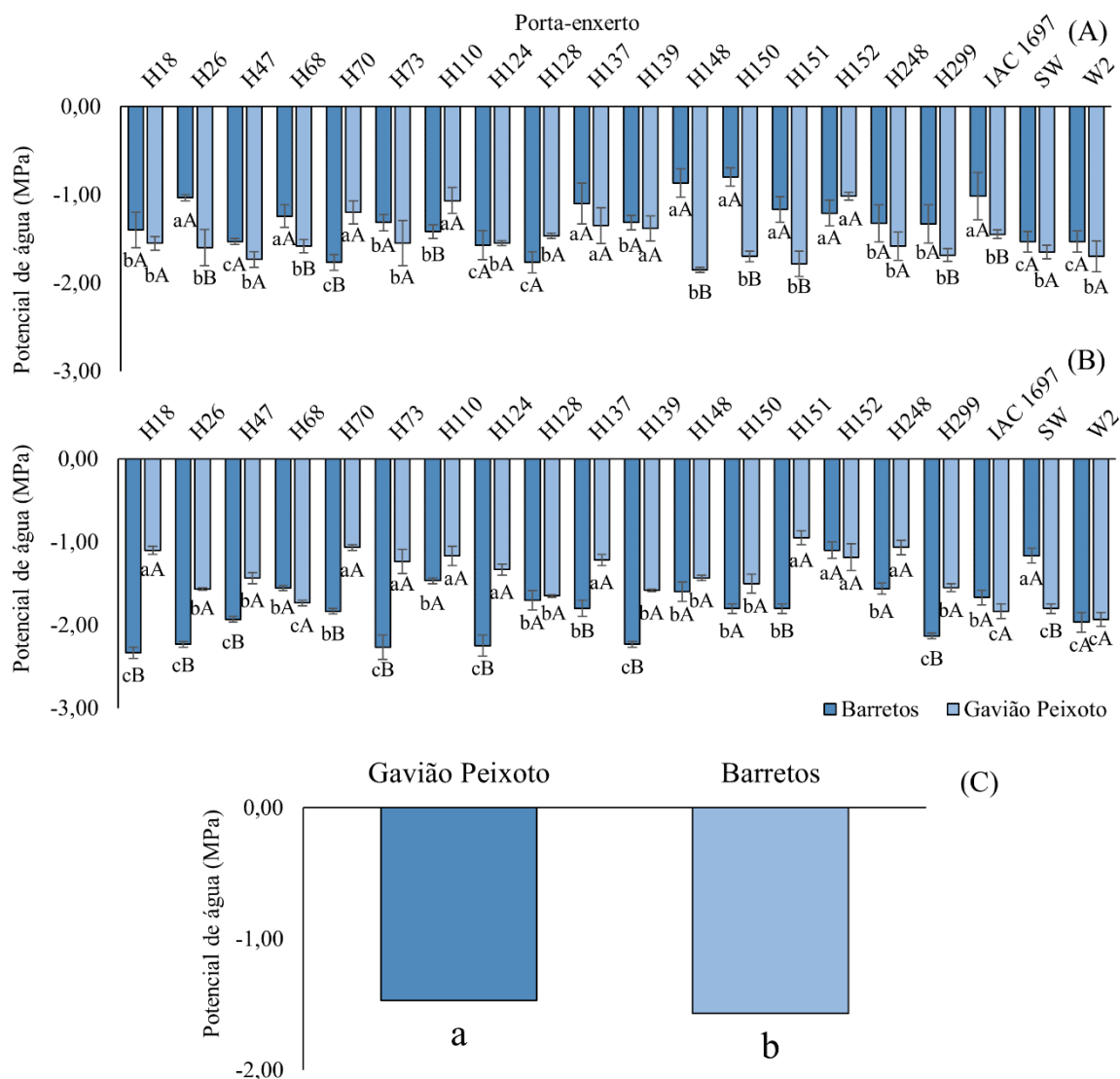


Figura 7. Potencial de água (MPa) na folha de laranja Pera em 20 porta-enxertos: (A) 2022, (B) 2025 e (C) Média de potencial hídrico da cidade. Em Gavião Peixoto e Barretos. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre porta-enxerto e maiúscula no mesmo porta-enxerto entre cidades, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$).

Nesse contexto, o fechamento dos estômatos é a primeira linha de defesa da planta contra a deficiência hídrica do solo, pois este mecanismo reduz a perda de água por transpiração, entretanto, limita a assimilação de CO_2 , por meio do processo fotossintético. O

fechamento dos estômatos ocorre devido à desidratação das células-guarda, ou por resposta hormonal. Em citros, estudos demonstram que esse padrão de resposta ocorre de forma semelhante em diferentes porta-enxertos, como limoeiro Cravo e *P. trifoliata* ‘Rubidoux’ (Magalhaes et al., 2008).

5.4 Distribuição de raízes das plantas

A análise da massa seca e da área radicular demonstrou diferenças entre os porta-enxertos. De forma geral, as raízes dos porta-enxertos se encontram em maior concentração na camada mais superficial do solo, tanto para massa seca, como para área de raiz. Esses resultados indicam um padrão de distribuição radicular mais concentrado nas camadas superficiais do solo, o que pode estar relacionado à maior disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes nessas regiões (Figura 7 e Tabela 5).

Os porta-enxertos H152 (1931,75 g m⁻³) e SW (1651,64 g m⁻³) apresentaram maiores concentrações de massa seca enquanto o ananicante H26, apresentou a menor concentração (103,52 g m⁻³), diferindo deles. Os demais não diferem entre si. Para área radicular o H152 também difere em maior área (23947,07 cm²m⁻³), seguido por W2, SW e 124. Por outro lado, o H26 apresentou a menor área (882,88 cm²m⁻³), sendo estatisticamente inferior (Tabela 5).

Tabela 4. Massa seca (g m⁻³) e área radicular (cm²m⁻³) de diferentes porta-enxertos e profundidades de solo.

Porta-enxertos	Massa seca g m ⁻³	Área radicular cm ² m ⁻³
H26	103,52 b	882,88 c
H68	1235,78 ab	10984,35 abc
H73	389,92 ab	3410,47 bc
H110	469,19 ab	5022,68 abc
H124	767,31 ab	6504,98 abc
H128	997,20 ab	12283,58 abc
H137	953,08 ab	6481,36 abc
H152	1931,75 a	23947,07 a
SW	1651,64 a	19196,04 ab
W2	1741,78 ab	20799,40 ab
CV %	46,64%	44,56%

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05). Os valores de grama de raiz por metro cúbico de solo foram transformados usando raiz quadrada (sqrt(y)). Os valores de área de raiz por m³ de solo foram transformados com log(y+1).

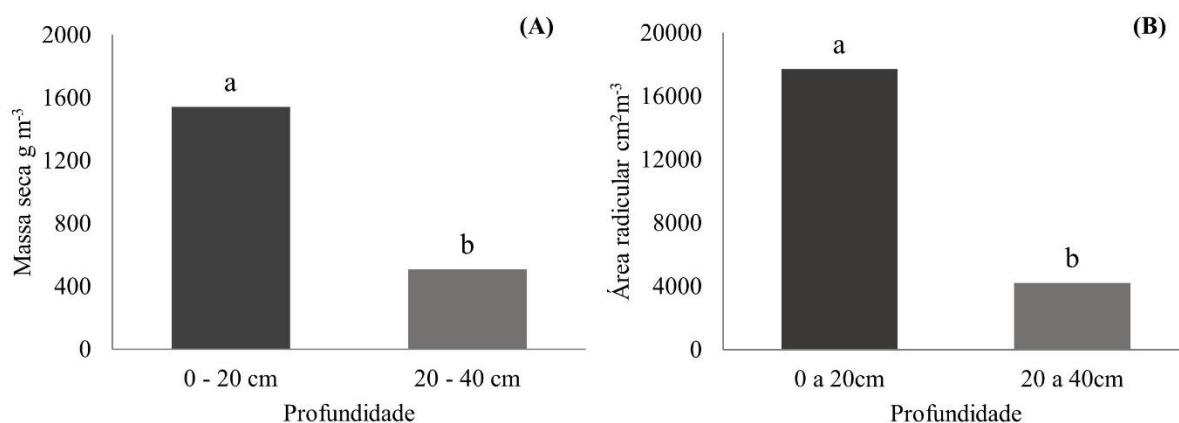


Figura 8. Massa seca de raiz em g m⁻³ (A) e área radicular em cm² m⁻³ (B), de porta-enxertos, em duas profundidades. Barretos – SP.

No geral, o sistema radicular dos citros se concentra na superfície do solo. Moreira (1983), verificou que 60% das raízes de plantas de sete anos de laranja Pera se encontravam a 30 cm de profundidade, e 73% até 60 cm. De forma semelhante, Alves Júnior et al. (2004) observaram que plantas jovens de lima ácida Tahiti sob irrigação de gotejamento apresentaram raízes concentradas na camada de 0 a 30 cm de profundidade e a uma distância de 60 cm do caule lateralmente. Além disso, também constataram que o déficit hídrico pode induzir o crescimento horizontal das raízes.

Entretanto, a maior profundidade radicular permite a exploração de maior volume do solo, especialmente em camadas mais profundas, onde ainda pode existir água disponível, em caso de déficit hídrico essa característica pode ser decisiva para a produção de frutos (Mazza et al., 1994).

Nesse contexto, Jones e Embleton (1973), destacam que tanto o número total de raízes quanto a profundidade da zona explorada pelo sistema radicular influenciam o crescimento e a produtividade das plantas. Segundo eles, há uma correlação positiva entre o peso das raízes nos primeiros 90 cm do solo e a produção.

O porte das plantas também está relacionado às características do sistema radicular. Porta-enxertos ananizantes possuem sistemas radiculares menores e por consequência, as raízes absorvem menos água e nutrientes do solo (Hayat et al., 2022). Em um estudo com *Citrus clementina* enxertada em citrumelo Swingle, as plantas apresentaram maior vigor vegetativo, maior biomassa total, sistemas radiculares mais extensos e maior área de xilema condutor, enquanto, *C. clementina* em trifoliata Flying Dragon apresentaram crescimento reduzido, menor diâmetro do tronco, menor acúmulo de biomassa e maior resistência hidráulica tanto na

raiz quanto na região da enxertia, o que consiste com seu comportamento ananicante (Dattola e Gullo, 2025).

Alterações na morfologia radicular também são observadas sob condições de deficiência hídrica. Em raízes de *P. trifoliata*, a massa seca foi reduzida, mas houve aumento no comprimento das raízes, sugerindo a formação de raízes mais finas sob estresse hídrico (Magalhaes et al., 2008). Da mesma forma, o porta-enxerto híbrido de trifoliata X639, manteve um maior balanço hídrico mesmo sob estresse, o que foi atribuído ao seu extenso sistema radicular que manteve seu metabolismo funcional (Morade et al., 2025).

Estudos recentes indicam que, sob condições de estresse hídrico, porta-enxertos como o Swingle podem apresentar redução na massa radicular e alterações na arquitetura do sistema radicular, refletindo em sua adaptação à limitação hídrica. Modica et al. (2025), verificaram que SW e outros porta-enxertos apresentaram a maior redução no comprimento das raízes durante estresse hídrico.

5.5 Análise da anatomia de raízes

As raízes do citrandarin H26 apresentaram vasos de xilema de maior diâmetro, seguidas de H124 e H128. Em relação à quantidade de vasos, os porta-enxertos H26, seguido de H68 e H128 apresentaram maior frequência (número) de vasos de xilema, enquanto SW, W2 e H73 apresentaram menor frequência (Figura 9). Entretanto, observa-se que o citrandarin H26, apesar de apresentar maiores diâmetros e frequência de vasos, é classificado como ananicante, sugerindo que essas características anatômicas, não explicam o vigor vegetativo.

Apesar da menor frequência de vasos, o porta-enxerto H73 não diferiu do SW, porta-enxerto padrão comercial mais utilizado na citricultura atualmente (Fundecitrus, 2025b), enquanto os demais apresentaram valores superiores ao padrão.

Normalmente, a capacidade de nanismo dos porta-enxertos tem sido associada a vasos estreitos, como ocorre na cerejeira (Olmstead et al. 2006; Gonçalves et al. 2007). Martínez-Alcántara et al. (2013) observaram em citros que características anatômicas do xilema dos porta-enxertos influenciam sua condutância hidráulica e o potencial de crescimento das copas.

Para Martínez-Alcántara et al. (2013), embora os porta-enxertos Flying Dragon (FD) e ‘Rubidoux’ apresentem distribuição semelhante dos diâmetros dos vasos do xilema, FD tem menor densidade de vasos, limitando o transporte de água. Essa baixa condutância hidráulica em ‘D pode causar fechamento estomático, reduzindo a assimilação de CO₂ e a produção de biomassa. A limitação no transporte de carboidratos pode impactar negativamente o desenvolvimento radicular e a eficiência de rendimento.

Enquanto para Rodríguez-Gamir et al. (2010) o *P. trifoliata* e FA-13 apresentaram vasos xilemáticos mais largos (maior diâmetro) nas raízes do que tangerina Cleópatra e FA-5, para esses autores, vasos xilemáticos maiores nos porta-enxertos pareceram estar relacionados a uma maior condutância hidráulica nas raízes.

Além disso, raízes do citrumelo Swingle apresentaram diâmetros de vasos menores e maior número de vasos por área (frequência de vasos) quando comparados com o limão Cravo e à laranja-doce Valência, o que poderia estar potencialmente associado a maior resistência ao embolismo (Miranda et al., 2022).

Para Saeed et al. (2010), a altura da planta apresentou correlação negativa com o número de elementos de vaso no xilema do caule e da raiz. No entanto, o porta-enxerto vigoroso limão Cravo apresentou elementos de vaso de maior diâmetro no xilema, comparado com o porta-enxerto menos vigoroso FD, enquanto os porta-enxertos menos vigorosos apresentaram elementos de vaso menores no xilema do caule e da raiz.

