



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – ICIAG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGAGRO

FERNANDA GABRIELA TEIXEIRA COELHO

Dissimilaridade genética e dialelos em cenoura por meio da análise de caracteres agronômicos e
fenotipagem por imagem

Uberlândia
2024

FERNANDA GABRIELA TEIXEIRA COELHO

Dissimilaridade genética e dialelos em cenoura por meio da análise de caracteres agronômicos e fenotipagem por imagem

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de Doutora.

Área de concentração: Fitotecnia

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mascarenhas Maciel

Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C672
2024

Coelho, Fernanda Gabriela Teixeira, 1991-
Dissimilaridade genética e dialelos em cenoura por
meio da análise de caracteres agronômicos e fenotipagem
por imagem [recurso eletrônico] / Fernanda Gabriela
Teixeira Coelho. - 2024.

Orientador: Gabriel Mascarenhas Maciel.

Coorientador: Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.342>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Maciel, Gabriel Mascarenhas ,1982-,
(Orient.). II. Gallis, Rodrigo Bezerra de Araújo ,1977-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 002/2024, PPGAGRO				
Data:	Vinte e oito de fevereiro de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	11913AGR014				
Nome do Discente:	Fernanda Gabriela Teixeira Coelho				
Título do Trabalho:	DISSIMILARIDADE GENÉTICA E DIALELOS EM CENOURA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE CARACTERES AGRONÔMICOS E FENOTIPAGEM POR IMAGEM				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Melhoramento de Plantas				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Ana Carolina Silva Siquieroli - UFU; José Magno Queiroz Luz - UFU; Amilton Ferreira da Silva - UFSJ; Nádia Nardely Lacerda Durães Parrella - UFSJ; Gabriel Mascarenhas Maciel - UFU orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Gabriel Mascarenhas Maciel - UFU, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Mascarenhas Maciel, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2024, às 13:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Carolina Silva Siquieroli, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2024, às 13:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Magno Queiroz Luz, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2024, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nádia Nardely Lacerda Durães Parrella, Usuário Externo**, em 28/02/2024, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Amilton Ferreira da Silva, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5168960** e o código CRC **E439CFF4**.

FERNANDA GABRIELA TEIXEIRA COELHO

Dissimilaridade genética e dialelos em cenoura por meio da análise de caracteres agronômicos e fenotipagem por imagem

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de Doutora.

Área de concentração: Fitotecnia

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:

Dr. Amilton Ferreira da Silva – UFSJ

Dr^a. Nádia Nardely Lacerda Durães Parrela – UFSJ

Dr^a. Ana Carolina Silva Siquieroli - UFU

Dr. José Magno Queiroz Luz – UFU

Dr. Gabriel Mascarenhas Maciel - UFU

*Trabalha com alegria, com paz, com presença de
Deus. – Desta maneira, além disso, realizarás
uma tarefa com bom senso: hás de levá-la até ao
fim, ainda que morto de cansaço, hás de acabá-la
bem..., e tuas obras agradarão a Deus.*

(São Josemaria Escrivá - Caminho, 744)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar minha vida e me conceder as virtudes necessárias para cumprir este trabalho. A Santo Expedito, por ouvir minhas preces nos momentos mais difíceis.

Ao Gustavo, meu esposo, por ser a pessoa mais incrível do mundo e estar sempre ao meu lado, juntamente com nossas amadas filhas Maria e Madalena, tornando essa jornada mais extraordinária. Também à minha família e à família do meu esposo, pelo cuidado e carinho.

Ao professor Gabriel, pela confiança, pelo grande conhecimento transmitido e por toda a genuína atenção e orientação nesse doutorado.

À professora Ana Carolina e ao professor Rodrigo, por todo apoio, pelas excelentes contribuições e pelos ensinamentos. E à professora Ana Paula, pela imensa ajuda e colaboração.

À Camila, pelo enorme auxílio nas análises estatísticas, sempre com muita alegria e disponibilidade.

À Ângela e à Érica, por todo apoio psicológico e espiritual, por me lembrarem sempre do que é mais importante e do propósito de cada coisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e à Universidade Federal de Uberlândia, pelo suporte acadêmico, pela oportunidade de realizar o curso de Doutorado, pelas instalações e serviços prestados. A todos os docentes, obrigada pelos ensinamentos e contribuição científica.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade de participação e contribuição na melhoria do trabalho.

Aos alunos de graduação e pós-graduação e aos funcionários do Grupo de Estudos em Melhoramento Genético de Hortaliças (GEN-HORT) da UFU.

À Bayer, aos meus gestores e colegas de trabalho, que permitiram e validaram esse trabalho.

A todos vocês, muito obrigada!

RESUMO

COELHO, Fernanda Gabriela Teixeira. **Dissimilaridade genética e dialelos em cenoura por meio da análise de caracteres agronômicos e fenotipagem por imagem.** 2024, 57p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.¹¹

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma hortaliça da família Apiaceae e destaca-se por possuir grande importância econômica global em termos de área de produção, valor de mercado e composição nutricional. Entretanto, os estudos sobre cenoura, principalmente em clima tropical, ainda são limitados. Diante disso, objetivou-se identificar grupos heteróticos e genitores de cenoura tropical com grande capacidade de combinação na exploração de híbridos através de avaliações agronômicas e fenotipagem por imagem. Os experimentos foram realizados no município de Carandaí-MG. Foram avaliadas 57 entradas de cenoura tropical da Seminis (Brasil) e três variedades comerciais. Foi realizada a avaliação agronômica e dois voos com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), antes e após a colheita. Depois, foram selecionadas 5 entradas de cenoura nas suas versões fértil e macho-estéril, que passaram por cruzamentos em modelo dialélico balanceado (5 x 4). Os híbridos, genitores e três entradas comerciais como testemunhas foram avaliados no verão dos anos 2020/2021 e 2021/2022. Observou-se a existência de variabilidade genética entre as entradas de cenoura tropical e a formação de 6 grupos por meio de rede neural artificial pelo mapa auto-organizável de Kohonen. Os índices de vegetação calculados a partir da imagem RGB (BI, HI, HUE, NGRDI, SCI e VARI), bem como a área calculada das raízes comerciais, descarte e total, tiveram correlações importantes com caracteres agronômicos. Foram selecionadas 10 entradas superiores pela distância-genótipo-ideótipo. Através do dialelo, foi verificado que diversos caracteres agronômicos em cenoura tropical apresentam efeitos gênicos aditivos. Houve destaque para a CGC dos genitores 5, 4 e 2 e para CEC dos híbridos 1x2, 3x5, 1x5 e 5x3. Os híbridos 2x4, 3x1, 4x1, 4x2 demonstraram maiores conteúdos de metabólitos na folha e raiz. E os híbridos 3x5 e 5x3, que se destacaram para CEC, apresentaram altos níveis de carotenoides totais e licopenos na raiz. Com esses dados, verifica-se que materiais de cenoura tropical podem ser avaliados indiretamente via sensoriamento remoto, e há a possibilidade de obtenção de híbridos superiores para o mercado de cenoura tropical.

Palavras-chave: *Daucus carota* L.; sensoriamento remoto; mapa de Kohonen; sustentabilidade; análise dialélica.

¹¹ Orientador: Professor Dr. Gabriel Mascarenhas Maciel – UFU e Co-orientador: Professor Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis – UFU.

ABSTRACT

COELHO, Fernanda Gabriela Teixeira. **Genetic dissimilarity and diallels in carrots through analysis of agronomic characters and image phenotyping**. 2024, 57p. Thesis (Doctorate in Agronomy/Phytotechnics) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.¹²

Carrot (*Daucus carota* L.) is a vegetable from the Apiaceae family and stands out for its great global economic importance in terms of production area, market value, pleasant flavor, and nutritional composition. However, studies on carrots, especially in tropical climates, are still limited. Therefore, the objective was to identify heterotic groups and tropical carrot parents with great combining ability in the exploration of hybrids through agronomic evaluations and image phenotyping. The experiments were carried out in the city of Carandaí, MG. Fifty-seven tropical carrot entries from Seminis (Brazil) and three commercial varieties were evaluated. An agronomic evaluation was carried out, and two flights were conducted with a Remotely Piloted Aircraft (RPA), before and after harvest. Then, 5 carrot entries were selected in their fertile and male-sterile versions, which were crossed in a balanced diallel model (5 x 4). The hybrids, parents and three commercial entries as controls were evaluated in the summers of 2020/2021 and 2021/2022. The existence of genetic variability was observed among the tropical carrot entries and the formation of six groups through an artificial neural network using the Kohonen self-organizing map. The vegetation indices calculated from the RGB image (BI, HI, HUE, NGRDI, SCI and VARI), as well as the calculated commercial, discard, and total root areas, had significant correlations with agronomic traits. Ten top entries were selected by genotype-ideotype distance. Through diallel analysis, it was verified that several agronomic traits in tropical carrots present additive genetic effects. There was emphasis on the CGC of parents 5, 4, and 2 and the CEC of hybrids 1x2, 3x5, 1x5 and 5x3. The 2x4, 3x1, 4x1, and 4x2 hybrids demonstrated higher metabolite contents in the leaf and root. And the 3x5 and 5x3 hybrids, which stood out for CEC, showed high levels of total carotenoids and lycopenes in the root. With these data, it appears that tropical carrot materials can be evaluated indirectly via remote sensing, and there is the possibility of obtaining superior hybrids for the tropical carrot market.

Keywords: *Daucus carota* L.; diallel analysis; kohonen Map; remote sensing; sustainability.

² Supervisor: Professor Dr. Gabriel Mascarenhas Maciel – UFU and Co-supervisor: Professor Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis - UFU

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	<i>Objetivo geral</i>	13
2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
	REFERÊNCIAS.....	14
	CAPÍTULO 1 - Fenotipagem de alto rendimento para avaliação do potencial agronômico e qualidade de raízes em cenoura tropical usando sensores RGB.....	17
1	INTRODUÇÃO.....	19
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1	<i>Material genético e local do experimento.....</i>	20
2.2	<i>Fluxo do experimento.....</i>	21
2.3	<i>Avaliação dos caracteres agronômicos no campo.....</i>	22
2.4	<i>Aquisição e processamento das imagens aéreas</i>	23
2.5	<i>Análise estatística.....</i>	24
2.6	<i>Inteligência neural artificial para agrupamento</i>	24
2.7	<i>Seleção das melhores entradas pelo índice distância genótipo-ideótipo</i>	24
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
3.1	<i>Avaliação do germoplasma.....</i>	25
3.2	<i>Agrupamento das entradas pelo mapa auto-organizável de Kohonen.....</i>	27
3.3	<i>Validação da fenotipagem por imagem para cenoura tropical</i>	29
3.4	<i>Seleção das melhores entradas de cenoura.....</i>	36
4	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39
	CAPÍTULO 2 - Análise da capacidade de combinação para obtenção de híbridos de cenoura tropical	44
1	INTRODUÇÃO.....	46
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
2.2	<i>Material genético e local do experimento.....</i>	47
2.3	<i>Fluxo do experimento.....</i>	48
2.4	<i>Avaliação dos caracteres agronômicos no campo.....</i>	49

2.5	<i>Análise dialélica</i>	50
2.6	<i>GGE Biplot</i>	50
2.7	<i>Análise bioquímica para extração de pigmentos na folha e raiz</i>	51
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1	<i>Análise dialélica</i>	52
3.2	<i>GGE Biplot</i>	57
3.3	<i>Análise bioquímicas</i>	62
4	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma espécie alógama da família Apiaceae, originária de climas temperados; porém, sua raiz é consumida globalmente (Bashir *et al.*, 2021). Está entre as 10 hortaliças mais importantes do mundo, sendo formada por compostos bastante nutritivos (Bonasia *et al.*, 2021). Os altos teores de antocianinas, carotenoides, compostos fenólicos, fibras alimentares, carboidratos e minerais tornam a cenoura um excelente alimento para as necessidades nutricionais humanas (Singh *et al.*, 2021; Abreu *et al.*, 2022).