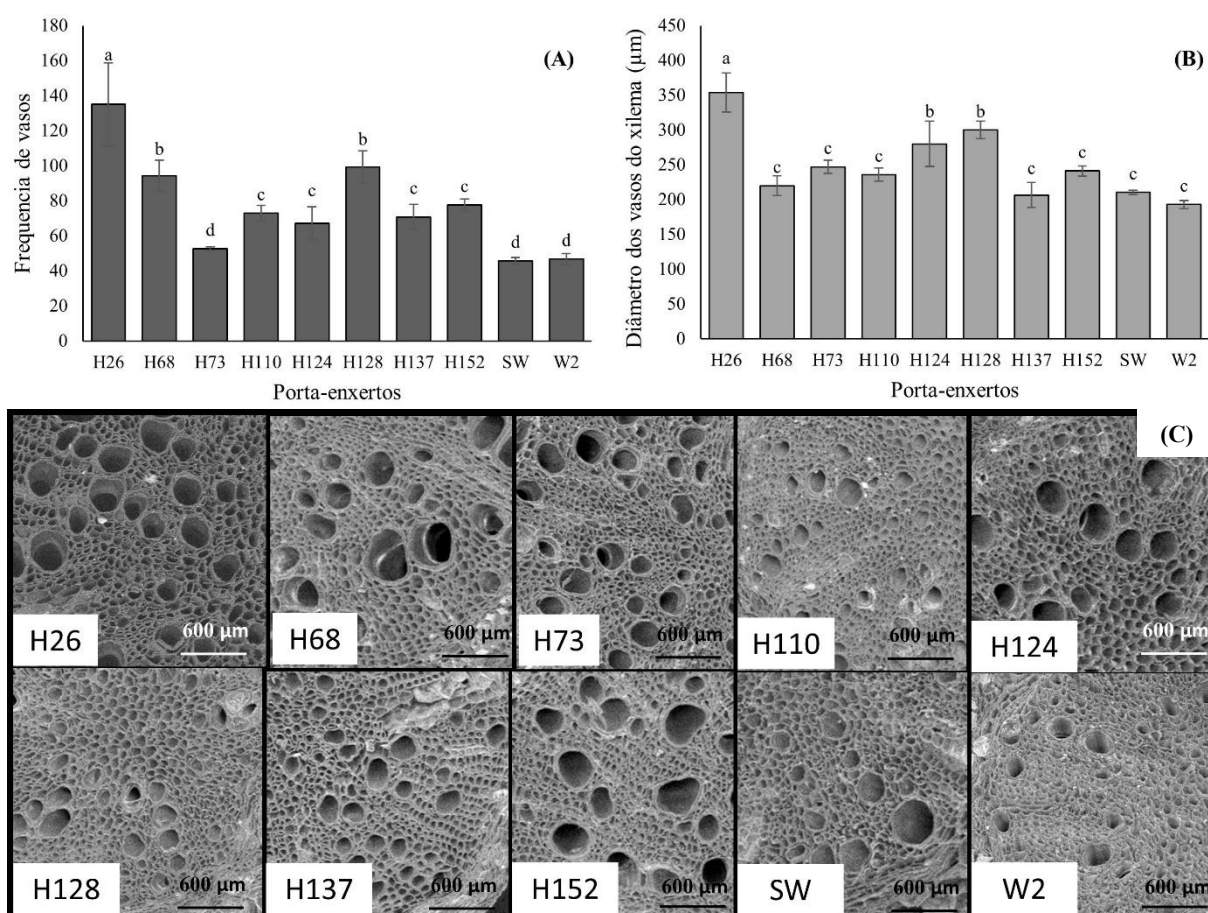


Figura 9. Características anatômicas do xilema radicular de porta-enxertos citrandarins: (A) Frequência de elementos de vasos do xilema e (B) Diâmetro médio de vasos do xilema (µm) em raízes de 10 porta-enxertos citrandarins em Barretos-SP, 2023. E (C) microscopia eletrônica de varredura de raízes de 10 porta-enxertos sob aumento de 150x 300 µm.

5.6 Análise de componentes principais (ACP)

5.6.1. Análise de componentes principais de laranja Pera sobre 20 porta-enxertos

A análise de componentes principais das variáveis analisadas em Barretos-SP, correlacionou características de tamanho, como volume induzido a copa laranja Pera, produtividade e tolerância ao déficit hídrico. Os componentes principais 1 e 2 compuseram a maior parte da variância neste estudo (59,1%). Portanto, suas relações resultam na maioria dos efeitos (Figura 10).

O componente principal 1 (37,5%) separou volume de copa (CV) e tolerância à seca (DS) das demais variáveis, principalmente eficiência produtiva (PE) e produtividade (Y). Enquanto o componente principal 2 (21,6%) separou índice tecnológico (TI) e eficiência produtiva de produtividade e potencial hídrico (WP).

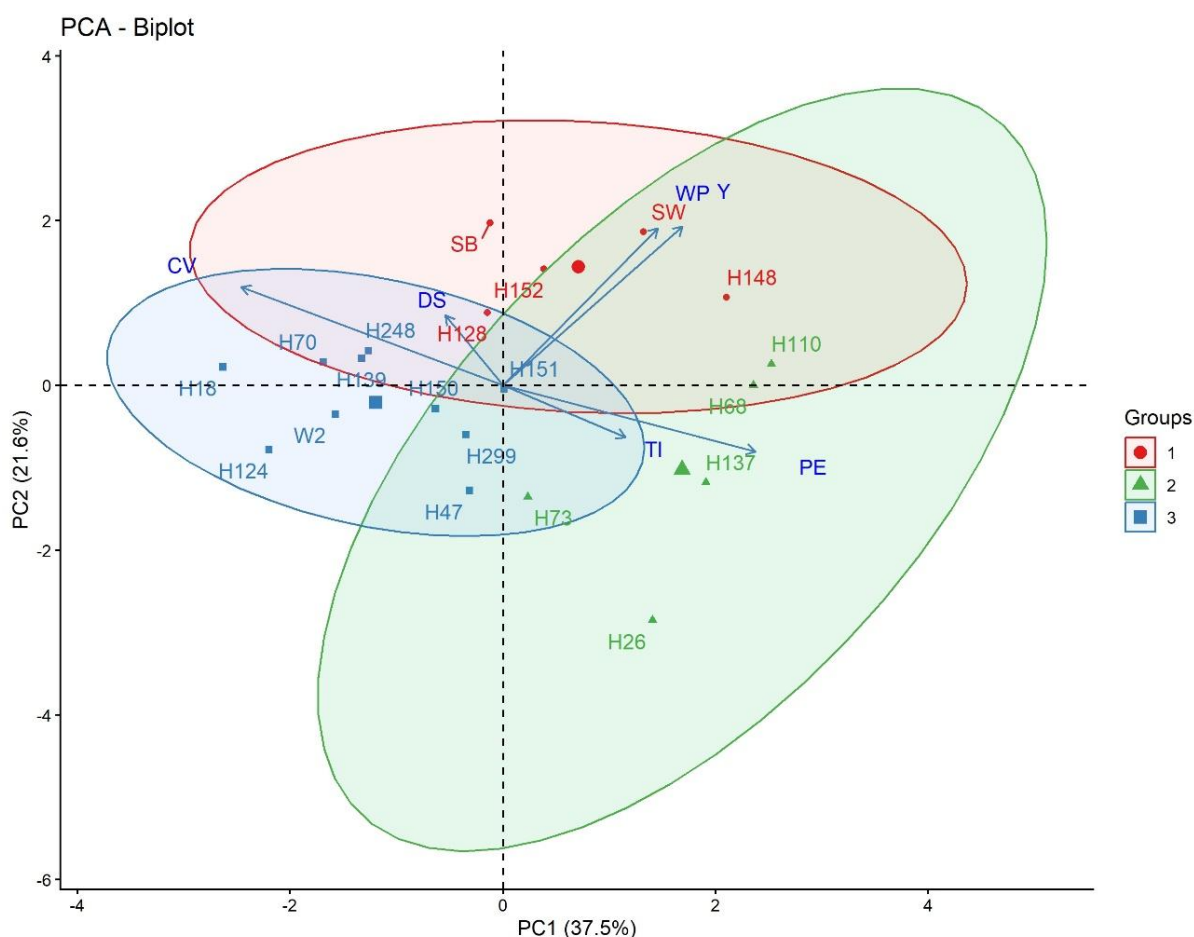


Figura 10. Biplot dos componentes principais para laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos em Barretos-SP. Variáveis: produtividade $t\ ha^{-1}$ (Y), índice tecnológico (TI), eficiência produtiva (PE), potencial hídrico (WP), tolerância seca (DS) e volume de copa (CV).

De forma geral, a análise aponta que os porta-enxertos mais ananizantes (H110, H137, H68, 26) estão contrários ao volume de copa, mas apresentam maior eficiência produtiva e índice tecnológico. No entanto, o maior volume de copa parece estar associado a uma maior tolerância à seca, avaliada por notas visuais de enrolamento foliar.

O cluster 1 se relaciona ao potencial hídrico, tolerância à seca e produtividade, separando SW, SB, H152, H128 e H148, no entanto sobrepõe com os clusters 2 e 3, os porta-enxertos H110, H151, H248 e H70. O cluster 2 identifica os porta-enxertos com menor volume de copa, mas melhores características produtivas. Enquanto o cluster 3 demarca os porta-enxertos mais vigorosos, mas indutores de maior tolerância à seca.

Em Gavião Peixoto-SP, os componentes principais 1 e 2 compuseram a maior parte da variância neste estudo (63,8%). Portanto, suas relações resultam na maioria dos efeitos. O componente principal 1 (42%) separou volume de copa e tolerância à seca das variáveis, eficiência produtiva e índice tecnológico. Enquanto o componente principal 2 (21,8%) separou potencial hídrico e tolerância à seca, de produtividade (Figura 11).

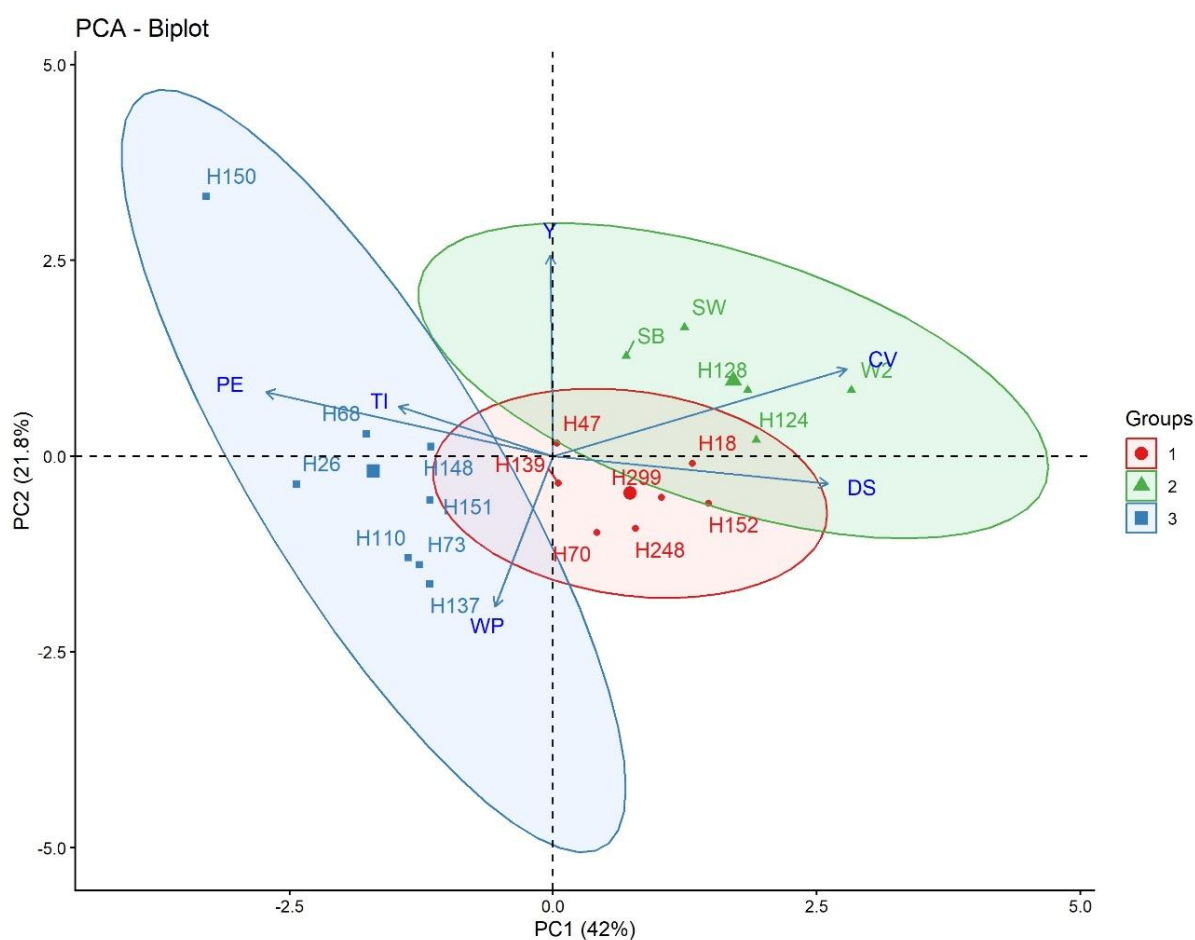


Figura 11. Biplot dos componentes principais para laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos em Gavião Peixoto-SP. Variáveis: produtividade $t\ ha^{-1}$ (Y), índice tecnológico (TI), eficiência produtiva (PE), potencial hídrico (WP), tolerância seca (DS) e volume de copa (CV).

Da mesma forma, os porta-enxertos contrários à volume de copa apresentam maior eficiência produtiva e índice tecnológico. E o maior volume de copa está associado à uma maior tolerância à seca.

A formação de clusters separou em três grupos. O cluster 1 está próximo ao eixo e a tolerância à seca, separando os porta-enxertos com características mais intermediárias (H47, H18, H299, H152, H248, H70 e H139). O cluster 2 separa os porta-enxertos que induzem maior vigor e tolerância à seca. Enquanto o cluster 3 separa aqueles que induzem menor vigor vegetativo e maior eficiência produtiva.

Porta-enxertos ananícantes, como o Flying Dragon, tendem a ser suscetíveis ao estresse hídrico (Stuchi et al., 2003). Visto que têm pouca capacidade de transportar água do solo para a variedade copa, devido a uma menor condutividade hidráulica (Forner-Giner et al., 2014). Essa menor condutividade hidráulica resulta no fechamento dos estômatos e na diminuição da taxa de assimilação de CO₂, limitando o crescimento do enxerto na maioria dos porta-enxertos ananícantes (Hayat et al., 2021).

Dessa forma, a maioria dos porta-enxertos ananícantes são sensíveis à seca, no entanto, podem apresentar alto potencial de rendimento em pomares de alta densidade, a fim de competir com porta-enxertos vigorosos em espaçamentos maiores entre as árvores (Costa et al., 2021).

Dessa forma, pode-se inferir que a influência dos porta-enxertos no crescimento da copa e os mecanismos de nanismo são induzidos por múltiplos fatores, como sinalização hormonal, fotossíntese, transporte de minerais, relações hídricas, características anatômicas e marcadores genéticos (Hayat et al., 2021).

As diferenças observadas entre as localidades podem estar associadas às condições locais de clima e solo. Barretos apresentou temperaturas ligeiramente superiores às de Gavião Peixoto, mas com menor índice de chuvas, principalmente em 2024 (Figura 1). Temperaturas mais altas podem ter estimulado o metabolismo vegetal, levando um maior crescimento vegetativo, no entanto, podem causar maior déficit hídrico nas plantas em Barretos.

A temperatura influencia as reações bioquímicas da fotossíntese, que dobram de velocidade a cada aumento de 10°C entre 12°C e 30°C (Medina et al., 2005). Ou seja, sob temperaturas quentes e umidade, há atividade fotossintética intensa e fluxos reprodutivo e vegetativo. No entanto nos períodos de baixa temperatura e disponibilidade hídrica, há redução da fotossíntese e paralisação aparente do crescimento (Machado et al., 2002).

Além do clima, o tipo de solo influencia na taxa de infiltração de água e na condutividade hidráulica do solo, sendo maiores no Latossolo Vermelho Distrófico do que no

Latossolo Vermelho Distroférrico. A movimentação vertical da água tende a ser reduzida em Latossolo Vermelho Distroférrico (Silva et al., 2009).

A taxa de fluxo de água nos solos depende da condutividade hidráulica do solo. A condutividade hidráulica do solo é uma medida da facilidade com que a água se move pelo solo; ela varia com o tipo de solo e com seu conteúdo de água. Solos arenosos, que possuem grandes espaços entre as partículas, têm alta condutividade hidráulica quando saturados, enquanto solos argilosos, com somente diminutos espaços entre suas partículas, têm condutividade hidráulica visivelmente menor (Taiz e Zaiger, 2017).

5.6.2. Componentes principais integrando características radiculares e desempenho agrônômico de laranja Pera sobre 10 porta-enxertos.

A análise de componentes principais em Barretos-SP (Figura 12), correlaciona as variáveis relacionadas a distribuição e anatomia de raízes, volume induzido a copa laranja Pera, produtividade e tolerância ao déficit hídrico. Os componentes principais 1 e 2 compuseram a maior parte da variância neste estudo (66,4%). Foram utilizados 10 porta-enxertos, descritos nos itens 5.4 e 5.5, para a análise.

O componente principal 1 (46,4%) separou as características relacionadas a anatomia radicular de volume de raiz. Enquanto o componente principal 2 (20%) separou volume de copa de produtividade. Os porta-enxertos mais vigorosos apresentam maior volume de copa e massa radicular. Demonstrando que o crescimento radicular está positivamente relacionado ao tamanho da árvore.

Os porta-enxertos H68, H152, H110, H137 e SW apresentam forte correlação positiva com tolerância à seca e produtividade, enquanto o citrumelo W2 apresenta maior correlação com volume de copa e massa de raízes. O citrandarin H26 apresenta uma forte correlação com diâmetro e frequência de vasos do xilema radicular e menor associação com volume de copa e de raízes, por ser ananicante.

Como visto anteriormente, vasos xilemáticos de maior diâmetro já foram encontrados em variedades menos vigorosas (Rodríguez-Gamir et al., 2010). Além disso, a altura da planta pode apresentar correlação negativa com o número de elementos de vaso no xilema da raiz (Saeed et al., 2010).

O porte das plantas também está relacionado às características do sistema radicular. Porta-enxertos ananicantes possuem sistemas radiculares menores e por consequência, as raízes absorvem menos água e nutrientes do solo (Hayat et al., 2022). Enquanto, porta-enxertos mais vigorosos, como *C. Sunki*, são considerados mais tolerante (Cantuarias-Avilés et al., 2011).

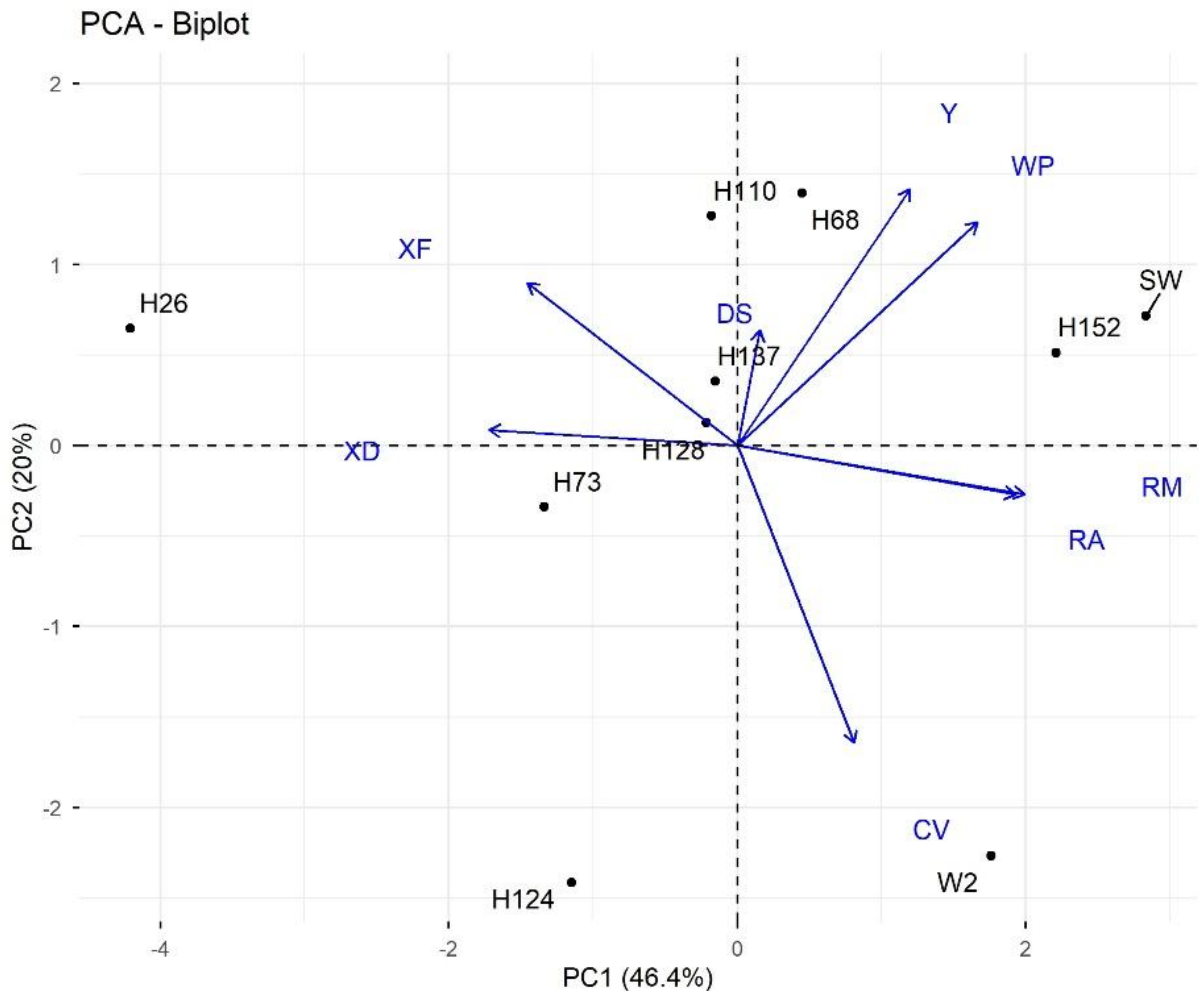


Figura 12. Biplot dos componentes principais para laranja Pera enxertada em 10 porta-enxertos em Barreto-SP. Variáveis: produtividade $t\ ha^{-1}$ (Y), potencial hídrico (WP), tolerância seca (DS), volume de copa (CV), massa de raiz (RM) área radicular (RA), diâmetro dos vasos xilemáticos da raiz (XD) e frequência de vasos xilemáticos na raiz (XF).

5.7 Seleção de marcadores moleculares DArTseq associados à resistência à seca e ao porte induzido à variedade copa

Para a característica de tolerância ao déficit hídrico, os híbridos H18, H73, H139, H148, H150, H152, H248 e H299, tiveram melhores valores de tolerância, enquanto H26, H68, H70, H128, H151, H110, H47, H124 e H137 apresentaram valores mais negativos, sendo selecionados para realização dos bulks tolerante e suscetível respectivamente. Dentre 27.960 marcadores DArTseq, foi possível identificar 12 marcadores por Bulk Segregant Analysis (BSA) *in silico* (Tabela 5) pelo teste de Fisher.

Em relação ao porte induzido à copa, primeiramente foi realizado a seleção de marcadores significativos pelo teste de Fisher, para as características separadas: altura, diâmetro

e volume da copa. A seleção de marcadores identificou 368 marcadores para altura, 259 para diâmetro e 380 para volume de copa. Destes marcadores, sete (7) foram comuns para as três características utilizando o diagrama de Venn (Figura 13).

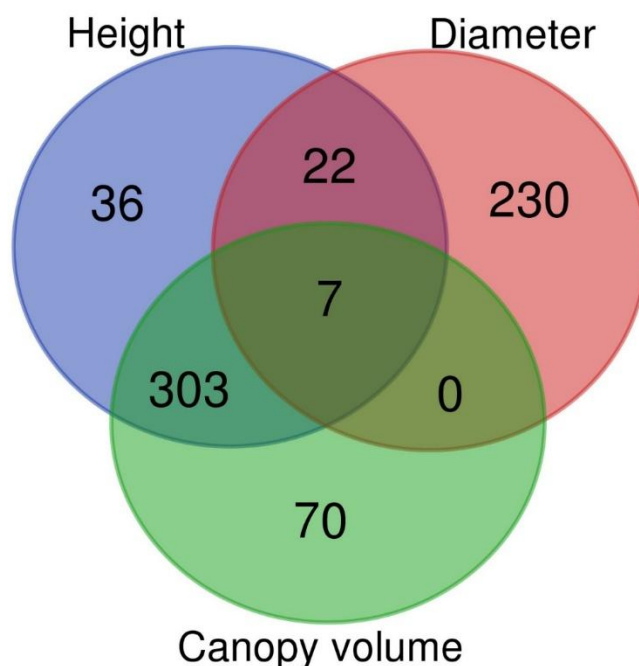


Figura 13. Diagrama de Venn dos marcadores moleculares DArTseq associados à altura, diâmetro e volume de copa induzido.

5.8. Anotação funcional

Das 12 sequências de marcadores moleculares significativas para tolerância à seca, sete se alinharam com sequências de genes no banco de dados NCBI de *C. sinensis* e todas as sequências apresentaram identidade $\geq 89\%$ (Tabela 5). O marcador 100044107|F|0 apresentou várias cópias no genoma, portanto não foi considerado específico e não foi utilizado para anotação.

Das sete sequências de marcadores moleculares significativas para porte ananicante, seis se alinharam com sequências de genes no banco de dados NCBI de *C. sinensis* e todas as sequências apresentaram identidade $\geq 91\%$ (Tabela 5). O marcador 100010962|F|0 se alinhou em mais de um ponto do genoma de *C. sinensis*, apenas as sequências que continham genes foram anotadas.

Tabela 5. Marcadores moleculares DArTseq alinhados ao genoma de referência de *Citrus sinensis* (assembly DVS_A1.0) do banco de dados do NCBI.

DArTseq	Chromosome location	Hit location	Direção	Score	Identidade %	Gene ID
Marcadores putativamente associados a tolerância à seca						
100026369 F 0	Chr3 NC_068558.1	10.666M	forward	84	97	LOC112498199
100019255 F 0	Chr4 NC_068559.1	26.612M	reverse	129	100	LOC102621883
100010748 F 0	Chr9 NC_068564.1	7,550.7K	reverse	86	100	LOC102610219
100023347 F 0	Chr2 NC_068557.1	3,400.5K	reverse	97	92	LOC112497242
100046832 F 0	Chr7 NC_068562.1	1,231.9K	reverse	117	97	LOC107178890
100044107 F 0	Chr1 NC_068564.1	2,997.8K	forward	75	95	KPL70_000629
100044107 F 0	Chr9 NC_068564.1	6,987,0K	forward	53	100	LOC102617533
100023207 F 0	Chr9 NC_068564.1	31,002M	reverse	90	89	KPL70_027387
Marcadores putativamente associados ao porte ananicante						
100033871 F 0	Chr2 NC_068557.1	25.234M	forward	77	100	LOC127900450
100009554 F 0	Chr3 NC_068558.1	31.646M	reverse	81	90	LOC127898710
100010962 F 0	Chr3 NC_068558.1	28.886M	reverse	129	100	KPL70_007989
100010962 F 0	Chr3 NC_068558.1	28.991M	reverse	119	98	LOC112496823
100010962 F 0	Chr3 NC_068558.1	28.487M	reverse	106	94	LOC107175105
100010962 F 0	Chr3 NC_068558.1	28.672M	reverse	95	91	LOC107175243
100048650 F 0	Chr3 NC_068558.1	16.190M	forward	53	100	LOC102619505
100053083 F 0	Chr2 NC_068557.1	25.234M	forward	77	100	LOC127900450
100021565 F 0	Chr3 NC_068558.1	41.749M	reverse	103	95	KPL70_009179

As sequências genicas obtidas do genoma de *C. sinensis* foram submetidas ao BLASTx no programa Blast2GO utilizando o banco nr do NCBI, com filtro taxonômico para Viridiplantae, analisadas no InterProScan, e geraram termos GO na etapa de *mapping* (Tabela 6 e 7 e Tabela S8). A maioria dos hits no BLAST foi contra *C. sinensis*, seguido por outras espécies de *Citrus* como *C. aurantifolia*, *C. unshiu* e *C. clementina* e poucos hits em espécies mais distantes (Figura 14).

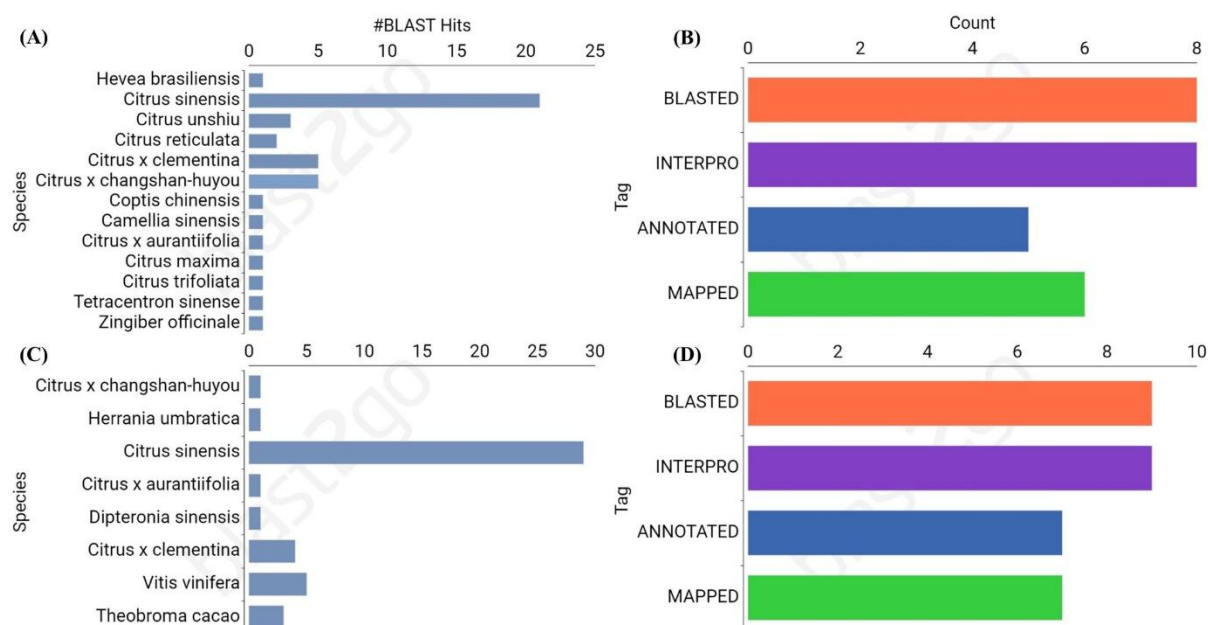


Figura 14. Anotação funcional dos marcadores candidatos DArTseq. (A) distribuição de espécies correspondentes as sequências associadas à tolerância à seca; (B) distribuição de Hits dos marcadores associados à tolerância à seca; (C) distribuição de espécies correspondentes as sequências associadas a redução de vigor e (D) distribuição de Hits dos marcadores associados a redução de vigor.