A China é o maior produtor de cenoura; no entanto, o Canadá e a América são os maiores mercados consumidores atualmente, e a Europa é o mercado que mais cresce no mundo (Junaid *et al.*, 2023). Cerca de 41 milhões de toneladas de cenouras são consumidas anualmente (FAO, 2023). O Brasil ocupa o quinto lugar em um ranking internacional de produção da cultura, sendo a hortaliça do grupo de raízes com maior valor econômico no país (Carvalho *et al.*, 2022). A cenoura é cultivada em larga escala nas regiões Centro-Oeste, Sudeste, Nordeste e Sul do Brasil. Os polos de produção são São Gotardo (Minas Gerais), Cristalina (Goiás), Marilândia (Paraná), Caxias do Sul (Rio Grande do Sul) e Irecê (Bahia) (Anuário brasileiro de Horti&Fruti, 2023).

O desenvolvimento de cultivares adaptadas ao cultivo no verão e no inverno em todos os continentes permitiu a maior disponibilidade de cenouras com preços estáveis para os consumidores. Porém, o melhoramento genético da cenoura tem sido um esforço contínuo ao longo de seu cultivo e domesticação (Simon *et al.*, 2008). O estudo em melhoramento de cenoura no Brasil permitiu, no início dos anos 80, o lançamento pela Embrapa da primeira cultivar de cenoura adaptada ao país. A cultivar de polinização aberta Brasília chegou a ocupar mais de 80% da área cultivada com cenoura de verão (Carvalho *et al.*, 2017). Esse sucesso deveu-se à sua alta produtividade e, principalmente, à resistência à queima-das-folhas, doença causada pelo complexo *Alternaria dauci*, *Cercospora carotae* e *Xanthomonas campestris*, considerada mundialmente a principal doença da cenoura em cultivos de verão (Le Clerc *et al.*, 2015).

Contudo, em função da demanda atual do mercado de sementes por cultivares híbridas, a comercialização de sementes de cultivares de polinização aberta tem sido substituída. Essa demanda deve-se à maior uniformidade de raízes dos híbridos e, conseqüentemente, ao maior

rendimento de raízes comerciais (Vieira *et al.*, 2012). Diante disto, os programas de melhoramento genético da cultura da cenoura têm sido desenvolvidos com foco na obtenção de materiais híbridos.

A fim de atender ao mercado atual, estudos de dissimilaridade genética permitem identificar diferentes grupos heteróticos visando a obtenção de linhagens com grande capacidade de combinação na exploração de híbridos (Vieira *et al.*, 2009; Carvalho; Silva, 2017). Conhecendo-se os grupos heteróticos, pode-se realizar a seleção das melhores linhagens genitoras através da análise dialélica. Esta propicia estimativas de parâmetros genéticos, úteis para o entendimento da ação gênica envolvida na determinação dos caracteres e da existência de heterose. Assim, proporciona grandes avanços para a seleção de genitores a serem utilizados na hibridação (Cruz *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2017).

Os estudos de dissimilaridade genética e dialelos podem ser realizados a partir de avaliações fenotípicas e análise de caracteres agronômicos em cenoura. De forma geral, os métodos de avaliação de ensaios envolvem técnicas de fenotipagem de plantas e raízes que utilizam características mensuráveis, como peso e tamanho. No entanto, esses métodos demandam bastante tempo, recursos financeiros e mão de obra (Matsuda *et al.*, 2012). Um dos grandes desafios dos programas de melhoramento genético de plantas atualmente reside na necessidade de avançar a fenotipagem em escala, precisão, reprodutibilidade e exploração de novas características.

Métodos modernos de análise de plantas têm sido utilizados, incluindo o uso de imagens geradas em plataformas automatizadas ou obtidas por drones, como as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) (Walter *et al.*, 2015; Turner *et al.*, 2018; Maciel *et al.*, 2019). A fenotipagem por imagem pode ser usada para calcular os índices de vegetação e correlacioná-los com valores qualitativos ou quantitativos referentes ao desempenho do genótipo em um determinado ambiente (Dhondt *et al.*, 2013). Além disso, oferece análises não destrutivas das características das plantas, com menor custo, tempo e mão de obra (Walter *et al.*, 2015; Moeckel *et al.*, 2018).

Contudo, os estudos sobre cenoura, principalmente em clima tropical, ainda são limitados. Verificam-se diversas oportunidades para estudo e desenvolvimento no melhoramento genético de cenoura tropical, seja no âmbito de avaliação de campo e fenotipagem, conhecimento de parâmetros genéticos, estratégias de melhoramento e metodologias para análise da diversidade genética e combinação de materiais. Estudos abrangendo essas áreas trarão grande impacto na seleção genética de cenoura e no desenvolvimento do mercado de sementes de cenoura no Brasil.

Consequentemente, trarão benefícios para o agricultor e auxiliarão na melhor oferta e qualidade de cenoura para o consumidor final.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Identificar grupos heteróticos e genitores de cenoura tropical com grande capacidade de combinação na exploração de híbridos através de avaliações agronômicas e fenotipagem por imagem.

2.2 Objetivos específicos

- Validar a fenotipagem por imagem em germoplasma de cenoura tropical a partir de imagens RGB;
- Determinar a dissimilaridade genética entre entradas de cenoura tropical e verificar a formação de grupos heteróticos;
- Estimar as capacidades de combinação geral e específica e identificar os melhores genitores de cenoura para obtenção de híbridos adaptados ao clima tropical;
- Analisar a superioridade de entradas de cenoura quanto a concentração de metabólitos fotossintéticos e nutricionais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. J. M. D.; LORENÇO, M. S.; FERREIRA, A. N.; SCALICE, H. K.; VILAS BOAS, E. V. D. B.; PICCOLI, R. H.; CARVALHO, E. E. N. Artificial Neural Networks for the Evaluation of Physicochemical Properties of Carrots (*Daucus carota* L.) Subjected to Different Cooking Conditions as an Alternative to Traditional Statistical Methods. **ACS Food Science & Technology**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 143-150, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00375>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsfoodscitech.1c00375>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- Anuário brasileiro de horti&fruti: retrospectiva 2023 e perspectiva 2024**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2023. 40 p.: il. Edição especial – Ano 22 – n°240. ISSN 1981-183.
- BASHIR, R.; RIAZ, H. N.; ANWAR, S.; PARVEEN, N.; KHALILZADEH, R.; HUSSAIN, I.; MAHMOOD, S. Morpho-physiological changes in carrots by foliar γ -aminobutyric acid under drought stress. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 44, p. 57-68, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00676-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40415-020-00676-7>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- BONASIA, A.; CONVERSA, G.; LAZZIZERA, C.; GAMBACORTA, G.; ELIA, A. Morpho-biometrical nutritional and phytochemical characterization of carrot landraces from Puglia region (Southern Italy). **Sustainability**, [s.l.], v. 13, n. 7, p. 3940, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073940>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/7/3940>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- CARVALHO, A. D. F.; PEREIRA, G. E.; SILVA, G. O. Estimates of genetic gains in the carrot using different selection indices. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 16, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v16i0.7154>. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/7154>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- CARVALHO, A. D. F.; SILVA, G.O. Divergência genética entre genótipos de cenoura através de caracteres agrônômicos. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 11, n. 2, p. 137-144, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i2.3642>. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/3642>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. **Métodos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2012.
- DHONDT, S.; WUYTS, N.; INZÉ, D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. **Trends Plant Sci.**, [s.l.], v. 18, n. 8, p. 428–439, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.04.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138513000812?via%3Dihub>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations statistics database. Rome, Italy, 2023. Portal. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 10 ago. 2024.

JUNAID, M. D.; ÖZTÜRK, Z. N.; GÖKÇE, A. F. Drought stress effects on morphophysiological and quality characteristics of commercial carrot cultivars. **Turkish Journal of Botany**, Turquia, v. 47, n. 2, p. 111-126, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55730/1300-008X.2750>. Disponível em: <https://journals.tubitak.gov.tr/botany/vol47/iss2/4/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

LE CLERC, V.; MARQUES, S.; SUEL, A.; HUET, S.; HAMAMA, L.; VOISINE, L.; AUPERPIN, E.; JOURDAN, M.; BARROT, L.; PRIEUR, R.; BRIARD, M. QTL mapping of carrot resistance to leaf blight with connected populations: stability across years and consequences for breeding. **Theoretical Applied Genetics**, [s.l.], v. 8, p.1-11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2576-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-015-2576-z>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MACIEL, G. M.; DE ARAÚJO GALLIS, R. B.; BARBOSA, R. L.; PEREIRA, L. M.; SIQUIEROLI, A. C. S.; PEIXOTO, J. V. M. Image phenotyping of inbred red lettuce lines with genetic diversity regarding carotenoid levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s.l.], v. 81, p. 154-160, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030324341930008X?via%3Dihub>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MATSUDA, O.; TANAKA, A.; FUJITA, T.; IBA, K. Hyperspectral imaging techniques for rapid identification of Arabidopsis mutants with altered leaf pigment status. **Plant and Cell Physiology**, [s.l.], v. 53, p. 1154-1170, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcs043>. Disponível em: <https://academic.oup.com/pcp/article/53/6/1154/1807030>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MOECKEL, T.; DAYANANDA, S.; NIDAMANURI, R. R.; NAUTIYAL, S.; HANUMAIAH, N.; BUERKERT, A.; WACHENDORF, M. Estimation of vegetable crop parameter by multi-temporal UAV-borne images. **Remote Sensing**, [s.l.], v.10, n.5, p. 805, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10050805>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/5/805>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SIMON, P. W. *et al.* Carrot. In: PROHENS, J.; NUEZ, F. (ed.). **Vegetables II: handbook of plant breeding**, vol 2, New York: Springer, 2008. v. 2, p. 327-357. *E-book*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-74110-9_8. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-74110-9_8. Acesso em: 11 nov. 2024.

SINGH, M. N.; SRIVASTAVA, R.; YADAV, I. Study of different varieties of carrot and its benefits for human health: a review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 1293-1299, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.22271/phyto.2021.v10.i1r.13529>. Disponível em: <https://www.phytojournal.com/archives/2021.v10.i1.13529/study-of-different-varietis-of-carrot-and-its-benefits-for-human-health-a-review>. Acesso em: 11 nov. 2024.

TURNER, S. D.; ELLISON, S. L.; SENALIK, D. A.; SIMON, P. W.; SPALDING, E. P.; MILLER, N. D. An automated image analysis pipeline enables genetic studies of shoot and root morphology in carrot (*Daucus carota* L.). **Frontiers in plant science**, [s.l.], v. 9, p.1703, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01703>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.01703/full>. Acesso em: 11 nov. 2024.

VIEIRA, J. V.; SILVA, G. O.; BOITEUX, L. S.; SIMON, P. W. Divergência genética entre acessos de cenoura pertencentes a grupos varietais distintos utilizando caracteres morfológicos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 27, p. 473-477, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362009000400012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/jNZGZNNMbPrGqW3jY4PGcRD/?lang=pt>. Acesso em: 11 nov. 2024.

VIEIRA, J.V.; SILVA, G. O.; CHARCHAR, J.M.; FONSECA, M. E. N.; SILVA, J. B. C.; NASCIMENTO, W. M.; BOITEUX, L. S.; PINHEIRO, J. B.; REIS, A.; RESENDE, F. V.; CARVALHO, A. D. F. BRS Planalto: cultivar de cenoura de polinização aberta para cultivo de verão. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 30, p.359-363, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000200030>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/4gYWPFmDgkkJmHwp6GRx7sq/?lang=pt>. Acesso em: 11 nov. 2024.

WALTER, A.; LIEBISCH, F.; HUND, A. Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. **Plant methods**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0056-8>. Disponível em: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-015-0056-8>. Acesso em: 11 nov. 2024.

CAPÍTULO 1 - Fenotipagem de alto rendimento para avaliação do potencial agrônômico e qualidade de raízes em cenoura tropical usando sensores RGB

RESUMO

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma hortaliça de importância econômica global, com escassos estudos em fenotipagem por meio de imagens geradas em plataformas automatizadas ou obtidas por drone. Diante disso, objetivou-se verificar a dissimilaridade genética e validar a fenotipagem por imagem em germoplasma de cenoura tropical a partir de imagens RGB (vermelho-verde-azul do inglês *red-green-blue*). O experimento foi realizado no município de Carandaí-MG com 57 entradas de cenoura tropical da Seminis (Brasil) e três variedades comerciais. Após 115 dias da semeadura foi realizada a avaliação agrônômica das entradas e dois voos com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) no experimento: um antes da colheita (porção foliar) e outro após a colheita (raízes produzidas). Para validar a existência de variabilidade genética, foi realizado o agrupamento por meio de rede neural artificial pelo mapa auto-organizável de Kohonen. Também foi empregado o índice distância-genótipo-ideótipo para verificação das melhores entradas. Observou-se existência de variabilidade genética entre as entradas de cenoura tropical, com a formação de seis grupos pelo Mapa de Kohonen. Os índices de vegetação BI, HI, HUE, NGRDI, SCI e VARI, bem como a área calculada das raízes comerciais, descarte e total, tiveram correlações importantes com os caracteres agrônômicos, incluindo severidade da queima-de-folhas e produtividade de raízes. Isso indica que materiais de cenoura tropical podem ser avaliados indiretamente via sensoriamento remoto. Foram selecionadas 10 entradas pela distância-genótipo-ideótipo (2, 15, 16, 22, 34, 37, 39, 51, 52 e 53), que estão no mesmo grupo pelo mapa auto-organizável de Kohonen, confirmando sua superioridade no presente estudo.

Palavras-chave: *Daucus carota* L.; sensoriamento remoto; fenotipagem por imagem; índices de vegetação; mapa de Kohonen.

ABSTRACT

Carrots (*Daucus carota* L.) are a vegetable of global economic importance, with very few studies on phenotyping using images generated by automated platforms or obtained by drone. The objective of this study was, therefore, to verify the genetic dissimilarity and validate image phenotyping in tropical carrot germplasms from true color (red, green, blue; RGB) images. The experiment was conducted in the city of Carandaí-MG, Brazil, using 57 tropical carrot entries from Seminis (Brazil) and three commercial entries. One hundred and fifteen days after sowing, the entries were evaluated agronomically, and two flights with Remotely Piloted Aircraft (RPA) were conducted in the experiment: one before harvest (leaf portion) and another after harvest (produced roots). Clustering was performed to validate the existence of genetic variability among the entries using an artificial neural network to produce a Kohonen's self-organizing map. The genotype–ideotype distance index was also used to verify the best entries. Genetic variability among the tropical carrot entries was evidenced by the formation of six groups using the Kohonen map. The Brightness Index (BI), Primary Colors Hue Index (HI), Overall Hue Index (HUE), Normalized Green Red Difference Index (NGRDI), Soil Color Index (SCI), and Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), as well as the calculated area of marketable, unmarketable, and total roots, were correlated with agronomic characters, including leaf blight severity and root yield. This indicates that tropical carrot materials can be indirectly evaluated via remote sensing. Ten entries were selected using the genotype–ideotype distance (2, 15, 16, 22, 34, 37, 39, 51, 52, and 53), which were also in the same group (according to the Kohonen's self-organizing map), confirming the superiority of these entries.

Keywords: *Daucus carota* L.; Image phenotyping; kohonen map; Remote sensing; vegetation indices.

1 INTRODUÇÃO

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma hortaliça de importância econômica global. Representa uma fonte significativa de nutrientes com benefícios à saúde humana, como carotenoides, compostos fenólicos e vitaminas (Abreu *et al.*, 2022). A produção anual de cenoura no mundo excede 40 milhões de toneladas e 1,1 milhão de hectares (FAO, 2020). No Brasil, é a hortaliça do grupo de raízes com maior valor econômico, com estimativas da produção superiores a 700 mil toneladas por ano (Carvalho *et al.*, 2022).

O desenvolvimento de cultivares adaptadas ao cultivo no verão e inverno em todos os continentes permitiu a disponibilidade de produtos de cenoura durante todo o ano com preços relativamente estáveis para os consumidores. Porém, o melhoramento genético da cenoura tem sido um esforço contínuo ao longo de seu cultivo e domesticação (Simon *et al.*, 2008). Um dos grandes desafios atualmente reside na necessidade de avançar a fenotipagem em escala, precisão, reprodutibilidade e exploração de novas características.

Consequentemente, têm-se utilizado cada vez mais de métodos modernos de análise de plantas, principalmente pelo uso de imagens geradas em plataformas automatizadas ou obtidas por drones, como as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) (Walter *et al.*, 2015; Maciel *et al.*, 2019). A fenotipagem por imagem pode ser usada para calcular os índices de vegetação e correlacioná-los com valores qualitativos ou quantitativos referentes ao desempenho do genótipo em um determinado ambiente (Dhondt *et al.*, 2013). Além disso, oferece análises não destrutivas das características das plantas, com menor custo, tempo e mão de obra (Walter *et al.*, 2015; Moeckel *et al.*, 2018).

As ARPs equipadas com sensores RGB (vermelho-verde-azul do inglês *red-green-blue*) oferecem uma plataforma para coleta de imagens com alta resolução, permitindo a tomada de decisões em uma ampla gama de aplicações na agricultura de precisão, contribuindo para o aumento da eficiência e produtividade. Têm custos mais baixos, o que os torna uma opção atrativa para organizações com restrições orçamentárias. Sensores RGB podem fornecer informações de alta resolução para monitoramento de culturas, detecção de doenças e, em nosso caso, fenotipagem de alto rendimento. Herzig *et al.* (2021) usaram sensores RGB e multiespectrais para fenotipagem de alto rendimento e a previsão de rendimento no melhoramento de cevada. Eles concluíram que o sistema RGB é preferível em relação ao multiespectral para avaliação de rendimento, devido aos

custos mais baixos e ao manuseio amigável ao consumidor na aquisição e processamento de imagens.

Diversos estudos demonstram o potencial de índices de vegetação calculados a partir de imagens para avaliar características agronômicas em batata (Yadav *et al.*, 2010; Xie *et al.*, 2022), alface (Maciel *et al.*, 2019), cebola e alho (Ballesteros *et al.*, 2018; Ryu; Cho, 2020), berinjela, tomate e repolho (Moeckel *et al.*, 2018), cana-de-açúcar (Vicente *et al.*, 2012), soja e milho (Risso *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2020; Randelović *et al.*, 2020), sendo escassos estudos avaliando raízes. Desta forma, estudos com cenoura ainda são limitados.

O melhoramento genético da cenoura tem sido realizado a partir da coleta de dados e avaliações diretas no campo (Carvalho *et al.*, 2018). Isso demanda muita mão de obra, alto custo e implica no atraso para o avanço do incremento em produtividade e qualidade para esta espécie. Após colhida, as raízes são classificadas exigindo alto padrão de qualidade. A escassez de novas alternativas para seleção tem resultado em desperdício e falta de estímulo para avançar na melhoria do germoplasma. Assim, objetivou-se quantificar a dissimilaridade genética e validar a fenotipagem por imagem em germoplasma de cenoura tropical a partir de imagens RGB.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Material genético e local do experimento*