5.8.1. Marcadores putativamente associados à tolerância à seca

De modo geral, o *C. sunki* tem sido relacionada a uma maior adaptação a falta de água. Estudos em seleções de *C. sunki* têm demonstrado potencial de tolerância à seca, como a ‘Sunki Tropical’ e a ‘Sunki Maravilha’ (Neves et al., 2013; Santana-Vieira et al., 2016; Sousa et al, 2022). Dessa forma, podemos inferir que os marcadores identificados nesse estudo podem estar relacionados a mecanismos genéticos envolvidos na tolerância ao déficit hídrico (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da anotação funcional de genes putativamente relacionados à tolerância à seca em citrandarins.

Marcadores DArTseq associados	Descrição	Length	e-Value	Sim mean %
Marcadores Putativamente associados à tolerância à seca				
100026369 F 0	protein kinase domain-containing protein	12442	0.0	95.29
100019255 F 0	polygalacturonase At1g48100	4547	8,86E-87	99.75
100010748 F 0	putative disease resistance protein RGA3	5928	0.0	99.88
100023347 F 0	Receptor-like protein 33	3234	0.0	99.68
100046832 F 0	S-locus F-box protein	1125	0.0	94.76
100023207 F 0	Uncharacterized vacuolar membrane protein YML018C isoform X1	2096	7,26E-60	53.91

A anotação funcional do gene colocalizado ao marcador 100026369|F|0 revelou uma anotação para uma proteína quinase. As proteínas quinases são enzimas que fosforilam outras proteínas utilizando o ATP. Existem vários tipos de quinases que são ativas em diferentes fases do ciclo celular. No geral, as quinases atuam na transdução de sinais relacionados ao crescimento, desenvolvimento e resposta a estímulos (Taiz e Zaiger, 2017). A fosforilação/desfosforilação de proteínas são eventos de sinalização importantes induzidos pelo estresse osmótico em plantas superiores. A proteína quinase 2 relacionada ao SNF1 (SnRK2), SRK2C, é uma proteína quinase ativada por estresse osmótico em *Arabidopsis thaliana*, capaz de impactar significativamente a tolerância à seca em plantas de *Arabidopsis* (Umezawa et al., 2004).

Um gene associado ao marcador 100019255|F|0 apresentou similaridade à polygalacturonase At1g48100. As poligalacturonases pertencem à família das glicosil hidrolases e são enzimas hidrolisadoras de HG (homogalacturonano) essenciais, relacionadas a vários processos de desenvolvimento vegetal, como alongamento celular, abscisão de órgãos, amadurecimento de frutos, liberação de micrósporos e crescimento do tubo polínico (Hadfield and Bennet, 1998). As poligalacturonases (PGs) ajustam as pectinas para modular a química e a mecânica da parede celular, impactando o desenvolvimento da planta (Safran et al., 2023).

Em *Arabidopsis* a deleção ou superexpressão de PGX3 (At1g48100) afeta tanto a forma do cotilédone quanto o espaçamento e as dimensões dos poros dos estômatos em desenvolvimento, a perda de PGX3 impede o fechamento estomático adequado, e a superexpressão de PGX3 acelera a abertura estomática (Rui et al., 2017).

O gene ligado ao marcador 100010748|F|0 foi anotado como proteína putativa de resistência à doença RGA3, gene relacionado ao estresse biótico, ligado a defesa contra outros organismos. As plantas possuem mecanismos eficazes para detectar e responder a infecções causadas por patógenos, como os genes de resistência análogos (RGAs), considerados potenciais genes de resistência (R), que possuem domínios e características conservadas que desempenham papéis específicos na defesa contra patógenos (Sekhwal et al., 2015). Marcadores RGA já foram utilizados em *Citrus* para identificação, marcação e mapeamento de genes de resistência a doenças de híbridos de *C. unshiu* e *C. nobilis* (Ragayatsu et al., 2014).

O marcador 100023347|F|0 foi colocalizado com um gene anotado para Receptor-like protein 33, as proteínas receptoras (RLPs) são receptores da superfície celular, as RLPs desempenham um papel na resistência a doenças em diversas espécies de plantas. Além disso, as RLPs podem desempenhar um papel no desenvolvimento vegetal, como regulação a

distribuição dos estômatos (TMM) e manutenção do meristema em *Arabidopsis* (Wang et al., 2008).

O gene associado ao marcador 100046832|F|0, anotou para S-locus F-box protein, o locus S controla a autoincompatibilidade, e contém determinantes S do pistilo e do pólen. Em Rutaceae determinantes S do pólen geralmente compreendem um ou mais genes F-box intimamente ligados à S-RNase (Liang et al., 2020).

As proteínas F-box pertencem a uma das maiores famílias de proteínas em plantas e estão envolvidas na regulação de muitos processos fisiológicos essenciais, incluindo o crescimento e o desenvolvimento de raízes, folhas, caules, flores e frutos, bem como respostas a estresses bióticos e abióticos (Xu et al., 2021). Em relação ao desenvolvimento radicular, algumas proteínas dessa família (MAX2) podem inibir o crescimento da raiz primária e promover o desenvolvimento de pelos radiculares (Carbonnel et al., 2020). Além disso, por meio da sinalização de auxina, genes F-box (CEGENDUO) inibiram a formação de raízes laterais em *Arabidopsis* (Dong et al., 2006).

Por fim, um gene colocalizado com o marcador 100023207|F|0 anotou para proteína não caracterizada Uncharacterized vacuolar membrane protein YML018C isoform X1. A proteína YML018C da levedura *Saccharomyces cerevisiae* ainda não tem função determinada. Estudos de alto rendimento relataram que essa proteína se localiza na membrana vacuolar (Sturgeon et al., 2021).

Avaliando a tolerância à seca induzida pelo porta-enxerto limão Cravo em laranja-doce (*C. sinensis*), foi possível verificar a ativação transcricional de genes relacionados ao acúmulo de açúcares solúveis, metabolismo antioxidante, parede celular, respostas a estresses bióticos e abióticos, fatores de transcrição, proteínas quinases, sinalização do ácido abscísico (ABA) e a regulação negativa de genes relacionados nas reações de luz da fotossíntese, metabolismo do amido e sinalização do etileno (Gonçalves et al., 2019). Esses resultados evidenciam a complexidade das respostas moleculares associadas à adaptação ao déficit hídrico em citros.

Embora os mecanismos de tolerância à seca em citros dependam da manutenção das estruturas celulares e dos processos metabólicos, é importante ressaltar que os genes de sinalização, regulação e função que conferem tolerância à seca ainda não são totalmente compreendidos em citros (Dahro et al., 2023). Nossos resultados apontam mecanismos relacionados à sinalização e percepção do estresse, ajuste e desenvolvimento celular.

5.8.2. Marcadores putativamente associados ao porte ananicante

O parental masculino *P. trifoliata* tem sido relacionado a uma indução da redução do porte da copa. O trifoliata é considerado um porta-enxerto ananicante, visto que as copas enxertadas sobre eles mostram porte relativamente pequeno, mas demonstram ser mais sensíveis à seca que a maioria dos porta-enxertos (Pompeu Junior, 2005). Dessa forma, os marcadores anotados nesse estudo podem estar relacionados a mecanismos envolvidos na indução da redução do porte da variedade copa (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da anotação funcional de genes putativamente relacionados a redução de vigor em citrandarins.

Marcadores DArTseq associados	Descrição	Length	e-Value	Sim mean %
Marcadores putativamente associados ao porte ananicante				
100033871 F 0	Agamous-like MADS-box protein AGL6	4186	8,06E-14	91.81
100009554 F 0	ADP-ribosyl cyclase/cyclic ADP-ribose hydrolase	10616	0.0	84.76
100010962 F 0	ADP-ribosyl cyclase/cyclic ADP-ribose hydrolase	13300	0.0	91.75
100010962 F 0	Endonuclease	97709	0.0	96.58
100010962 F 0	hypothetical protein WN944_006731	81207	0.0	96.32
100010962 F 0	ADP-ribosyl cyclase/cyclic ADP-ribose hydrolase	6267	0.0	87.28
100048650 F 0	Retrovirus-related Pol polyprotein from transposon TNT 1-94	26060	0.0	83.3
100053083 F 0	Agamous-like MADS-box protein AGL6	4186	8,06E-14	91.81
100021565 F 0	serine/threonine-protein kinase At3g07070	4976	2,26E-142	70.77

Dentre os marcadores putativamente associados, os marcadores 100033871|F|0 e 100053083|F|0 foram colocados a um gene anotado para Agamous-like MADS-box protein AGL6. A família de genes do fator de transcrição MADS-box é fundamental em biologia vegetal, principalmente no crescimento e desenvolvimento, desempenhando papel na regulação de genes relacionados a floração, amadurecimento de frutos e tolerância ao estresse, (Zhang et al., 2024). O gene AGAMOUS-like6 (AGL6) é uma subfamília de genes MADS-box, necessário para o desenvolvimento floral em trigo (Kong et al., 2022).

Entretanto, estudos recentes demonstram que as funções dessa subfamília são mais amplas. Uma meta-análise da família MADS-box verificou que alguns membros dessa família conferem um efeito mais indireto no crescimento e desenvolvimento da raiz. Nesse estudo, o

gene AGL6 também foi relacionado ao movimento foliar, processo que regula o relógio circadiano nas plantas, além de apresentar expressão em pólen e sementes, indicando uma atuação em diferentes estágios do desenvolvimento vegetal (Adhikari e Kasahara, 2024).

Além do seu papel no desenvolvimento floral, genes da família MADS-box em *Arabidopsis* promoveram tanto o alongamento da raiz, como também agiram como inibidores do crescimento radicular, estando possivelmente envolvidos com a arquitetura radicular (Castañón-Suárez et al., 2024). Em alfafa (*Medicago sativa*), AGL6 em conjunto com SPL12 (SQUAMOSA-PROMOTER BINDING PROTEIN-LIKE) formaram um módulo genético que regulou o desenvolvimento radicular e a formação de nódulos (Nasrollahi et al., 2022).

Plantas transgênicas de *Arabidopsis* com expressão ectópica de OMADS1 (gene homólogo ao AGL6) apresentaram redução significativa no tamanho da planta, floração muito precoce e perda da indeterminação da inflorescência. Entretanto, esses efeitos foram observados em condições de expressão artificial, dificultando sua interpretação (Hsu et al., 2003).

Os genes associados aos marcadores 100009554|F|0 e 100010962|F|0 anotaram termo referente a ADP-ribosyl cyclase/cyclic ADP-ribose hydrolase. Essa enzima participa da produção e degradação de cADPR (cyclic ADP-ribose), uma molécula sinalizadora derivada de NAD⁺. O cADPR atua como segundo mensageiro, principalmente associado à mobilização de Ca²⁺ dentro da célula (Guse, 2000).

O ADP-ribose cíclico (cADPR) foi identificado como uma molécula sinalizadora na resposta ao hormônio ácido abscísico (ABA) e demonstrou exercer seus efeitos por meio do cálcio. Experimentos mostraram que os níveis de cADPR em plantas de *Arabidopsis* aumentaram em resposta ao tratamento com ABA e antes da expressão gênica induzida por ABA (Wu et al., 1997). A via do cADPR é importante na regulação da expressão gênica em plantas. O tratamento de células vegetais com o hormônio ABA elevou os níveis de cADPR, ativando genes específicos. Outra função importante nas plantas, na qual o cADPR desempenha um papel, é mediar a ativação de genes envolvidos na defesa contra patógenos (Lee, 2001).

O gene ligado ao marcador 100048650|F|0 foi anotado como Retrovirus-related Pol polyprotein from transposon TNT 1-94. Elementos transponíveis ou transpósons, representam componentes importantes dos genomas vegetais e podem contribuir para a variabilidade genética e regulação da expressão gênica. Transpósons, também conhecidos como “genes saltadores”, pois alguns deles têm a capacidade de inserir uma cópia de si mesmos em um novo local dentro do genoma, movendo-se de uma posição para outra (Taiz and Zeiger, 2017).

Um marcador (100021565|F|0) foi colocalizado a um gene anotado como serine/threonine-protein kinase At3g07070 (PBL26). As proteínas quinases são enzimas que catalisam fosforilação de outra proteína pela adição de um grupo fosfato do ATP, modificando suas propriedades. Em plantas, as quinases atuam na transdução de sinais relacionados ao crescimento, desenvolvimento e resposta a estímulos (Taiz and Zeiger, 2017).

Esse gene pode estar envolvido no crescimento e desenvolvimento de plantas (Choi et al., 2025). Em *Arabidopsis*, essa quinase desempenha um papel crucial na transdução de sinal que desencadeia a ruptura dos tubos polínicos. Em angiospermas, o tubo polínico entra na célula sinérgide receptiva, onde se rompe para liberar as células espermáticas. Esses genes produzem proteínas localizadas na membrana plasmática e sua deleção causa atraso na ruptura do tubo polínico (Xu et al., 2024).

A genética envolvida no controle do tamanho das árvores por variedades anãs de citros ainda não foi totalmente compreendida. Diferentes mecanismos fisiológicos foram relatados, dentre eles, hormônios vegetais como giberelinas, auxinas, brassinosteroides e ácido abscísico, parecem ter forte relação no controle dessa característica (Chu et al., 2025).

Em Flying Dragon e *P. trifoliata*, foi descoberto um mecanismo potencial de regulação do nanismo, relacionado à transdução de sinal de fitormônios, à degradação de açúcares e amido, à síntese de lignina e aos processos de degradação de celulose e hemicelulose. Também, foram identificados vários fatores de transcrição, RNAs não codificantes longos (lncRNAs) e eventos de splicing alternativo (SA), que podem atuar como importantes contribuintes para o controle do alongamento e desenvolvimento do caule em porta-enxertos de crescimento lento (Gu et al., 2023). Nesse estudo, os genes co-localizados aos marcadores moleculares candidatos identificados são relacionados a proteínas quinases, fatores de transcrição MADS-box e sinalização celular.

Apesar dos resultados obtidos permitirem identificar possíveis regiões genômicas associadas as características avaliadas, é importante destacar que as associações identificadas neste estudo são preliminares, visto que se baseiam em evidências correlativas. Assim, destacamos genes candidatos com funções biológicas plausíveis e já descritas na literatura, evitando generalizações excessivas. No entanto, validações adicionais são necessárias para confirmar essas associações.

6. CONCLUSÕES

Os porta-enxertos mais vigorosos apresentaram mais tolerância ao déficit hídrico, enquanto os porta-enxertos ananizantes apresentaram menor tolerância. Pode-se destacar os híbridos citrandarins H152, H148, H73 e H299 como variedades menos vigorosas e mais tolerantes ao déficit hídrico. Sendo indicadas para plantio mais adensado.

Os resultados indicam que os citrandarins, especialmente: H152 (semiananizante), H137 (semiananizante) e H110 (ananizante) são altamente promissores devido a qualidade e produtividade induzida à laranja Pera, reforçando seu potencial para adoção em cultivos comerciais adensados e irrigados, enquanto o H152 é principalmente recomendado para regiões com disponibilidade hídrica limitada.

O porta-enxerto H26 (ananizante) também apresentou performance promissora, com boa eficiência produtiva, sendo indicado para o cultivo adensado, reduzindo custos operacionais e aumentando a sustentabilidade da produção, no entanto recomenda-se o uso de irrigação para essa variedade.

A abordagem integrada de fenotipagem em campo e BSA *in silico* combinada com marcadores DArTseq permitiu detectar 12 marcadores moleculares potencialmente relacionados às características agrônomicas de interesse. Sendo seis relacionados a porte ananizantes e seis relacionados a tolerância à seca.

A anotação funcional dos genes colocalizados aos marcadores revelou genes candidatos envolvidos em processos como sinalização de estresse, regulação hormonal, ajuste celular, respostas de defesa e desenvolvimento vegetal.

Os genes associados a tolerância à seca, estão relacionados à sinalização de estresse (proteína-quinases), modificação da parede celular (poligalacturonases), resistência a doenças (RGA3, RPL) e regulação hormonal (proteínas F-box). Para a característica de porte ananizante, os genes localizados se relacionam com regulação do desenvolvimento (fatores de transcrição MADS-box), sinalização por cálcio (ADP-ribosil ciclase) e a transdução de sinal (serina/treonina-proteína quinases).

Esses resultados apontam para o controle multigênico e multifatorial do fenótipo, indicando que a tolerância à seca e a regulação do crescimento vegetativo são características complexas, provavelmente controladas por mais de um gene. No entanto, as associações marcador/característica identificadas aqui são de natureza exploratória e necessitam validação adicional para confirmar a contribuição desses genes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARI, P. B.; KASAHARA, R. D. An Overview on MADS Box Members in Plants: A Meta-Review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 15, p. 8233, 2024.
- ALVES JÚNIOR, J.; LOURENÇÃO, M. D. S.; SILVA, T. J. A. DA; SILVA, C. R. DA; FOLEGATTI, M. V. Distribuição do sistema radicular de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ sob diferentes níveis de irrigação. **IRRIGA**, v. 9, n. 3, p. 270–281, 2004.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. O Monitor de Secas. 2026. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- ANDRADE, R. A.; MARTINS, A. B. G. Propagação vegetativa de porta-enxertos para citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 1, p. 134–136, 2003.
- ASHBURNER, M.; BALL, C. A.; BLAKE, J. A.; et al. Gene Ontology: tool for the unification of biology. **Nature Genetics**, v. 25, n. 1, p. 25–29, 2000.
- BASSANEZI, R. B.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. *et al.* Spatial and temporal analyses of citrus sudden death as a tool to generate hypotheses concerning its etiology. **Phytopathology**, v. 93, n. 4, p. 502–512, 2003.
- BENINCASA, M. M. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2 ed. Jaboticabal: Funep. 41p. 2003.
- BELLO, M. H.; MOGHADDAM, S. M.; MASSOUDI, M.; MCCLEAN, P. E.; CREGAN, P. B.; MIKLAS, P. N. Application of in silico bulked segregant analysis for rapid development of markers linked to Bean common mosaic virusresistance in common bean. **BMC Genomics**, v. 15, n. 1, p. 903-, 2014.
- BITTERS, W. P.; COLE, D. A.; MCCARTY, C. D. Facts about dwarf citrus trees. **Citrograph**, v. 64, n. 3, p. 54–56, 1979.
- BÖHM, W. Methods of Studying Root Systems. **Ecological Studies.**, v. 33, 1979. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An Analysis of Transformations. *J. R. Stat. Soc. Ser. B Methodol.* 26, 211–52, 1964.
- BOWMAN, K. D.; ROUSE, R. E. US-812 citrus rootstock. **HortScience**, v. 41, n. 3, p. 832–836, 2006.
- CANTUARIAS-AVILÉS, T.; MOURÃO FILHO, F. D. A. A.; STUCHI, E. S.; DA SILVA, S. R.; ESPINOZA-NUÑEZ, E. Horticultural performance of ‘Folha Murcha’ sweet orange onto twelve rootstocks. **Scientia Horticulturae**, v. 129, n. 2, 259–265, 2011.
- CARBONNEL, S.; DAS, D.; VARSHNEY, K.; KOLODZIEJ, M. C.; VILLAÉCIGA-AGUILAR, J. A.; GUTJAHR, C. The karrikin signaling regulator SMAX1 controls Lotus japonicus root and root hair development by suppressing ethylene biosynthesis. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 35, p. 21757–21765, 2020.

- CASTAÑÓN-SUÁREZ, C. A.; CAO, Z.; ZHU, A.; LIU, Y.; TAO, M.; YANG, H. *et al.* The MADS-box genes SOC1 and AGL24 antagonize XAL2 functions in *Arabidopsis thaliana* root development. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1331269, 2024.
- CASTLE, W. S. Controlling citrus tree size with rootstocks and viruses for higher density plantings. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, v. 91, n. 0097–1219, p. 46–50, 1979.
- CEAGESP. Normas de classificação de citros de mesa/CEAGESP. São Paulo, 2011. 12 p.
- CHARRAD, M.; GHAZZALI, N.; BOITEAU, V.; NIKNAFS, A. NbClust: an R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *J. Stat. Softw.* V. 61, p. 1–36, 2014. doi: 10.18637/JSS.V061.I06
- CHENG, S. F.; ROOSE, M. L. Origin and Inheritance of Dwarfing by the Citrus Rootstock *Poncirus trifoliata* 'Flying Dragon'. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 120, n. 2, p. 286–291, 1995.
- CHOI, J. H.; OH, M. H. Role of Tyrosine Phosphorylation in PEP1 Receptor 1(PEPR1) in *Arabidopsis thaliana*. **Plants**, v. 14, n. 10, p. 1515, 2025.
- CHU, L.; LIU, D.; LI, C.; LIU, J. H. Dwarfing of fruit trees: from old cognitions to new insights. **Horticulture Advances**, v. 3, n. 1, p. 7-, 2025
- CONESA, A.; GÖTZ, S.; GARCÍA-GÓMEZ, J. M.; *et al.* Blast2GO: a universal tool for annotation, visualization and analysis in functional genomics research. **Bioinformatics**, v. 21, n. 18, p. 3674–3676, 2005.
- COSTA, D. P.; STUCHI, E. S.; GIRARDI, E. A.; MOREIRA, A. S.; SILVA GESTEIRA, A. da; COELHO FILHO, M. A.; DA SILVA LEDO, C. A.; DA SILVA, A. L. V.; DE LEÃO, H. C.; PASSOS, O. S.; SOARES FILHO, W. D. S. Less is more: A hard way to get potential dwarfing hybrid rootstocks for valencia sweet orange. **Agriculture (Switzerland)**, v. 11, n. 4, p. 354, 2021.
- CRISTOFANI-YALY, M.; BASTIANEL, M.; FALDONI, L. *et al.* Seleção de citrandarins (Tangerina Sunki vs. *Poncirus trifoliata*) para porta-enxertos de citros. **Laranja**, v. 28, n. 1–2, p. 71–79, 2007.
- CUENCA, J.; ALEZA, P.; VICENT, A. *et al.* Genetically based location from triploid populations and gene ontology of a 3.3-Mb genome region linked to alternaria brown spot resistance in citrus reveal clusters of resistance genes. **PLoS One**, v. 8, n. 10, 2013.
- CURTOLO, M.; CRISTOFANI-YALY, M.; GAZAFFI, R. *et al.* QTL mapping for fruit quality in Citrus using DArTseq markers. **BMC Genomics**, v. 18, n. 289, 2017.
- CURTOLO, M.; SORATTO, T. A. T.; GAZAFFI, R. *et al.* High-density linkage maps for *Citrus sunki* and *Poncirus trifoliata* using DArTseq markers. **Tree Genetics and Genomes**, v. 14, n. 5, 2018.
- DAHRO, B.; LI, C.; LIU, J. H. Overlapping responses to multiple abiotic stresses in citrus: from mechanism understanding to genetic improvement. **Horticulture Advances**, v. 1, n. 1, p. 4-, 2023.

DATTOLA, A.; GULLO, G. Rootstocks and Root Systems in *Citrus clementina* (Hort ex Tan.) Plants: Ecophysiological, Morphological, and Histo-Anatomical Factors. **Horticulturae**, v. 12, n. 1, p. 21, 2026.

DE CARVALHO, D. U.; GIRARDI, E. A.; EDUARDO, W. I.; VOLPE, H. X. L.; DE AZEVEDO, F. A.; DE MIRANDA, M. P.; BASSANEZI, R. B. Rootstock impacts on citrus flush dynamics, vegetative growth, and *Diaphorina citri* infestation and dispersion: Implications for huanglongbing management. **Pest Management Science**, 2026.

DE NEGRI, J. D.; STUCHI, E. S.; BLASCO, E. E. A. Planejamento e implantação do pomar cítrico. In: D. Mattos Jr.; J. D. De Negri; R. M. Pio; Pompeu Junior. J. (Orgs.); **Citros**. p.411–427, 2005. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundag.

DE SOUZA, A. J. B.; CRISTOFANI-YALY, M.; DA CONCEIÇÃO, P. M.; DEVITE, F. T.; BASTIANEL, M.; ROMERO, P. V. S.; PADILHA, P. H. B.; DE AZEVEDO, F. A. Physiological and productivity responses of Tahiti acid lime grafted onto dwarfing rootstocks under different planting and mulching practices. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 9, p. 1489291, 2025.

DEVITE, F. T.; BASTIANEL, M.; CRISTOFANI-YALY, M.; et al. Performance of Valencia sweet orange grafted onto dwarfing citrandarins. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1530396, 2025.

DI GIORGI, F.; IDE, B. Y.; DIB, K.; et al. Contribuição ao estudo do comportamento de algumas variedades de citros e suas implicações agroindustriais. **Laranja**, v. 11, n. 2, p. 567–612, 1990.

DOBBELS, A. A.; MICHNO, J. M.; CAMPBELL, B. W. *et al.* An Induced Chromosomal Translocation in Soybean Disrupts a KASI Ortholog and Is Associated with a High-Sucrose and Low-Oil Seed Phenotype. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 7, n. 4, p. 1215–1223, 2017.

DOMINGUES, A. R.; MARCOLINI, C. D. M.; GONÇALVES, C. H. da S.; DE RESENDE, J. T. V.; ROBERTO, S. R.; CARLOS, E. F. Rootstocks genotypes impact on tree development and industrial properties of ‘valencia’ sweet orange juice. **Horticulturae**, v. 7, n. 6, p. 141, 2021.

DONADIO, L. C.; LEDERMAN, I. E.; ROBERTO, S. R.; STUCCHI, E. S. Dwarfing-canopy and rootstock cultivars for fruit trees. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 41, n. 3, p. e-997, 2019.

DONG, L.; WANG, L.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; DENG, X.; XUE, Y. An Auxin-Inducible F-Box Protein CEGENDUO Negatively Regulates Auxin-Mediated Lateral Root Formation in Arabidopsis. **Plant Molecular Biology** 2006 60:4, v. 60, n. 4, p. 599–615, 2006.

ELLEGREN, H. Genome sequencing and population genomics in non-model organisms. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 1, p. 51–63, 2014.

ESPOSITO, S.; D’AGOSTINO, N.; TARANTO, F.; FANIA, F.; PAVAN, S.; COLELLA, I.; SESTILI, F.; LAFIANDRA, D.; DE VITA, P. Reverse BSA-QTLseq: A new genotype-driven bioinformatics approach for simultaneous trait mapping. **Plant Communications**, v. 7, n. 1, p. 101588, 2026.

- FADEL, A. L.; STUCHI, E. S.; COUTO, H. T. Z.; RAMOS, Y. C.; MOURÃO FILHO, F. DE A. A. Trifoliate hybrids as alternative rootstocks for 'Valencia' sweet orange under rainfed conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 235, n. 42, p. 397–406, 2018.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. (2021). _ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues). R package version 1.2.2, <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>.2021.
- FISHER, R. A. On the Interpretation of χ^2 from Contingency Tables, and the Calculation of P. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 85, n. 1, p. 94, 1922.
- FORNER-GINER, M. A.; RODRIGUEZ-GAMIR, J.; MARTINEZ-ALCANTARA, B. *et al.* Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418). **Scientia Horticulturae**, v. 179, p. 376–387, 2014.
- FOSTER, T. M.; CELTON, J. M.; CHAGNE, D.; STUART TUSTIN, D.; GARDINER, S. E. Two quantitative trait loci, Dw1 and Dw2, are primarily responsible for rootstock-induced dwarfing in apple. **Horticulture Research**, v. 2, 2015.
- FOSTER, T. M.; MCATEE, P. A.; WAITE, C. N.; BOLDINGH, H. L.; MCGHIE, T. K. Apple dwarfing rootstocks exhibit an imbalance in carbohydrate allocation and reduced cell growth and metabolism. **Nature Publishing Group**, v. 4, 2017.
- FUNDECITRUS. Inventário de árvores do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro: retrato dos pomares em março de 2024. Fundo de Defesa da Citricultura. Araraquara, 2024. 158p.
- FUNDECITRUS. Sumário Executivo: Estimativa da safra de laranja 2025/2026 do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro. Araraquara, 2025a. Disponível em: <<https://www.fundecitrus.com.br/>>. Acesso em 09 de mar. 2026.
- FUNDECITRUS. Porta-enxertos estratégia de produção e manejo do greening. **Revista Citricultor**, n. 62. p.33. 2025b. Disponível em: <<https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/revistas/>>. Acesso em 09 de mar. 2026.
- GIRARDI, E. A.; AYRES, A. J.; GIROTTO, L. F.; PEÑA, L. Tree Growth and Production of Rainfed Valencia Sweet Orange Grafted onto Trifoliate Orange Hybrid Rootstocks under Aw Climate. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2533, 2021a.
- GIRARDI, E. A.; PANEGOSSO SOLA, J. G.; DA SILVA SCAPIN, M.; MOREIRA, A. S.; BASSANEZI, R. B.; AYRES, A. J.; PEÑA, L. The perfect match: Adjusting high tree density to rootstock vigor for improving cropping and land use efficiency of sweet orange. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2569, 2021b.
- GONÇALVES, L. P.; BOSCARIOL CAMARGO, R. L.; TAKITA, M. A.; MACHADO, M. A.; DOS SOARES FILHO, W. S.; COSTA, M. G. C. Rootstock-induced molecular responses associated with drought tolerance in sweet orange as revealed by RNA-Seq. **BMC Genomics**, v. 20, n. 1, 2019.
- GONÇALVES, B.; CORREIA, C. M.; SILVA, A. P. *et al.* Variation in xylem structure and function in roots and stems of scion-rootstock combinations of sweet cherry tree (*Prunus avium* L.). **Trees**, v. 21, n. 2, p. 121–130, 2007.