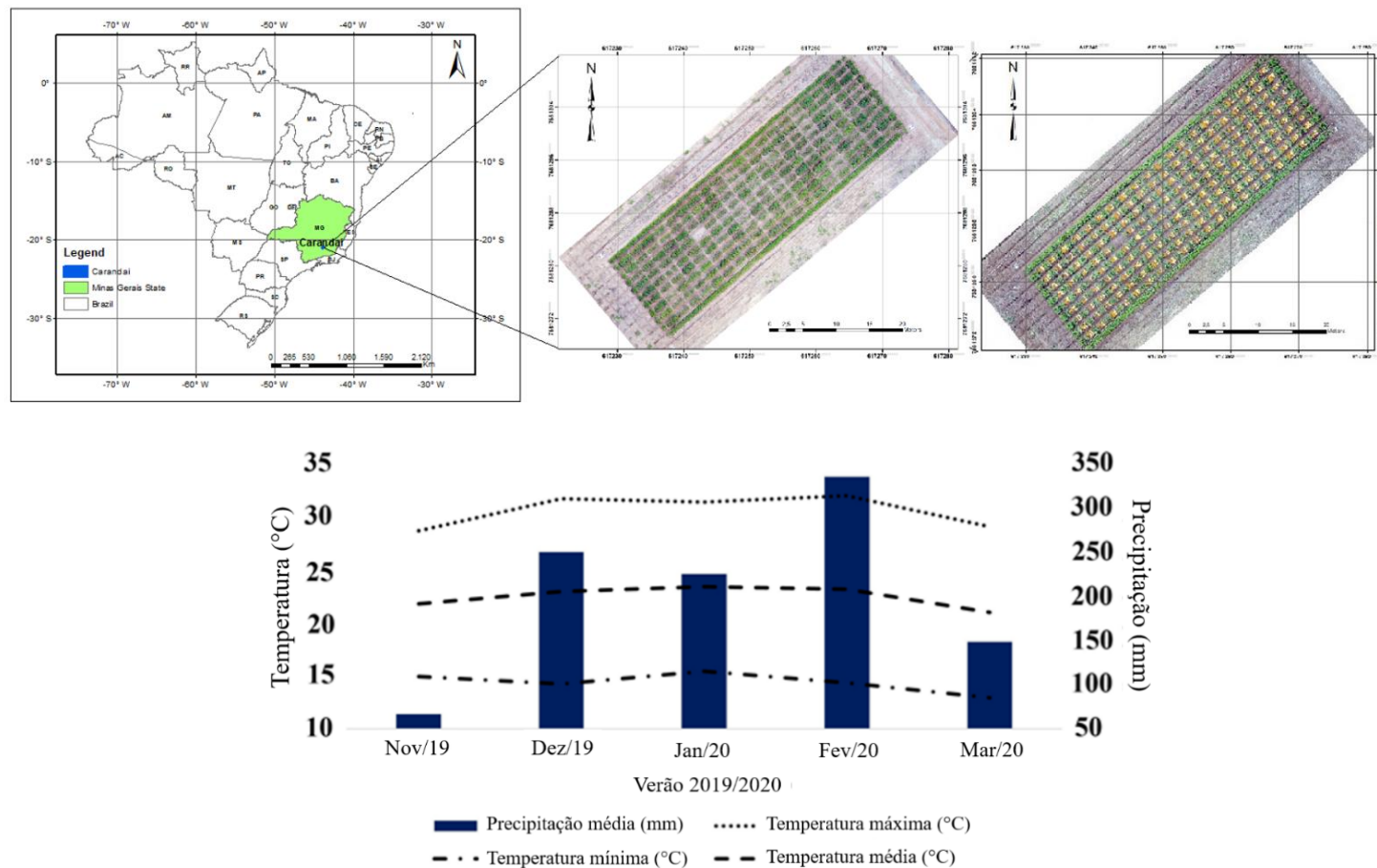
O experimento foi realizado na Estação Experimental de Hortaliças da Bayer no município de Carandaí-MG (altitude 1.096 m) de novembro de 2019 a março de 2020 (**Figura 1**) e o processamento dos dados na Universidade Federal de Uberlândia, campus Monte Carmelo. Os dados referentes à precipitação e temperatura durante o experimento estão descritos na **Figura 1**.

Foram avaliadas 57 entradas do programa de melhoramento de cenoura tropical da Seminis (Brasil) e três entradas comerciais como testemunhas (dois híbridos – entradas 1 e 2, e uma cultivar tropical de polinização aberta – entrada 3).

Foi adotado o delineamento experimental de blocos completos casualizados (DBC) com três repetições. As entradas foram semeadas em canteiros de 1,5 m de largura e as parcelas foram constituídas de cinco linhas de plantio com 2 m de comprimento, espaçadas em 20 cm entre si. Na

mesma linha, as plantas tiveram 5 cm de espaçamento entre si. A área útil da parcela foi constituída de todas as linhas, excluindo-se 50 cm no início e no final das parcelas.

Figura 1 - Localização e visualização do experimento no primeiro e segundo voos obtidos por Aeronave Remotamente Pilotada com sensores RGB. Gráfico da temperatura e precipitação representando o período experimental em Carandaí, MG, Brasil, de novembro de 2019 a março de 2020.

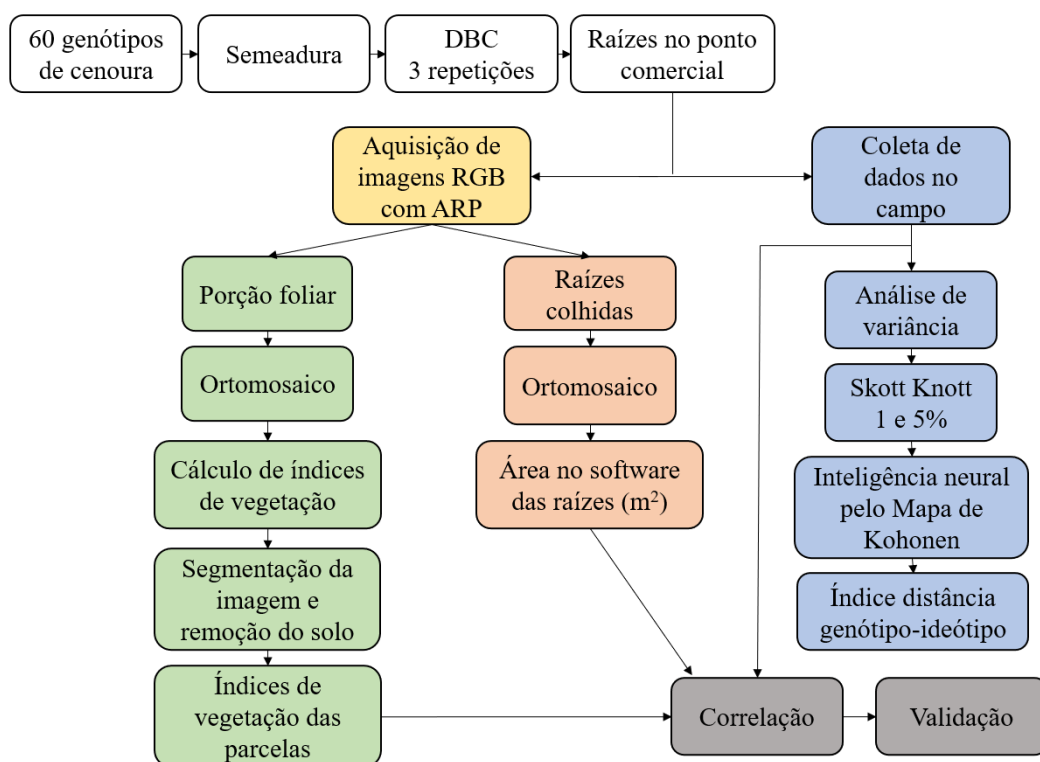


Fonte: autoral.

2.2 Fluxo do experimento

As etapas metodológicas para avaliação agrônômica, processamento das imagens e análise dos dados estão apresentadas no fluxograma da **Figura 2**.

Figura 2 - Fluxograma das etapas de aquisição e processamento das imagens, coleta de dados no campo e análise dos dados, em germoplasma de cenoura na cidade de Carandaí-MG.



Fonte: autoral

2.3 Avaliação dos caracteres agronômicos no campo

Decorrido 115 dias após a semeadura, foi feita a avaliação agronômica das entradas. Foi contado o número de plantas florescendo na parcela e calculada a porcentagem de florescimento (BP). Em seguida, foi avaliada a severidade da queima-das-folhas (DIS), utilizando-se uma escala de notas de 1 a 5 (1 = > 90% de severidade, 2 = 50-90%, 3 = 12,5-50%, 4 = 3,8-12,55% e 5 = < que 3,8% de severidade) (Pereira et al., 2012). Para esses caracteres são desejados menores valores.

Após a colheita, foram mensurados o peso da folha fresca (kg) (LW) e a porcentagem de ombro roxo ou verde (SHP). Foram avaliados o número e a massa (kg) de raízes comercializáveis (10 a 26 cm de comprimento) e descarte (menores que 10 cm de comprimento, quebradas, rachadas e bifurcadas). Os dados foram transformados em porcentagem de raízes comerciais (%) (MRP) e porcentagem de raízes não comerciais - descarte (%) (URP), estimativa de produtividade de raízes comerciais ($t\ ha^{-1}$) (MYH) e estimativa de produtividade total ($t\ ha^{-1}$) (TYH). Em uma amostra ao

acaso de 10 raízes foram determinados o diâmetro médio de raízes (realizado na porção média da raiz) (RD) e o comprimento médio das raízes (RL).

2.4 Aquisição e processamento das imagens aéreas

No mesmo dia da coleta dos dados agrônômicos, foram realizados dois voos no experimento: um voo antes da colheita, para verificação da porção foliar das entradas, e um voo após a colheita, com obtenção de imagens das raízes produzidas por cada genótipo, dispostas lado a lado e separadas em comerciais e descarte. As imagens aéreas foram coletadas por um drone modelo Phantom 4 Advanced, com uma câmera RGB de 20 megapixels. O voo foi realizado de modo automático com o software DroneDeploy, utilizando os parâmetros de 20 metros de altura, sobreposição longitudinal de 80% e sobreposição lateral de 75%.

As imagens coletadas foram processadas no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria (LASER) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Monte Carmelo, com o software Pix4Dmapper para geração do ortomosaico. O software Quantum GIS 3.10.0 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation) foi utilizado para calcular os índices de vegetação a partir da ortofoto 1 da porção foliar das entradas (**Tabela 1**), além da área das raízes comerciais (MRA), área das raízes descarte (URA) e área total (TRA) (m²) pela ortofoto 2. As áreas das raízes foram determinadas a partir da identificação e contorno das raízes comerciais e descarte em cada parcela.

Tabela 1 - Índices de vegetação testados para fenotipagem de cenoura tropical no município de Carandaí - MG.

Índice de Vegetação	Equação ¹	Referências
Brightness Index (BI)	$\sqrt{((R^2+G^2+B^2)/3)}$	Richardson; Wiegand (1977)
Green Leaf Index (GLI)	$(2G-R-B)/(2G+R+B)$	Louhaichi; Borman; Johnson (2001)
Primary Colors Hue Index (HI)	$(2*R-G-B)/(G-B)$	Escadafal <i>et al.</i> (1994)
Overall Hue Index (HUE)	$\text{atan}(2*(B-G-R)/30,5*(G-R))$	Escadafal <i>et al.</i> (1994)
Normalized Green Red Difference Index (NGRDI)	$(G-R)/(G+R)$	Tucker (1979)
Soil Color Index (SCI)	$(R-G)/(R+G)$	Mathieu <i>et al.</i> (1998)
Spectral Slope Saturation Index (SI)	$(R-B)/(R+B)$	Escadafal <i>et al.</i> (1994)

Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)	$(G-R)/(G+R-B)$	Gitelson <i>et al.</i> (2002)
areaporc	Área da parcela (cm ²)	

¹ R= banda do vermelho; G= banda do verde; B= banda do azul.

Fonte: autoral.

2.5 *Análise estatística*

Os resultados dos caracteres agronômicos foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 1% e 5% de probabilidade e estimados os parâmetros genéticos e o coeficiente de determinação genotípico (H^2). As médias das entradas foram agrupadas com base no teste de Scott-Knott ao nível de 1% e 5% de probabilidade. Foi calculada a matriz de correlação de Pearson a 5% de significância entre os caracteres agronômicos avaliados e os valores e índices de vegetação obtidos via sensoriamento remoto. A análise estatística foi realizada com auxílio do software GENES (Cruz, 2013).

2.6 *Inteligência neural artificial para agrupamento*

Com o intuito de validar a existência de variabilidade genética nas entradas de cenoura tropical, foi realizado o agrupamento das entradas por meio de inteligência neural pelo Mapa Auto-Organizável de Kohonen. O Mapa Auto-Organizável (SOMs) foi obtido por meio da aplicação de uma abordagem tradicional não supervisionada de acordo com as características avaliadas e necessidades do estudo. A determinação do número ótimo de grupos foi feita pelo teste de K-means, sendo o mapa desenhado em um arranjo de 3 por 2 (três linhas e duas colunas), raio igual a um, topologia de vizinhança hexagonal, arquitetura da rede Feedforward com uma camada de entrada e um neurônio de saída e função de ativação do tipo Distância Euclidiana e 3000 épocas. Foi utilizado o software GENES com Metalab (Cruz, 2013).

2.7 *Seleção das melhores entradas pelo índice distância genótipo-ideótipo*

Foi empregado o índice distância-genótipo-ideótipo com base nos melhores comportamentos verificados em cada caráter avaliado no presente estudo. Este ideótipo foi definido por meio das maiores médias para os caracteres RL, RD, LW, MRP, TYH, MYH; e menores médias para os caracteres BP, DIS, SHP e URP. Em seguida, foram estimadas as distâncias de Mahalanobis (D2) a partir de dados padronizados para as 60 entradas avaliadas e o ideótipo, com o auxílio do programa computacional Genes (Cruz, 2013). Desta forma, as entradas foram classificadas de acordo com a distância que apresentaram em relação ao ideótipo, sendo consideradas as melhores entradas aquelas que apresentaram as menores distâncias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação do germoplasma

Observa-se existência de variabilidade genética entre as entradas de cenoura para todos os caracteres agrônômicos avaliados ($P < 0,05$ and $P < 0,01$) (**Tabela 2**).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância e estimativa de parâmetros genéticos e fenotípicos para 60 entradas de cenoura tropical, no município de Carandaí - MG.

FV	GL	Quadrado médio									
		BP	DIS	SHP	RL	RD	LW	MRP	URP	TYH	MYH
Blocos	2	29,02	0,62	853,48	22,33	0,36	0,31	11,28	11,28	162,8	85,35
Genótipos	59	72,99**	0,81**	219,81**	5,69**	0,14**	0,4**	83,27*	83,27*	88,99**	81,52**
Resíduo	118	7,69	0,34	60,47	1,38	0,02	0,05	52,58	52,58	9,66	9,64
Média		3,72	2,6	15,96	16,6	2,65	1,16	82,04	17,96	23,53	19,44
CV		74,58	22,42	48,73	7,06	5,6	19,69	8,84	40,37	13,21	15,97
Min		0	1	1,54	11,8	1,9	0,35	51,39	2,65	7,9	5,37
Max		37	5	59,26	21,3	3,2	2,43	97,35	48,61	42,4	38,43
σ_F^2		24,33	0,27	73,27	1,9	0,05	0,13	27,76	27,76	29,66	27,17
σ_E^2		2,56	0,11	20,15	0,46	0,01	0,02	17,53	17,53	3,22	3,21
σ_G^2		21,74	0,15	53,11	1,44	0,04	0,12	10,23	10,23	26,45	23,96
h^2		89,46	55,11	72,48	75,8	83,96	87,01	36,86	36,86	89,15	88,17
CVg		125,43	15,25	45,66	7,22	7,4	29,42	3,9	17,81	21,85	25,18
CVg/CVe		1,68	0,68	0,94	1,02	1,32	1,49	0,44	0,44	1,65	1,58

** e * significância a 1 e 5% respectivamente e ns não significativo pelo teste F; GL: grau de liberdade; CV, CVg e CVe: coeficiente de variação geral (%), genético (%) e experimental (%), respectivamente; σ_F^2 : variância fenotípica; σ_E^2 : variância genética; σ_G^2 : variância ambiental; h^2 : herdabilidade. BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima-das-folhas, SHP - Porcentagem de ombro roxo ou verde (%), RL - Comprimento de raiz (cm), RD - Diâmetro de raiz (cm), LW - Peso da folha fresca (kg),

MRP - Porcentagem de raízes comerciais (%), URP - Porcentagem de descarte (%), TYH - Estimativa de produtividade total (t ha^{-1}), MYH - Estimativa de produtividade de raízes comerciais (t ha^{-1}).

Fonte: autoral.

O coeficiente de variação (CV) oscilou entre 5,6% e 74,58% para os caracteres RD e BP, respectivamente. As menores e maiores variâncias fenotípica, ambiental e genotípica foram encontradas para os caracteres RD e SHP. Os caracteres agronômicos BP, SHP, TYH e MYH apresentaram variância genotípica superior à variância ambiental, em concordância com a alta herdabilidade (89,46%; 72,48%; 89,15%, e 88,17%, respectivamente) e valores do quociente CVg/CVe próximos ou maiores de 1. Em contraste, os caracteres MRP e URP tiveram variância ambiental maior que a variância genética, baixa herdabilidade (36,86% para ambos) e baixo quociente CVg/CVe , indicando predominância de efeitos ambientais em detrimento dos de ordem genética. Em concordância com o presente estudo, Carvalho *et al.* (2019) também encontraram herdabilidade alta para os caracteres massa de raízes comerciais (82,18%) e massa das raízes totais (81,85%).

Foram avaliadas as médias dos valores fenotípicos das entradas de cenoura tropical em relação aos caracteres agronômicos. A porcentagem de florescimento variou de 0 a 34,07%, sendo a maior tolerância ao florescimento verificada nas entradas 7, 21, 31 e 55, e o maior florescimento na entrada 3. As entradas 1 e 2 (híbridos comerciais) não diferiram entre si e encontram-se no grupo de melhor resistência ao florescimento. É importante ressaltar que a entrada 3 apresenta características inferiores às demais entradas, pois é uma cultivar tropical de polinização aberta (OP - open-pollination), sendo a primeira cultivar de cenoura tropical adaptada ao país, o que impulsionou a produção de cenoura no Brasil (Carvalho *et al.*, 2017a). Porém, atualmente, os programas de melhoramento visam o desenvolvimento de híbridos, que apresentam maior uniformidade de raízes e maior rendimento de raízes comerciais (Carvalho *et al.*, 2019).

Para severidade da queima-das-folhas e porcentagem de ombro roxo ou verde, houve a formação de dois grupos, com variação média de notas de 2 a 4 e de 4,70% a 40,71%, respectivamente. A maior severidade de doença foi observada na entrada 60, e a maior porcentagem de ombro verde ou roxo foi observada nas entradas 3 e 5. A queima-das-folhas é uma doença causada pelo complexo *Alternaria dauci*, *Cercospora carotae* e *Xanthomonas campestris*, considerada mundialmente a principal doença da cenoura em cultivos de verão e responsável por importantes perdas de produção (Le Clerc *et al.*, 2015). Pereira *et al.* (2012) encontraram maior

severidade de queima-de-folhas nas cultivares Brasília e Juliana em comparação às demais entradas avaliadas no estudo.

Comprimento (13,17–19,67 cm) e diâmetro (2,13–2,97 cm) médio das raízes formaram três grupos, nos quais as entradas 1, 2, 9, 10, 15, 31, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 47, 49, 51, 53 e 56 tiveram médias altas para as duas variáveis. Para peso da folha fresca houve variação de 0,5 a 2,05 kg para as entradas 13 e 39, respectivamente, com formação de cinco grupos. Carvalho *et al.* (2020), em estudo com três cultivares de cenoura para determinação do tempo de colheita, encontraram comprimento médio de raiz muito similar ao presente estudo, de 17,25 a 18,47 cm, e diâmetro médio de raízes com valores entre 3,03 a 3,26 cm.

A porcentagem de raízes comerciais e porcentagem de descarte são variáveis complementares. A entrada 2 apresentou os melhores resultados, com 92,01% de raízes comerciais e 7,99% de descartes, enquanto a entrada 54 apresentou os piores resultados, com 68,29% de raízes comerciais e 31,71% de descartes. Carvalho *et al.* (2017b), em estudo com cenoura na cidade de Brasília-DF, obtiveram porcentagem de raízes comerciais variando de 0,04 a 62,20%, valores distantes dos encontrados no presente estudo.

A estimativa de produtividade total variou de 11,46 a 37,60 t ha⁻¹ para as entradas 13 e 53, respectivamente. Para a estimativa de produtividade de raízes comerciais a variação foi de 9,07 a 33,28 t ha⁻¹ para as entradas 13 e 2, respectivamente. A entrada 53, apesar de ser a mais produtiva, tem menos raízes comerciais que a entrada 2. Carvalho *et al.* (2017b) encontraram que as médias da massa de raízes comerciais variaram de 5,14 a 27,97 t ha⁻¹, e para massa de raízes totais, as médias variaram entre 10,20 e 52,06 t ha⁻¹.

3.2 Agrupamento das entradas pelo mapa auto-organizável de Kohonen

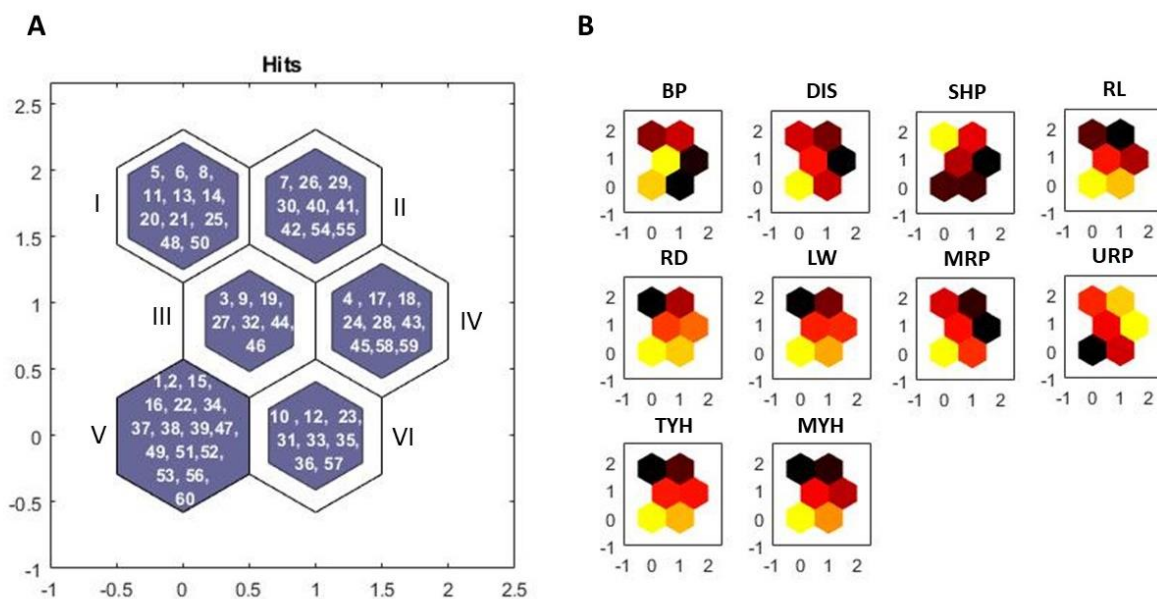
As 60 entradas avaliadas foram classificadas e distribuídas em seis grupos distintos (**Figura 3**). Esse resultado comprova a diversidade do germoplasma e possibilita o estudo de fenotipagem por imagem. Também foi determinada a contribuição das variáveis agronômicas para o agrupamento, onde cores mais claras indicam maior contribuição para formação do grupo, e os padrões de cores idênticos entre as variáveis correspondem a uma correlação positiva entre elas.