- GONÇALVES, L. P.; ALVES, T. F. O.; MARTINS, C. P. S. *et al.* Rootstock-induced physiological and biochemical mechanisms of drought tolerance in sweet orange. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, n. 7, p. 1–12, 2016.
- GONZATTO, M. P.; GRIEBELER, S. R.; SCHWARZ, S. F. Dwarfing Rootstocks for High-Density Citrus Orchards. In: İ. Kahramanoğlu; C. Wan (Orgs.); **Fruit Industry**. p.73–87, 2022. London: IntechOpen.
- GU, Q.; WEI, Q.; HU, Y.; CHEN, M.; CHEN, Z.; ZHENG, S.; MA, Q.; LUO, Z. Physiological and Full-Length Transcriptome Analyses Reveal the Dwarfing Regulation in Trifoliate Orange (*Poncirus trifoliata* L.). **Plants**, v. 12, n. 2, p. 271, 2023.
- GUSE, A. H. The Ca²⁺-Mobilizing Second Messenger Cyclic ADP-Ribose. In: POCHET, R.; DONATO, R.; HAIECH, J.; HEIZMANN, C.; GERKE, V. (eds.). **Calcium: The Molecular Basis of Calcium Action in Biology and Medicine**. [S. l.]: Springer, Dordrecht, 2000. p. 109–128.
- HAASE, N. J.; BEISSINGER, T.; HIRSCH, C. N. *et al.* Shared genomic regions between derivatives of a large segregating population of maize identified using bulked segregant analysis sequencing and traditional linkage analysis. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 5, n. 8, p. 1593–1602, 2015.
- HADFIELD, K. A.; BENNETT, A. B. Polygalacturonases: Many Genes in Search of a Function. **Plant Physiology**, v. 117, n. 2, p. 337–343, 1998.
- HAYAT, F.; LI, J.; IQBAL, S. *et al.* A Mini Review of Citrus Rootstocks and Their Role in High-Density Orchards. **Plants**, v. 11, n. 21, p. 2876, 2022.
- HAYAT, F.; IQBAL, S.; COULIBALY, D.; RAZZAQ, M. K.; NAWAZ, M. A.; JIANG, W.; SHI, T.; GAO, Z. An insight into dwarfing mechanism contribution of scionrootstock interactions toward fruit crop improvement. **Fruit Research**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2021.
- HSU, H. F.; HUANG, C. H.; CHOU, L. T.; YANG, C. H. Ectopic Expression of an Orchid (*Oncidium Gower Ramsey*) AGL6-like Gene Promotes Flowering by Activating Flowering Time Genes in *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Cell Physiology**, v. 44, n. 8, p. 783–794, 2003.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Previsão de safra. 2025. <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/> <Acesso em 20 jan. 2026>.
- JONES, W. W.; EMBLETON, T. W. Soils, soil management and cover crops. In: REUTHER, W. (Ed.) **The citrus industry**. Riverside: University of California, v.3, p.98-121. 1973.
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: MacGraw-Hill, 1940. 523 p.
- KAUFMANN, M. R. Evaluation of the pressure chamber method for measurement of water stress in citrus. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 93, n. 1, p. 186–98, 1968.
- KONG, X. WANG, F.; GENG, S.; GUAN, J.; TAO, S.; JIA, M. *et al.* The wheat AGL6-like MADS-box gene is a master regulator for floral organ identity and a target for spikelet

- meristem development manipulation. **Plant Biotechnology Journal**, v. 20, n. 1, p. 75–88, 2022.
- LEE, H. C. Physiological functions of cyclic ADP-ribose and NAADP as calcium messengers. **Annual Review of Pharmacology and Toxicology**, v. 41, p. 317–345, 2001.
- LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008.
- LIANG, M.; CAO, Z.; ZHU, A.; LIU, Y.; TAO, M.; YANG, H. *et al.* Evolution of self-compatibility by a mutant Sm-RNase in citrus. **Nature Plants**, v. 6, n. 2, p. 131–142, 2020.
- LIMA, R. P. M.; CURTOLO, M.; MERFA, M. V.; CRISTOFANI-YALY, M.; MACHADO, M. A. QTLs and eQTLs mapping related to citrandarins' resistance to citrus gummosis disease. **BMC Genomics**, v. 19, n. 516, 2018.
- MACHADO, E. C.; MEDINA, C. L.; GOMES, M. M. A.; HABERMANN, G. Seasonal variation of photosynthetic rates, stomatal conductance and leaf water potential in “Valencia” orange trees. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 1, p. 53–58, 2002.
- MACHADO, M. A.; CRISTOFANI, M.; AMARAL, A. M.; OLIVEIRA, A. C. Genética, melhoramento e biotecnologia de citros. In: D. Mattos Júnior; J. D. De Negri; R. M. Pio; J. Pompeu Junior. (Orgs.); **Citros**. p.223–277, 2005. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag.
- MACHADO, M. A.; CRISTOFANI-YALY, M.; BASTIANEL, M. Breeding, genetic and genomic of citrus for disease resistance. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. SPEC. ISSUE 1, p. 158–172, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500019>
- MAGALHÃES FILHO, J. R.; AMARAL, L. R. DO; MACHADO, D. F. S. P.; MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira ‘Valência’ sobre dois tipos de porta-enxertos. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 75–82, 2008.
- MARTÍNEZ-ALCÁNTARA, B.; RODRIGUEZ-GAMIR, J.; MARTÍNEZ-CUENCA, M. R.; *et al.* Relationship between hydraulic conductance and citrus dwarfing by the Flying Dragon rootstock (*Poncirus trifoliata* L. Raft var. *monstruosa*). **Trees**, v. 27, n. 3, p. 629–638, 2013.
- MARTÍNEZ-CUENCA, M.-R.; PRIMO-CAPELLA, A.; FORNER-GINER, M. A. Influence of rootstock on citrus tree growth: Effects on photosynthesis and carbohydrate distribution, plant size, yield, fruit quality, and dwarfing genotypes. In: E. C. Rigobelo (Org.); **Plant Growth**, London: IntechOpen. p. 107, 2016.
- MASCHER, M.; JOST, M.; KUON, J. E.; HIMMELBACH, A.; ASSFALG, A.; BEIER, S.; Scholz, U.; GRANER, A.; STEIN, N. Mapping-by-sequencing accelerates forward genetics in barley. **Genome Biology**, v. 15, n. 6, p. 1-15, 2014.
- MATTOS JÚNIOR, D.; NEGRI, J. D.; FIGUEREDO, J. O.; POMPEU JUNIOR, J. Citros: principais informações e recomendações de cultivo. **Boletim técnico**, v. 200, p. 9, 2005.
- MAZZA, J. A.; VITTI, G. C.; PEREIRA, H. S.; MENEZES, G. M.; TAGLIARINI, C. H. Influência da compactação no desenvolvimento do sistema radicular de citros: sugestão de método qualitativo de avaliação e recomendação de manejos. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 15, n. 2, p. 251-262, 1994.

MEDINA, C. L.; RENA, A. B.; SIQUEIRA, D. L.; MACHADO, E. C. Fisiologia dos citros. In: Mattos Junior, D.; De Negri, J. D.; Pio, R. M.; Pompeu Junior, J. (eds.). **Citros**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, 2005. p. 147–195.

MENDEL, K. Roostock-scion relationships in Shamouti trees on light soil. **Katavim**: records of the agricultural research station, v. 6, p. 35–38, 1956.

MICHELMORE, R. W.; PARAN, I.; KESSELI, R. V. Identification of markers linked to disease-resistance genes by bulked segregant analysis: a rapid method to detect markers in specific genomic regions by using segregating populations. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 88, n. 21, p. 9828–9832, 1991.

MIRANDA, M. T.; ESPINOZA-NÚÑEZ, E.; SILVA, S. F.; PEREIRA, L.; HAYASHI, A. H.; BOSCARIOL-CAMARGO, R. L.; CARVALHO, S. A.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. Water stress signaling and hydraulic traits in three congeneric citrus species under water deficit. **Plant Science**, v. 319, n. 4, p. 111255, 2022.

MODICA, G.; ARCIDIACONO, F.; PUGLISI, I.; BAGLIERI, A.; LA MALFA, S.; GENTILE, A.; ARBONA, V.; CONTINELLA, A. Response to Water Stress of Eight Novel and Widely Spread Citrus Rootstocks. **Plants**, v. 14, n. 5, p. 773, 2025.

MORADE, A. S.; SHARMA, R. M.; DUBEY, A. K.; et al. Phenotyping drought stress tolerance in citrus rootstocks using high-throughput imaging and physio-biochemical techniques. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 753, 2025.

MOREIRA, C. S. **Estudo da distribuição do sistema radicular da laranjeira “Pera” (*Citrus sinensis* L. Osbeck) com diferentes manejos de solo**. Piracicaba, 1983. 97p. (Tese Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MOREIRA, A. S.; STUCHI, E. S.; SILVA, P. R. B.; BASSANEZI, R. B.; GIRARDI, E. A.; LARANJEIRA, F. F. Could tree density play a role in managing Citrus Huanglongbing epidemics?. **Tropical Plant Pathology**, v. 44, n. 3, p. 268–274, 2019.

NASROLLAHI, V.; YUAN, Z. C.; LU, Q. S. M.; MCDOWELL, T.; KOHALMI, S. E.; HANNOUFA, A. Deciphering the role of SPL12 and AGL6 from a genetic module that functions in nodulation and root regeneration in *Medicago sativa*. **Plant Molecular Biology**, v. 110, n. 6, p. 511–529, 2022.

NEVES, D. M.; FILHO, M. A. C.; BELLETE, B. S.; SILVA, M. F. G. F.; SOUZA, D. T.; SOARES FILHO, W. S.; COSTA, M. G. C.; GESTEIRA, A. S. Comparative study of putative 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase and abscisic acid accumulation in the responses of Sunki mandarin and Rangpur lime to water deficit. **Molecular Biology Reports**, v. 40, n. 9, p. 5339–5349, 2013.

OLIVEIRA, R. P. DE; MACHADO, M. A.; FERREIRA, E. A. Melhoramento genético de plantas cítricas. **Informe Agropecuário**, v. V.35, p. 1–9, 2014.

OLIVEIRA, R. P. DE; SOARES FILHO, W. DOS S.; PASSOS, O. S.; SCIVITTARO, W. B.; ROCHA, P. S. G. DA. **Porta-enxertos para citros**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2008.

- OLMSTEAD, M. A.; LANG, N. S.; EWERS, F. W.; OWENS, S. A. Xylem vessel anatomy of sweet cherries grafted onto dwarfing and nondwarfing rootstocks. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 131, n. 5, p. 577–585, 2006.
- PEREIRA, M. E. C.; CANTILLANO, F. F.; GUTIEREZ, A. S. D.; ALMEIDA, G. V. B. Procedimentos pós-colheita na produção integrada de citros. Cruz das almas: **Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical**, 2006. p. 40. (Documentos, 156).
- PIO, R. M.; FIGUEIREDO, J. O.; STUCHI, E. S.; CARDOSO, S. A. B. Variedades copa. In: D. De Mattos Jr.; J. D. De Negri; R. M. Pio; J. Pompeu Junior (Orgs.); **Citros**. p.61–104, 2005. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundag.
- POMPEU JUNIOR, J. Porta-enxertos. In: D. De Mattos Jr.; J. D. De Negri; R. M. Pio; J. Pompeu Junior (Orgs.); **Citros**. p.61–104, 2005. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundag.
- POMPEU JUNIOR, J.; BLUMER, S. Citrumelos como porta-enxertos para a laranjeira “Valência”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 105–107, 2011.
- POMPEU JUNIOR, J.; BLUMER, S. Híbridos de trifoliata como porta-enxertos para laranjeira Pera. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 9-14, 2014.
- POMPEU JUNIOR, J.; BLUMER, S. Morte súbita dos citros: suscetibilidade de seleções de limão-cravo e uso de interenxertos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 4, p. 1159–1161, 2008.
- POMPEU JUNIOR, J.; BLUMER, S.; RODRIGUES, J.; STUCHI, E. S.; GIRARDI, E. A. Comportamento de citrumelos em área afetada pela morte súbita dos citros. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e25411124527–e25411124527, 2022.
- R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- RAGAYATSU, D. P. P.; SULISTYOWATI, L.; AINI, L. Q.; MARTASARI, C. Genetic characterization of diplotia resistant in somatic hybrids of Citrus unshiu and Citrus nobilis using resistance gene analogue (RGA). **Journal of Agriculture and Veterinary Science**, v. 7, n. 1, p. 61–70, 2014.
- RAMOS, Y. C.; STUCHI, E. S.; GIRARDI, E. A. *et al.* Dwarfing rootstocks for “Valencia” sweet orange. **Acta Horticulturae**, v.1065, p. 351–354, 2015.
- RIBEIRO, R. V.; ESPINOZA-NÚÑEZ, E.; JUNIOR, J. P.; MOURÃO FILHO, F. A. A.; MACHADO, E. C. Citrus rootstocks for improving the horticultural performance and physiological responses under constraining environments. In: P. Ahmad; M. Wani; M. Azooz; LS. Tran (Orgs.); **Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes**. v. 1, p.1–37, 2014. New York: Springer.
- RODRÍGUEZ-GAMIR, J.; INTRIGLIOLO, D. S.; PRIMO-MILLO, E.; FORNER-GINER, M. A. Relationships between xylem anatomy, root hydraulic conductivity, leaf/root ratio and transpiration in citrus trees on different rootstocks. **Physiologia Plantarum**, v. 139, n. 2, p. 159–169, 2010.

- RUI, Y.; XIAO, C.; YI, H.; KANDEMIR, B.; WANG, J. Z.; PURI, V. M.; ANDERSON, C. T. POLYGALACTURONASE INVOLVED IN EXPANSION3 Functions in Seedling Development, Rosette Growth, and Stomatal Dynamics in *Arabidopsis thaliana*. **The Plant Cell**, v. 29, n. 10, p. 2413–2432, 2017.
- SAEED, M.; DODD, P. B.; SOHAIL, L. Anatomical studies of stems, roots and leaves of selected citrus rootstock varieties in relation to their vigour. **Journal of Horticulture and Forestry**, v. 2, n. 4, p. 87–94, 2010.
- SAFRAN, J. *et al.* Plant polygalacturonase structures specify enzyme dynamics and processivities to fine-tune cell wall pectins. **The Plant Cell**, v. 35, n. 8, p. 3073–3091, 2023.
- SANTANA-VIEIRA, D. D. S.; FRESCHI, L.; DA HORA ALMEIDA, L. A.; MORAES, D. H. S. de; NEVES, D. M.; DOS SANTOS, L. M.; BERTOLDE, F. Z.; SOARES FILHO, W. D. S.; COELHO FILHO, M. A.; GESTEIRA, A. D. S. Survival strategies of citrus rootstocks subjected to drought. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 38775-, 2016.
- SANTINI-GAZAFFI, L.; GAZAFFI, R.; AQUINO, S. O.; GRATTAPAGLIA, D.; BASTIANEL, M.; CRISTOFANI-YALY, M.; MACHADO, M. A. Multi-platform genetic mapping reveals QTLs associated with HLB response in *Citrus sunki* × *Poncirus trifoliata* *Front. Plant Sci.* [Submitted].
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. 356p. Brasília: EMBRAPA. 2018.
- SCHINOR, E. H.; CRISTOFANI-YALY, M.; BASTIANEL, M.; MACHADO, M. A. Sunki Mandarin vs *Poncirus trifoliata* Hybrids as Rootstocks for Pera Sweet Orange. **Journal of Agricultural Science**, v. 5, n. 6, p. 190–200, 2013.
- SCHNEEBERGER, K. Using next-generation sequencing to isolate mutant genes from forward genetic screens. **Nature Reviews Genetics**, v. 15, n. 10, p. 662–676, 2014.
- SEKHWAL, M. K.; LI, P.; LAM, I.; WANG, X.; CLOUTIER, S.; YOU, F. M. Disease Resistance Gene Analogs (RGAs) in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 8, p. 19248–19290, 2015.
- SILVA, L. N.; VITÓRIA, M. F.; MOREIRA, A. S.; GIRARDI, E. A.; STUCHI, E. S. IAC 1711 citrandarin, tetraploid citranges and Flying Dragon trifoliolate as potential graft-compatible rootstocks for Pera IAC sweet orange tree. **Bragantia**, v. 84, p. e20240094, 2025.
- SILVA, V. R. D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1097-1104, 2009.
- SONG, J.; LI, Z.; LIU, Z.; GUO, Y.; QIU, L. J. Next-Generation Sequencing from Bulk-Segregant Analysis Accelerates the Simultaneous Identification of Two Qualitative Genes in Soybean. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 919, 2017.

- SORATTO, T. A. T.; CURTOLO, M.; MARENGO, S. *et al.* QTL and eQTL mapping associated with host response to *Candidatus Liberibacter asiaticus* in citrandarins. **Tropical Plant Pathology**, v. 45, n. 6, p. 626–645, 2020.
- SOUSA, A. R. O.; SILVA, E. M. A.; COELHO FILHO, M. A. *et al.* Metabolic responses to drought stress and rehydration in leaves and roots of three Citrus scion/rootstock combinations. **Scientia Horticulturae**, v. 292, n. 069, p. 110490, 2022.
- STUCHI, E. S. Controle do tamanho de plantas cítricas. **Citrus Research & Technology**, v. 33, n. 2, p. 91–112, 2012.
- STUCHI, E. S.; DONADIO, L. C.; SEMPIONATO, O. R. Drought sensibility of “Folha Murcha” sweet orange on ten rootstocks. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 22, n. 3, p. 454–457, 2000.
- STUCHI, E. S.; DONADIO, L. C.; SEMPIONATO, O. R. Performance of Tahiti lime on *Poncirus trifoliata* var. *monstrosa* Flying Dragon in four densities. **Fruits**, v. 58, n. 1, p. 13–17, 2003.
- STUCHI, E. S.; GIRARDI, E. A.; SEMPIONATO, O. R. *et al.* Trifoliata “Flying Dragon”: Porta-enxerto para plantios adensados e irrigados de laranjeiras doces de alta produtividade e sustentabilidade. Cruz da Almas: **Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 2012.
- STURGEON, C. M.; ZANGHI, N.; SMITH, H. M.; DAVIS, E. K.; ROBINSON, M. R.; CABRERA, E.; HOLBROOK, M. C.; SEGARRA, V. A. YML018C protein localizes to the vacuolar membrane independently of Atg27p. **microPublication Biology**, 2021.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6º ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TAKAGI, H.; TAMIRU, M.; ABE, A. *et al.* MutMap accelerates breeding of a salt-tolerant rice cultivar. **Nature Biotechnology**, v. 33, n. 5, p. 445–449, 2015.
- TAKAGI, H. *et al.* QTL-seq: Rapid mapping of quantitative trait loci in rice by whole genome resequencing of DNA from two bulked populations. **Plant Journal**, v. 74, n. 1, p. 174–183, 2013.
- UMEZAWA, T.; YOSHIDA, R.; MARUYAMA, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. SRK2C, a SNF1-related protein kinase 2, improves drought tolerance by controlling stress-responsive gene expression in *Arabidopsis thaliana*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 101, n. 49, p. 17306–17311, 2004.
- VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D.; VENABLES, W. N. **Modern applied statistics with S**, 4th ed. New York: Springer. 2002. Disponível em: <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>
- WANG, G.; ELLENDORFF, U.; KEMP, B.; MANSFIELD, J. W.; FORSYTH, A., MITCHELL, K. *et al.* A Genome-Wide Functional Investigation into the Roles of Receptor-Like Proteins in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, v. 147, n. 2, p. 503–517, 2008.
- WU, Y.; KUZMA, J.; MARÉCHAL, E.; GRAEFF, R.; LEE, H. C.; FOSTER, R.; CHUA, N. H. Absciscic Acid Signaling Through Cyclic ADP-Ribose in Plants. **Science**, v. 278, n. 5346, p. 2126–2130, 1997.

XU, K.; WU, N.; YAO, W.; LI, X.; ZHOU, Y.; LI, H. The Biological Function and Roles in Phytohormone Signaling of the F-Box Protein in Plants. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2360, 2021.

XU, X.; ZHAN'AO, D.; QIFA, Z.; CHEN, C.; GMITTER, F. G. J. Developing Specific Markers and Improving Genetic Mapping for a Major Locus Tyr1 of Citrus Nematode Resistance. **Bioscience Methods**, v. 1, n. 1, p. 497–504, 2010.

XU, Y. J.; LUO, T.; ZHOU, P. M.; WANG, W. Q.; YANG, W. C.; LI, H. J. Pollen-expressed RLCKs control pollen tube burst. **Plant Communications**, v. 5, n. 8, 2024.

ZHANG, Z.; ZOU, W.; LIN, P.; WANG, Z.; CHEN, Y.; YANG, X.; ZHAO, W.; ZHANG, Y.; WANG, D.; QUE, Y.; WU, Q. Evolution and Function of MADS-Box Transcription Factors in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 24, p. 13278, 2024.

ZHENG, W.; WANG, Y.; WANG, L.; et al. Genetic mapping and molecular marker development for Pi65(t), a novel broad-spectrum resistance gene to rice blast using next-generation sequencing. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 129, n. 5, p. 1035–1044, 2016.

APÊNDICE

Tabela S1: Produção por planta (kg planta⁻¹) e produção acumulada de cinco safras de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos. Barretos e Gavião Peixoto, SP.

PE	19-20		20-21		21-22		22-23		23-24		kg pl ⁻¹ Acumulada	
	BA	GP	BA	GP	BA	GP	BA	GP	BA	GP	BA	GP
H18	79,58	97,50	51,75	24,17	61,67	35,92	106,00	108,00	45,33	38,13	344,33	303,72
H26	44,69	32,11	39,39	16,59	25,33	35,93	35,63	49,94	34,33	15,45	179,38	150,03
H47	86,50	74,43	54,83	28,63	56,11	45,35	88,67	131,22	40,00	30,55	326,10	310,18
H68	67,55	42,17	56,95	25,67	42,86	52,00	49,67	78,91	68,00	25,85	285,02	224,59
H70	82,31	85,30	52,39	23,07	50,87	48,46	98,28	121,28	42,33	27,40	326,19	305,51
H73	78,43	57,00	78,62	28,00	57,14	34,83	71,24	56,00	45,00	17,88	330,43	193,71
H110	56,91	37,85	51,03	29,66	43,42	44,21	35,82	83,05	72,67	23,58	259,85	218,34
H124	87,00	109,89	43,22	20,11	100,00	30,83	100,56	38,00	39,67	40,10	370,44	238,93
H128	78,13	100,54	48,39	11,33	68,75	34,56	111,29	139,06	66,33	36,93	372,90	322,43
H137	51,40	36,73	52,35	13,47	47,33	29,60	55,80	68,75	57,67	13,43	264,55	161,98
H139	80,80	78,53	44,23	40,31	56,67	26,92	141,40	97,83	57,67	22,80	380,77	266,39
H148	65,42	45,52	45,58	24,51	49,42	30,75	78,46	104,19	86,00	34,14	324,88	239,10
H150	95,78	81,67	52,06	32,33	58,89	48,33	49,00	109,50	54,67	67,40	310,39	339,23
H151	80,26	83,14	55,24	29,38	49,33	10,26	97,05	125,63	40,33	34,83	322,21	283,24
H152	73,29	67,00	46,37	36,64	49,73	42,33	83,13	117,10	54,00	32,73	306,52	295,80
H248	77,59	87,33	48,13	20,56	60,00	26,28	89,78	134,25	36,33	26,12	311,83	294,53
H299	68,11	86,56	36,04	26,27	77,19	47,53	93,42	126,84	52,33	21,30	327,09	308,50
IAC 1697	89,83	104,44	30,87	31,22	67,78	56,00	101,33	147,73	82,00	34,83	371,81	374,23
SW	59,68	100,87	32,81	19,45	72,08	44,23	88,38	182,72	76,33	36,88	329,29	384,15
W2	85,76	92,33	41,35	20,24	77,63	37,23	89,53	134,55	40,67	29,52	334,94	313,86

Tabela S2: Produtividade ajustada (t ha⁻¹) e produtividade acumulada de cinco safras de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos. Barretos e Gavião Peixoto, SP.

PE	19-20		20-21		21-22		22-23		23-24		t ha ⁻¹ Acumulada	
	BA	GP	BA	GP	BA	GP	BA	GP	BA	GP	BA	GP
H18	46,26	59,20	27,64	12,39	29,22	17,02	47,3	49,8	18,1	17,2	168,4	155,6
H26	40,15	47,57	30,26	20,04	18,52	38,33	24,4	46,6	40,7	20,8	154,0	173,4
H47	69,90	60,14	38,19	20,93	35,63	31,59	49,4	77,3	20,1	15,7	213,2	205,6
H68	67,92	42,40	48,49	20,74	32,92	39,94	35,3	52,4	42,8	22,4	227,4	177,9
H70	66,52	47,51	36,50	11,83	32,30	22,96	51,6	53,3	20,6	15,3	207,5	150,8
H73	57,33	57,32	52,26	25,16	34,70	28,15	39,7	43,7	31,9	16,1	215,8	170,3
H110	57,22	30,58	45,85	22,78	33,35	32,32	25,2	52,0	44,8	22,8	206,4	160,5
H124	60,61	58,70	26,24	10,31	55,69	15,19	51,6	17,5	19,6	19,0	213,8	120,7
H128	45,41	56,00	25,85	5,37	31,35	14,63	47,8	54,2	32,7	17,5	183,1	147,7
H137	51,68	44,36	47,03	15,27	38,25	31,57	38,1	57,6	43,6	12,5	218,7	161,3
H139	45,00	49,86	20,96	22,45	24,89	13,80	57,7	48,8	24,1	16,7	172,7	151,6
H148	62,13	40,90	35,01	17,92	34,42	21,42	48,9	67,1	49,3	25,8	229,8	173,1
H150	123,50	65,99	52,34	21,49	52,91	30,69	38,8	62,8	33,2	47,7	300,7	228,7
H151	85,61	70,79	42,43	18,65	34,37	5,96	61,6	70,0	21,8	23,2	245,9	188,5
H152	73,70	44,53	37,47	20,40	36,35	21,71	56,8	55,5	30,1	17,2	234,4	159,4
H248	78,02	58,05	43,25	11,45	48,48	13,48	65,6	63,6	17,2	11,8	252,6	158,3
H299	68,48	57,53	32,38	14,03	62,38	24,37	68,3	63,2	27,6	13,7	259,1	172,9
IAC 1697	90,33	58,17	27,73	15,38	52,06	26,53	72,6	64,9	36,9	15,7	279,7	180,7
SW	63,66	53,88	27,94	8,87	55,36	18,06	65,9	62,2	43,7	20,0	256,6	163,0
W2	69,30	47,35	28,81	8,89	49,29	15,76	54,4	54,9	20,9	16,0	222,6	142,9

Tabela S3: Produtividade de laranja Pera em kg por planta (Kg planta⁻¹), caixas por planta (cx p⁻¹) caixas por hectare (cx ha⁻¹), eficiência produtiva e produtividade por hectare ajustado em Barretos- SP. Safra de 2023-2024.

PE	Kg planta ⁻¹		Kg ha ⁻¹ ajustado		cx pl ⁻¹		cx ha ⁻¹		cx ha ⁻¹ ajustado		t pl ⁻¹		t ha ⁻¹		t ha ⁻¹ ajustado		Eficiência Produtiva (kg m ⁻³)
H18	45,33	b	18605,09	b	1,11	b	653,59	b	456,01	b	0,05	b	26,66	b	18,61	b	1,37 b
H26	34,33	b	43050,20	a	0,84	b	495,00	b	1055,15	a	0,03	b	20,20	b	43,05	a	8,37 a
H47	40,00	b	21195,00	b	0,98	b	576,70	b	519,48	b	0,04	b	23,53	b	21,20	b	1,47 b
H68	68,00	a	42586,95	a	1,67	a	980,39	a	1043,80	a	0,07	a	40,00	a	42,59	a	9,13 a
H70	42,33	b	20994,42	b	1,03	b	610,34	b	514,57	b	0,04	b	24,90	b	20,99	b	1,93 b
H73	45,00	b	32173,83	b	1,10	b	648,79	b	788,57	b	0,05	b	26,47	b	32,17	b	5,57 a
H110	72,67	a	46644,33	a	1,78	a	1047,67	a	1143,24	a	0,07	a	42,74	a	46,64	a	9,60 a
H124	39,67	b	19595,16	b	0,97	b	571,90	b	480,27	b	0,04	b	23,33	b	19,60	b	1,50 b
H128	66,33	a	33295,87	b	1,63	a	956,36	a	816,07	b	0,07	a	39,02	a	33,30	b	2,17 b
H137	57,67	b	44155,59	a	1,42	b	831,41	b	1082,24	a	0,06	b	33,92	b	44,15	a	7,13 a
H139	57,67	b	24350,92	b	1,41	b	831,41	b	596,84	b	0,06	b	33,92	b	24,35	b	4,10 b
H148	86,00	a	49237,40	a	2,11	a	1239,91	a	1206,80	a	0,09	a	50,59	a	49,24	a	6,70 a
H150	40,33	b	25306,32	b	0,99	b	581,51	b	620,25	b	0,04	b	23,72	b	25,31	b	2,87 b
H151	54,67	b	30932,96	b	1,34	b	788,16	b	758,16	b	0,05	b	32,16	b	30,93	b	3,40 b
H152	54,00	b	30453,21	b	1,32	b	778,54	b	746,40	b	0,05	b	31,77	b	30,45	b	2,17 b
H248	36,33	b	17016,63	b	0,89	b	523,84	b	417,07	b	0,04	b	21,37	b	17,02	b	1,93 b
H299	52,33	b	27823,12	b	1,28	b	754,52	b	681,94	b	0,05	b	30,79	b	27,83	b	2,80 b
IAC 1697	82,00	a	38315,71	a	2,01	a	1182,24	a	939,11	a	0,08	a	48,23	a	38,32	a	2,97 b
SW	76,33	a	43860,49	a	1,87	a	1100,54	a	1075,01	a	0,08	a	44,90	a	43,86	a	2,90 b
W2	40,67	b	20513,27	b	1,00	b	586,31	b	502,78	b	0,04	b	23,92	b	20,51	b	1,60 b
CV (%)	35,28		42,01		35,3		35,28		42,01		35,28		35,28		42,01		48,07

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott (p> 0,05).

Tabela S4: Produtividade de laranja Pera em kg por planta (Kg planta⁻¹), caixas por planta (cx pl⁻¹) caixas por hectare (cx ha⁻¹), eficiência produtiva e produtividade por hectare ajustado em Gavião Peixoto - SP. Safra de 2023-2024.