O grupo I foi composto por 11 entradas com maior contribuição da variável porcentagem de ombro roxo ou verde. O grupo II foi formado por 9 entradas, com maior contribuição da variável

porcentagem de descartes. O grupo III foi formado por 9 entradas, sendo uma delas a cultivar Brasília, onde a maior contribuição desse grupo foi a variável porcentagem de florescimento. O grupo IV é composto por 9 entradas e possui maior contribuição da variável porcentagem de descartes.

O grupo V tem 16 entradas, dentre elas os híbridos comerciais, entradas 1 e 2. Esse grupo apresenta maior contribuição das variáveis severidade da queima-de-folhas, comprimento e diâmetro de raiz, peso da folha fresca, porcentagem de raízes comerciais, estimativa de produtividade total e estimativa de produtividade de raízes comerciais. Isso indica que este grupo, apesar de apresentar notas mais altas para doença, contém as entradas superiores do presente estudo. O grupo VI apresenta as 8 entradas com maior contribuição, mas não tão forte, das variáveis comprimento e diâmetro de raiz, peso da folha fresca, estimativa de produtividade total e estimativa de produtividade de raízes comerciais.

Figura 3 - **(A)** Grupos I, II, III, IV, V e VI formados pelo agrupamento das 60 entradas de cenoura tropical avaliados no município de Carandaí - MG, obtido pelo mapa auto-organizável de Kohonen. **(B)** Contribuição das variáveis agrônômicas para o agrupamento, onde cores mais claras indicam maior contribuição para formação do grupo. BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima-das-folhas, SHP - Porcentagem de ombro roxo ou verde (%), RL - Comprimento de raiz (cm), RD - Diâmetro de raiz (cm), LW - Peso da folha fresca (kg), MRP - Porcentagem de raízes comerciais (%), URP - Porcentagem de descarte (%), TYH - Estimativa de produtividade total ($t\ ha^{-1}$), MYH - Estimativa de produtividade de raízes comerciais ($t\ ha^{-1}$).



Fonte: autoral.

Os resultados apresentados indicam que existe variabilidade genética entre as entradas de cenoura tropical avaliadas. O método de rede neural artificial pelo mapa auto-organizável de Kohonen foi eficiente para demonstrar essa diversidade, além de permitir uma avaliação abrangente das entradas e facilitar consideravelmente a interpretação das semelhanças e diferenças entre elas.

Resultados importantes também foram encontrados na literatura, reforçando os resultados do presente estudo. Janaszek e Trajer (2011) encontraram variabilidade genética utilizando o mapa auto-organizável de Kohonen para o agrupamento de cultivares de cenoura na Polônia, considerando a coloração e componentes nutricionais, no qual obtiveram 49 grupos num arranjo 7 x 7. Monyr *et al.* (2016) utilizaram o mapa auto-organizável de Kohonen para o estudo de sedimentos contaminados por metais pesados em cenoura. A classificação dos dados por meio deste método permitiu compreender e visualizar a distribuição espacial e temporal das amostras.

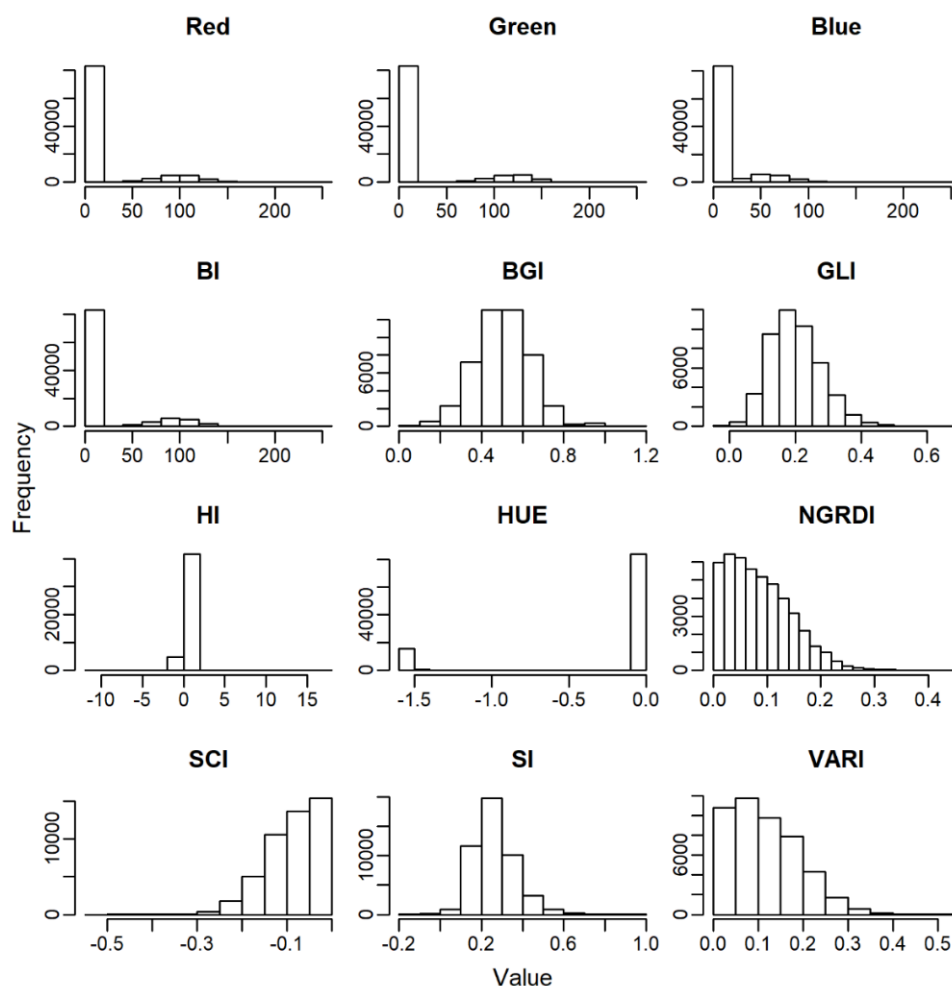
O estudo de Abreu *et al.* (2022) apresentou informações que possibilitam considerar que as redes neurais artificiais podem ser utilizadas como uma ferramenta eficaz para o tratamento de dados e agrupamento de acordo com suas semelhanças, como verificado neste estudo. Os resultados obtidos pelos autores forneceram as mesmas informações quando comparados às das técnicas estatísticas multivariadas tradicionais, considerando que os mapas auto-organizáveis mostraram-se mais fáceis de visualizar e analisar.

3.3 *Validação da fenotipagem por imagem para cenoura tropical*

Considerando a existência de diversidade genética entre os materiais, prosseguiu-se com a avaliação das entradas por imagem. A obtenção de dados a partir de imagens obtidas por ARPs na agricultura depende do processamento da imagem para extrair as informações adequadas e atingir os objetivos almejados (Walter *et al.*, 2015; Moeckel *et al.*, 2018). Após o cálculo dos índices de vegetação do primeiro voo, como descritos na **Tabela 1**, foi analisada a distribuição dos valores de cada índice nos pixels por meio de histogramas (**Figura 4**).

Verifica-se que a maioria dos índices apresenta alta variabilidade entre as entradas, com destaque para BGI, GLI, NGRDI, SCI, SI e VARI, indicando que esses índices são ferramentas potenciais para diferenciação de entradas de cenoura tropical.

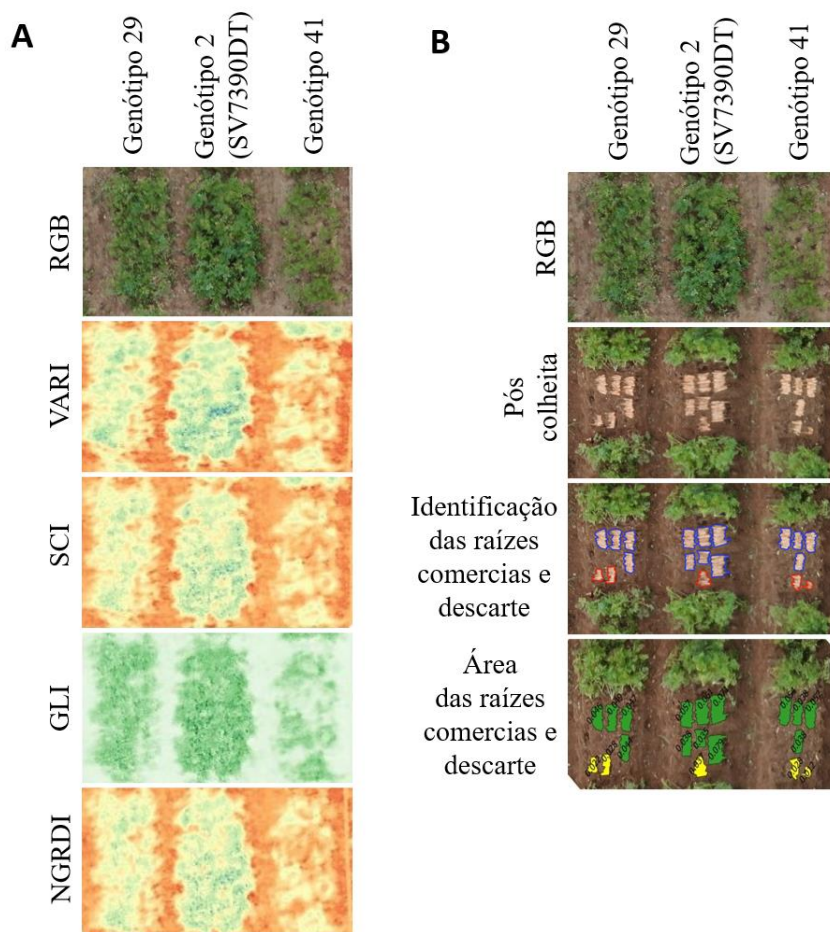
Figura 4 - Histogramas de distribuição e frequência de pixels encontrados para os canais do visível e para índices de vegetação em 60 entradas de cenoura no município de Carandaí-MG.



Fonte: autoral.

A **Figura 5A** demonstra o comportamento de alguns índices de seleção (VARI, SCI, GLI, NGRDI) calculados conforme **Tabela 1** a partir da ortofoto 1, da porção foliar das entradas de cenoura. Os índices de vegetação demonstraram comportamentos diferentes para as entradas em estudo e possibilitaram a análise de cada uma individualmente. A **Figura 5B** representa a área das raízes comerciais e descarte produzidas por cada entrada (calculadas por meio da ortofoto 2, obtida após colheita), e a separação das raízes comerciais e descartes. A área das raízes também trouxe importantes diferenças quanto a produção de cada genótipo.

Figura 5 - **(A)** Representação do comportamento dos índices de vegetação Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), Soil Color Index (SCI), Green Leaf Index (GLI), Normalized Green Red Difference Index (NGRDI) calculados a partir da ortofoto 1 contendo a porção foliar das entradas de cenoura. **(B)** Representação da determinação da área das raízes comerciais (MRA) (verde) e área das raízes descarte (URA) (amarelo) na ortofoto 2, obtidas pela identificação e contorno dos grupos de raízes comerciais e descarte em cada parcela. Ambas ortofotos e análises são provenientes de entradas de cenoura tropical, no município de Carandaí-MG.



Fonte: autoral.

Através da matriz de correlação (r de Pearson) foi possível verificar a possibilidade de seleção de entradas de cenoura a partir de índices de vegetação calculados usando imagens de ARP e entender a correlação que existe entre os caracteres agrônômicos (**Figura 6**). Entender a correlação é importante, pois características fortemente correlacionadas possibilitam a seleção indireta utilizando aquela de mais simples mensuração (Silva *et al.*, 2009). Correlação com

coeficiente r menor que 0,30 foram consideradas fracas, de 0,30 a 0,59 moderadas, de 0,60 a 0,89 fortes, e de 0,90 a 1,00 muito fortes.

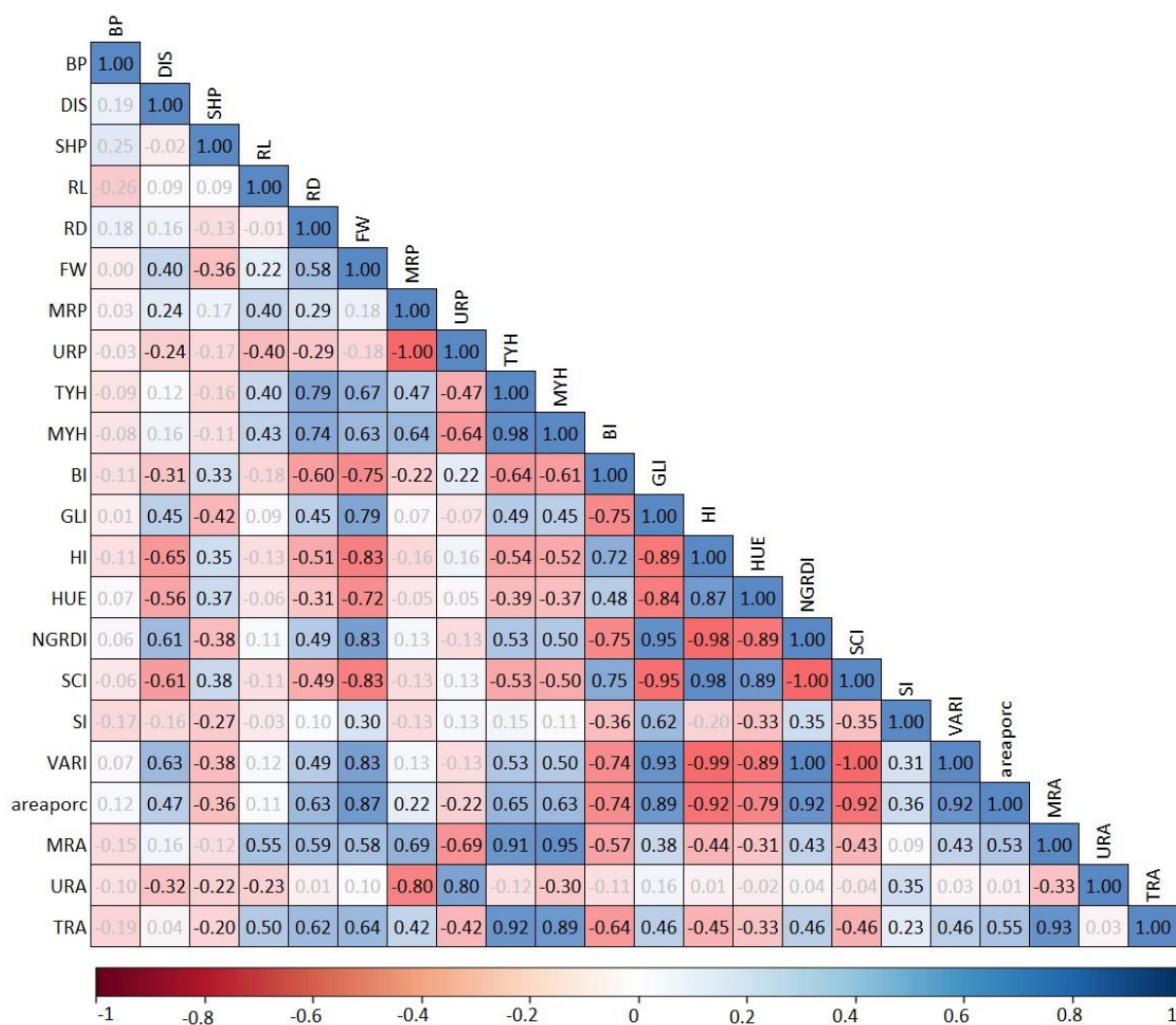
Quanto às correlações entre os caracteres agronômicos, verifica-se que diâmetro médio de raiz tem forte correlação com a estimativa de produtividade total (0,79) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (0,74). Foi encontrada forte correlação do peso de folha fresca com a estimativa de produtividade total (0,67) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (0,63). Enquanto a estimativa de produtividade de raízes comerciais teve forte correlação com porcentagem de raízes comerciais (0,64) e a produtividade total (0,98). A porcentagem de raízes comerciais apresentou uma correlação muito forte com a porcentagem de descarte (-1,00).

Outros autores também estudaram as correlações entre características agronômicas em cenouras. Carvalho *et al.* (2022), avaliando 36 genótipos de cenoura, encontraram forte correlação entre massa de raízes comerciais e massa de raízes descarte (1,00), semelhante ao que encontramos para o percentual de raízes comercializáveis e o percentual de raízes não comercializáveis. Eles também detectaram forte correlação da massa de raízes comerciais com o número de raízes comerciais, o comprimento médio de raízes e a massa média de raízes. De forma semelhante ao presente estudo, Silva *et al.* (2009), em ensaios de cenoura conduzidos em Brasília-DF, encontraram que a massa de raiz tem alta correlação com o diâmetro de raiz.

Para os índices de vegetação e área do objeto, calculados por meio das ortofotos, há correlações importantes com os caracteres agronômicos. Isso indica que genótipos de cenoura tropical podem ser avaliados indiretamente por índices de vegetação obtidos via sensoriamento remoto.

Destaca-se a correlação do índice de vegetação BI com o diâmetro médio de raiz (-0,60), a estimativa de produtividade total (-0,64) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (-0,61). O índice HI apresentou forte correlação com a severidade da queima-das-folhas (-0,65) e correlação moderada com o diâmetro médio de raiz (-0,51), a estimativa de produtividade total (-0,54) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (-0,52). O índice HUE demonstrou correlação moderada com a severidade da queima-das-folhas (-0,56). Enquanto o NGRDI teve forte correlação com a severidade da queima-das-folhas (0,61) e correlação moderada com o diâmetro médio de raiz (0,49), a estimativa de produtividade total (0,53) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (0,50).

Figura 6 - Matriz de correlação (r de pearson) para os caracteres agrônômicos, índices de vegetação e área de raízes no software, em entradas de cenoura tropical no município de Carandaí-MG. Correlações significativas pelo teste de pearson a 5% são exibidas em tons de azul (positivas) e vermelho (negativas). BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima-das-folhas, SHP - Porcentagem de ombro roxo ou verde (%), RL - Comprimento de raiz (cm), RD - Diâmetro de raiz (cm), LW - Peso da folha fresca (kg), MRP - Porcentagem de raízes comerciais (%), URP - Porcentagem de descarte (%), TYH - Estimativa de produtividade total ($t\ ha^{-1}$), MYH - Estimativa de produtividade de raízes comerciais ($t\ ha^{-1}$).



Fonte: autoral.

O índice SCI apresentou forte correlação com a severidade da queima-das-folhas (-0,61) e correlação moderada com o diâmetro médio de raiz (-0,49), a estimativa de produtividade total (-0,53) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (-0,50). O índice VARI teve forte

correlação com severidade da queima-das-folhas (0,63) e correlação moderada com o diâmetro médio de raiz (0,49), a estimativa de produtividade total (0,53) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (0,50). Todos os índices apontaram forte correlação com o peso de folha fresca, exceto o índice SI.

Quanto aos valores obtidos pela área calculada do objeto, verificou-se que área das raízes comerciais teve correlação moderada com comprimento médio de raiz (0,55), diâmetro médio de raiz (0,59) e peso da folha fresca (0,58); forte correlação com a porcentagem de raízes comerciais (0,69) e a porcentagem de descarte (-0,69); e correlação muito forte com a estimativa de produtividade total (0,91) e a estimativa de produtividade de raízes comerciais (0,95).

Enquanto a área das raízes de descarte apresentou forte correlação com a porcentagem de raízes comerciais (-0,80) e a porcentagem de descarte (0,80), a área total de raízes teve correlação moderada com o comprimento médio de raiz (0,50), porcentagem de raízes comerciais (0,42) e porcentagem de descarte (-0,42); forte correlação com o diâmetro médio de raiz (0,62), peso da folha fresca (0,64) e estimativa de produtividade de raízes comerciais (0,89); e correlação muito forte com a estimativa de produtividade total (0,92).