PE	Kg planta ⁻¹		Kg ha ⁻¹ ajustado		cx pl ⁻¹		cx ha ⁻¹		cx ha ⁻¹ ajustado		t pl ⁻¹		t ha ⁻¹		t ha ⁻¹ ajustado		Eficiência a Produtiva (kg m ⁻³)
H18	38,13	b	17124,45	b	0,93	b	598,17	b	419,72	b	0,04	b	24,41	b	17,13	b	1,12 b
H26	15,45	c	21734,30	b	0,38	c	242,35	c	532,70	b	0,02	c	9,89	c	21,73	b	3,90 a
H47	30,55	b	15985,94	b	0,75	b	479,22	b	391,81	b	0,03	b	19,55	b	15,99	b	1,17 b
H68	25,85	c	22748,88	b	0,63	c	405,49	c	557,57	b	0,03	c	16,54	c	22,75	b	3,32 a
H70	27,40	c	15347,09	b	0,67	c	429,80	c	376,15	b	0,03	c	17,54	c	15,35	b	1,19 b
H73	17,88	c	16312,52	b	0,44	c	280,39	c	399,82	b	0,02	c	11,44	c	16,31	b	2,19 b
H110	23,58	c	22923,29	b	0,58	c	369,80	c	561,84	b	0,02	c	15,09	c	22,92	b	3,41 a
H124	40,10	b	19185,13	b	0,98	b	629,02	b	470,22	b	0,04	b	25,66	b	19,18	b	1,43 b
H128	36,93	b	17645,94	b	0,91	b	579,22	b	432,50	b	0,04	b	23,63	b	17,65	b	1,25 b
H137	13,43	c	12740,73	b	0,33	c	210,72	c	312,27	b	0,01	c	8,60	c	12,74	b	1,68 b
H139	22,80	c	16880,02	b	0,56	c	357,65	c	413,72	b	0,02	c	14,59	c	16,88	b	1,65 b
H148	34,14	b	27894,94	b	0,84	b	535,49	b	683,70	b	0,03	b	21,85	b	27,89	b	2,81 a
H150	67,40	a	47322,07	a	1,65	a	1057,25	a	1159,85	a	0,07	a	43,14	a	47,32	a	4,91 a
H151	34,83	b	23442,09	b	0,85	b	546,41	b	574,56	b	0,03	b	22,29	b	23,44	b	2,36 b
H152	32,73	b	17278,03	b	0,80	b	513,46	b	423,48	b	0,03	b	20,95	b	17,28	b	1,28 b
H248	26,12	c	17390,44	b	0,64	c	409,67	c	426,23	b	0,03	c	16,71	c	17,39	b	1,40 b
H299	21,30	c	14234,17	b	0,52	c	334,12	c	348,88	b	0,02	c	13,63	c	14,23	b	1,13 b
IAC 1697	34,83	b	15693,26	b	0,85	b	546,41	b	384,64	b	0,04	b	22,29	b	15,69	b	1,24 b
SW	36,88	b	20328,91	b	0,90	b	578,56	b	498,26	b	0,04	b	23,61	b	20,33	b	1,39 b
W2	29,52	b	16254,64	b	0,72	b	463,01	b	398,40	b	0,03	b	18,89	b	16,25	b	1,11 b
CV %	32,48		41,39		32,55		32,48		41,39		32,19		32,48		41,39		48,65

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott (p> 0,05).

Tabela S5. Massa (M), rendimento do suco (RS), acidez titulável, sólidos solúveis totais (SST) e Ratio (SST/AT) e índice tecnológico (IT) dos frutos de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos (PE). Barretos-SP, 2024.

PE	Massa (g)	Acidez (g/100 mL ⁻¹)	SST (°Brix)	Ratio	IT (kg/cx)	RS %(m/m)
H18	222,1 b	0,58 a	9,73 b	16,97 b	2,09 b	52,37 a
H26	236,7 a	0,63 a	10,73 a	17,07 b	2,28 a	51,80 a
H47	217,9 b	0,59 a	10,20 a	17,43 b	2,27 a	54,53 a
H68	221,9 b	0,51 a	9,47 b	18,70 a	2,03 b	52,40 a
H70	216,7 b	0,58 a	9,37 b	16,27 b	1,94 b	50,53 b
H73	200,7 b	0,56 a	10,23 a	18,47 a	2,31 a	55,27 a
H110	247,8 a	0,55 a	9,30 b	17,10 b	2,00 b	52,63 a
H124	250,0 a	0,54 a	9,33 b	17,50 b	1,90 b	49,70 b
H128	221,7 b	0,52 a	9,97 a	19,53 a	2,19 a	53,93 a
H137	246,0 a	0,66 a	9,97 a	15,30 b	2,13 a	52,27 a
H139	242,1 a	0,53 a	8,63 c	16,33 b	1,74 b	49,40 b
H148	195,7 b	0,58 a	10,27 a	17,63 b	2,16 a	51,50 b
H150	217,9 b	0,52 a	10,10 a	19,33 a	2,04 b	49,43 b
H151	214,0 b	0,54 a	10,20 a	19,20 a	2,26 a	54,36 a
H152	222,9 b	0,56 a	9,37 b	16,67 b	2,04 b	53,33 a
H248	218,8 b	0,56 a	9,77 b	17,40 b	2,04 b	51,03 b
H299	216,0 b	0,56 a	10,17 a	18,17 a	2,18 a	52,60 a
IAC 1697	210,2 b	0,49 a	9,67 b	19,77 a	2,05 b	52,03 a
SW	203,8 b	0,54 a	10,43 a	19,40 a	2,31 a	54,17 a
W2	214,8 b	0,55 a	9,53 b	17,53 b	1,95 b	50,03 b
CV%	5,48	8,29	2,72	7,56	5,39	0,99

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$).

Tabela S6. Massa (M), rendimento do suco (RS), acidez titulável, sólidos solúveis totais (SST) e Ratio (SST/AT) e índice tecnológico (IT) dos frutos de laranja Pera enxertada em 20 porta-enxertos (PE). Gavião Peixoto-SP, 2024.

PE	Massa (g)	Acidez (g/100mL ⁻¹)	SST (°Brix)	Ratio	IT (kg/cx)	RS %(m/m)
H18	218,0 b	0,53 b	13,40 c	25,40 a	2,81 b	51,47 b
H26	192,7 b	0,79 a	15,57 a	20,00 b	3,18 a	50,13 c
H47	229,3 a	0,66 a	14,70 b	22,27 a	3,02 a	50,27 c
H68	239,7 a	0,78 a	14,13 b	18,70 b	2,9 b	50,50 c
H70	254,0 a	0,90 a	13,37 c	15,47 b	2,61 c	47,77 c
H73	235,7 a	0,61 b	13,37 c	22,23 a	2,88 b	52,77 b
H110	230,7 a	0,61 b	11,90 d	19,83 b	2,34 d	48,17 c
H124	210,7 b	0,68 a	12,30 d	20,00 b	2,73 b	54,27 b
H128	250,7 a	0,57 b	12,40 d	21,70 a	2,6 c	51,40 b
H137	254,7 a	0,72 a	14,33 b	19,97 b	3,07 a	52,47 b
H139	248,0 a	0,71 a	13,30 c	19,47 b	2,63 c	48,40 c
H148	219,7 b	0,53 b	13,00 c	24,67 a	2,7 c	50,87 b
H150	200,0 b	0,63 a	14,43 b	23,53 a	3,08 a	52,23 b
H151	239,3 a	0,69 a	14,00 b	20,20 b	2,94 b	51,27 b
H152	221,0 b	0,52 b	11,67 d	22,60 a	2,46 c	51,67 b
H248	233,7 a	0,72 a	13,53 c	19,17 b	2,92 b	52,77 b
H299	227,7 a	0,65 a	13,37 c	20,67 b	2,83 b	51,77 b
IAC 1697	219,0 b	0,81 a	13,60 c	17,17 b	2,84 b	51,17 b
SW	208,7 b	0,64 a	14,53 b	22,93 a	3,21 a	54,00 a

W2	223,7 b	0,42 b	11,50 d	27,63 a	2,24 d	47,77 c
CV %	7,3	6,86	4,27	13,81	4,22	4,02

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$).

Tabela S7. Potencial de água (MPa) na folha de laranja Pera em 20 porta-enxertos: Em Gavião Peixoto (GP) e Barretos (BA), SP, 2022-2025.

PE	2022		2025		Média	
	BA	GP	BA	GP	BA	GP
H18	-1,40 b	-1,55 b	-2,33 c	-1,10 a	-1,87 b	-1,33 b
H26	-1,03 a	-1,60 b	-2,23 c	-1,57 b	-1,63 b	-1,58 c
H47	-1,53 c	-1,73 b	-1,93 c	-1,43 b	-1,73 b	-1,58 c
H68	-1,24 a	-1,58 b	-1,56 b	-1,73 c	-1,40 a	-1,66 c
H70	-1,77 c	-1,20 a	-1,83 b	-1,07 a	-1,80 b	-1,13 a
H73	-1,32 b	-1,55 b	-2,27 c	-1,23 a	-1,79 b	-1,39 b
H110	-1,42 b	-1,07 a	-1,47 b	-1,17 a	-1,44 a	-1,12 a
H124	-1,57 c	-1,55 b	-2,25 c	-1,33 a	-1,91 b	-1,44 b
H128	-1,77 c	-1,47 b	-1,70 b	-1,65 b	-1,73 b	-1,56 c
H137	-1,10 a	-1,35 a	-1,80 b	-1,22 a	-1,45 a	-1,28 b
H139	-1,32 b	-1,38 a	-2,23 c	-1,58 b	-1,78 b	-1,48 c
H148	-0,87 a	-1,85 b	-1,60 b	-1,43 b	-1,23 a	-1,64 c
H150	-0,80 a	-1,70 b	-1,80 b	-1,50 b	-1,30 a	-1,60 c
H151	-1,17 a	-1,78 b	-1,80 b	-0,95 a	-1,48 a	-1,37 b
H152	-1,21 a	-1,02 a	-1,10 a	-1,18 a	-1,16 a	-1,10 a
H248	-1,33 b	-1,58 b	-1,56 b	-1,07 a	-1,45 a	-1,33 b
H299	-1,33 b	-1,68 b	-2,13 c	-1,55 b	-1,73 b	-1,62 c
IAC 1697	-1,02 a	-1,45 b	-1,67 b	-1,83 c	-1,34 a	-1,64 c
SW	-1,53 c	-1,65 b	-1,17 a	-1,80 c	-1,35 a	-1,73 c
W2	-1,53 c	-1,70 b	-1,97 c	-1,93 c	-1,75 b	-1,82 c
CV %	10,06					

Médias seguidas da mesma letra minúscula entre porta-enxerto e maiúscula no mesmo porta-enxerto entre cidades, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$).

Tabela S8. Lista de termos GO associados a marcadores moleculares DArTseq em citrandarins.

DArTseq	GO IDs	GO Names	InterPro GO IDs	InterPro GO Names
Marcadores putativamente associados à tolerância à seca				
100022068 F 0			no IPS match	no IPS match
100096770 F 0			no IPS match	no IPS match
100041380 F 0	P:GO:0006355; F:GO:0003677; F:GO:0003700; C:GO:0005634	P:regulation of DNA-templated transcription; F:DNA binding; F:DNA-binding transcription factor activity; C:nucleus	no GO terms	no GO terms
100013971 F 0			no IPS match	no IPS match
100037498 F 0			F:GO:0003676; F:GO:0004523	F:nucleic acid binding; F:RNA-DNA hybrid

100013222 F 0			P:GO:0006633; F:GO:0004315; F:GO:0016746; C:GO:0005739; C:GO:0009570	ribonuclease activity P:fatty acid biosynthetic process; F:3- oxoacyl-[acyl- carrier-protein] synthase activity; F:acyltransferase activity; C:mitochondrion; C:chloroplast stroma
100013222 F 0	F:GO:0016740	F:transferase activity	no IPS match	no IPS match
100015847 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	no GO terms	no GO terms
100006893 F 0	P:GO:0006952; P:GO:0051707; F:GO:0043531	P:defense response; P:response to other organism; F:ADP binding	F:GO:0043531	F:ADP binding
100077072 F 0	P:GO:0006952; P:GO:0051707; F:GO:0043531	P:defense response; P:response to other organism; F:ADP binding	F:GO:0043531	F:ADP binding
100005347 F 0	P:GO:0006952; P:GO:0051707; F:GO:0043531	P:defense response; P:response to other organism; F:ADP binding	F:GO:0043531	F:ADP binding
100003221 F 0	P:GO:0006952; F:GO:0043531	P:defense response; F:ADP binding	F:GO:0043531	F:ADP binding
100027355 F 0	P:GO:0015074; F:GO:0003676; F:GO:0004190	P:DNA integration; F:nucleic acid binding; F:aspartic-type endopeptidase activity	P:GO:0015074; F:GO:0003676	P:DNA integration; F:nucleic acid binding
100075640 F 0	P:GO:0051707; F:GO:0003973; F:GO:0010181; C:GO:0005777	P:response to other organism; F:(S)-2- hydroxy-acid oxidase activity; F:FMN binding; C:peroxisome	F:GO:0016491	F:oxidoreductase activity
100090073 F 0			no GO terms	no GO terms
100073880 F 0			P:GO:0006633; F:GO:0004315; F:GO:0016746; C:GO:0005739; C:GO:0009570	P:fatty acid biosynthetic process; F:3- oxoacyl-[acyl- carrier-protein] synthase activity; F:acyltransferase activity; C:mitochondrion; C:chloroplast stroma

100018364 F 0	P:GO:0009058; P:GO:0042853; F:GO:0004021; F:GO:0030170	P:biosynthetic process; P:L-alanine catabolic process; F:L-alanine:2- oxoglutarate aminotransferase activity; F:pyridoxal phosphate binding	F:GO:0004021; F:GO:0008483	F:L-alanine:2- oxoglutarate aminotransferase activity; F:transaminase activity
100114841 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	C:GO:0016020	C:membrane
100144000 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	C:GO:0016020	C:membrane
100171408 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	C:GO:0016020	C:membrane
100189383 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	C:GO:0016020	C:membrane
Marcadores putativamente associados ao porte ananicante				
100053083 F 0	P:GO:0009903; P:GO:0009904; C:GO:0005829	P:chloroplast avoidance movement; P:chloroplast accumulation movement; C:cytosol	no IPS match	no IPS match
100029500 F 0			no IPS match	no IPS match
100049725 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	no GO terms	no GO terms
100033623 F 0	C:GO:0016020	C:membrane	no GO terms	no GO terms
100046105 F 0			F:GO:0005515; C:GO:0005739	F:protein binding; C:mitochondrion
100173840 F 0	F:GO:0016788	F:hydrolase activity, acting on ester bonds	F:GO:0016788	F:hydrolase activity, acting on ester bonds
100032928 F 0	F:GO:0016788	F:hydrolase activity, acting on ester bonds	no GO terms	no GO terms
100038875 F 0	P:GO:0006621; P:GO:0015031; P:GO:0016192; F:GO:0046923; C:GO:0005789	P:protein retention in ER lumen; P:protein transport; P:vesicle- mediated transport; F:ER retention sequence binding; C:endoplasmic reticulum membrane	P:GO:0006621; F:GO:0046923; C:GO:0016020	P:protein retention in ER lumen; F:ER retention sequence binding; C:membrane
100046408 F 0			no GO terms	no GO terms
100037739 F 0	P:GO:0006004; F:GO:0016757; C:GO:0016020	P:fucose metabolic process; F:glycosyltransferase activity; C:membrane	no GO terms	no GO terms