Estes resultados indicam que as entradas de cenouras tropicais podem ser avaliadas indiretamente através de sensoriamento remoto. Embora os estudos sobre fenotipagem de cenoura usando imagens RGB em ARPs sejam limitados e pesquisas adicionais devam ser realizadas, esta é uma metodologia de última geração para esta cultura. Os sensores RGB estão prontamente disponíveis, são baratos, fáceis de adquirir, têm capacidade de capturar imagens de alta resolução espacial e são amplamente utilizados para extrair características morfológicas e de cor em muitas espécies (Neupane; Baysal-Gurel, 2021; Sweet *et al.*, 2022). Diversos estudos indicam o potencial da ferramenta para fenotipagem de vegetais e já foram aplicados em outros vegetais, como cebola, alho, alface, berinjela, tomate e repolho.

Ballesteros *et al.* (2018), em estudo de monitoramento da biomassa de cebola na Espanha, afirmaram que a alta resolução espacial e temporal, e a flexibilidade no uso de câmeras RGB montadas em ARPs, oferecem novas possibilidades para monitoramento de culturas e estimativa de biomassa em comparação com outros sensores. Maciel *et al.* (2019) demonstraram que a fenotipagem de alto desempenho por meio de imagens foi altamente correlacionada com a metodologia tradicional na avaliação de alface roxa e, portanto, pode ser considerada uma alternativa para identificar diversidade genética em um banco de germoplasma.

Os resultados de Moeckel *et al.* (2018) demonstraram que dados gerados a partir de imagens RGB baseadas em ARPs podem ser usados para medir efetivamente a biomassa de hortaliças (erro relativo = 17,6%, 19,7% e 15,2% para berinjela, tomate e repolho, respectivamente), com uma precisão semelhante aos modelos de previsão de biomassa com base na mensuração da altura da cultura (erro relativo = 21,6, 18,8 e 15,2 para berinjela, tomate e repolho). Lee *et al.* (2021), confirmaram a aplicabilidade de imagens RGB na estimativa do conteúdo de clorofila na folha de cebola e alho, considerando a viabilidade econômica e versatilidade da câmera RGB acoplada a ARPs.

As câmeras RGB apresentam muitas vantagens e ampla aplicação na agricultura e hortaliças. No entanto, existem oportunidades e desafios sobre a fenotipagem usando imagens RGB baseadas em ARP. Como esses sensores só podem medir três bandas (vermelho, verde e azul) do espectro eletromagnético, isso faz com que as imagens RGB sejam menos precisas do que as imagens multiespectrais ou hiperespectrais em termos de resolução espectral do sistema de câmera. E as câmeras RGB devem ser operadas com cuidado para que haja coloração e iluminação uniformes nas imagens (Neupane; Baysal-Gurel, 2021; Sweet *et al.*, 2022).

No entanto, foi comprovado que o uso de fenotipagem de imagens usando um sensor RGB reduz os custos de avaliação (Maciel *et al.*, 2019). O experimento foi realizado com 60 genótipos em três repetições, totalizando 180 parcelas. Os processos de colheita e avaliação levaram cerca de 64 horas, o que teria resultado em um custo de mão de obra de cerca de R\$2.000,00. A duração do voo e o processamento das imagens levaram apenas seis horas. Esse tempo foi dez vezes menor quando comparado ao procedimento manual. Neste contexto, a fenotipagem de imagens pode ser uma excelente alternativa para obter resultados rápidos, satisfatórios e de baixíssimo custo. Herzig *et al.* (2021), em seus estudos com cevada, compararam sensores RGB e multiespectrais para avaliar a fenotipagem de alto rendimento. Os autores concluíram que, para previsão de rendimento, o RGB seria preferível ao sistema multiespectral devido ao menor custo e facilidade de aquisição e processamento de imagens.

Neste trabalho, a fenotipagem de imagens utilizando um sensor RGB foi eficiente na avaliação indireta de entradas de cenoura. Em pesquisas futuras, poderá ser considerado o uso de técnicas de *machine learning*, *deep learning* e redes neurais, como YOLO, para reconhecimento e classificação de raízes.

3.4 Seleção das melhores entradas de cenoura

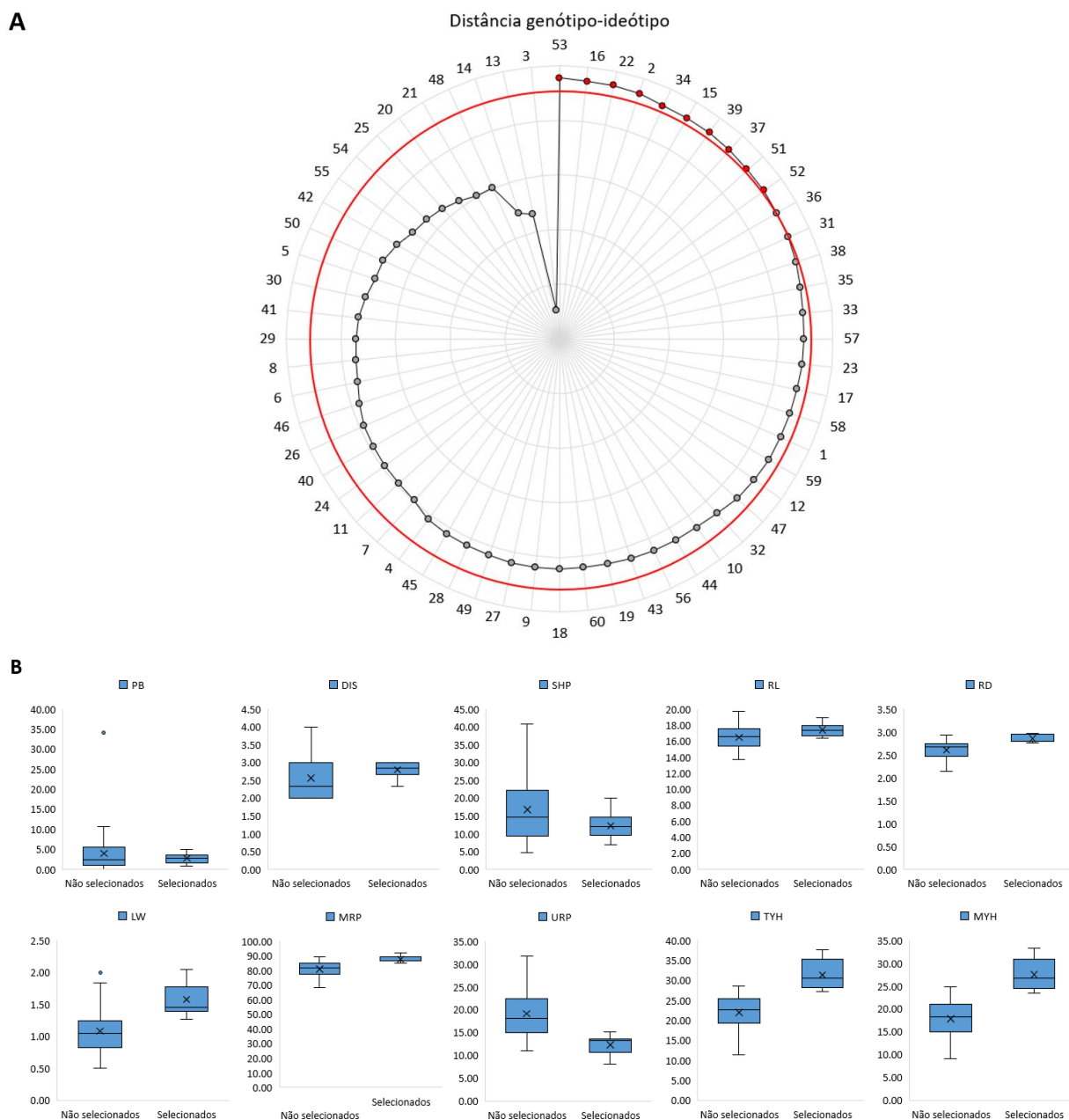
A seleção de entradas de cenoura mais produtivas é fundamental para os programas de melhoramento dessa cultura visando o aumento na produção com redução dos custos (Carvalho *et al.*, 2019). Assim, foram selecionados os indivíduos superiores entre as entradas de cenoura tropical por meio do índice distância genótipo-ideótipo, com base nos dados dos caracteres agronômicos (**Figura 7**). Índices de seleção constituem-se de uma alternativa que permite efetuar a seleção simultânea com eficiência, pela combinação de vários caracteres (Cruz, 2013).

Foram selecionadas 10 entradas superiores, sendo 2, 15, 16, 22, 34, 37, 39, 51, 52 e 53 (**Figura 7A**). Estas entradas estão no mesmo grupo (V) definido pelo mapa auto-organizável de Kohonen (**Figura 3**), já apontado como superior devido as variáveis de maior contribuição para formação desse grupo. A **Figura 7B** mostra boxplots das entradas selecionados e não selecionados, de acordo com os caracteres agronômicos. Verifica-se maiores médias para os caracteres que se deseja aumentar RL, RD, LW, CYP, TYH, CYH; e menores médias para os caracteres que se almeja reduzir BP, DIS, SHP e UYP.

Estudo realizado por Carvalho *et al.* (2017a) corrobora os resultados encontrados no presente estudo. Eles utilizaram o índice de seleção da distância ao ideótipo em cenoura e verificaram que a seleção simultânea para os caracteres massa total de raízes, massa de raízes comerciais, diâmetro de raízes, maior porcentagem de raízes com formato cilíndrico, maior porcentagem de raízes sem ombro verde e maior porcentagem de raízes com coloração alaranjada escura possibilita ganhos positivos para todos os caracteres, demonstrando a eficiência dos índices.

A seleção de genótipos superiores com ganhos positivos nos caracteres de interesse também foi observada por outros autores. Carvalho *et al.* (2022), em estudo com 36 genótipos de cenoura em Brasília, encontraram que o índice de seleção genótipo-ideótipo, utilizando os coeficientes de variação genéticos como peso econômico, proporcionou maiores ganhos para o conjunto de caracteres avaliados. Como vantagens, Olivoto e Nadino (2021) indicam que o índice genótipo-ideótipo pode efetivamente selecionar tratamentos/genótipos superiores com base em dados de várias características, ajudando os profissionais a tomarem melhores decisões estratégicas para uma seleção multivariada eficaz em experimentos biológicos.

Figura 7 - (A) Ranking de 60 entradas de cenoura em ordem ascendente e entradas selecionadas (em vermelho) com base na distância genótipo-ideótipo. O círculo vermelho refere-se para o ponto de corte de acordo com a pressão de seleção. (B) Boxplots das entradas selecionadas e não selecionados de acordo com os caracteres agrônômicos: BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queimada-folhas, SHP - Porcentagem de ombro roxo ou verde (%), RL - Comprimento de raiz (cm), RD - Diâmetro de raiz (cm), LW - Peso da folha fresca (kg), MRP - Porcentagem de raízes comerciais (%), URP - Porcentagem de descarte (%), TYH - Estimativa de produtividade total ($t\ ha^{-1}$), MYH - Estimativa de produtividade de raízes comerciais ($t\ ha^{-1}$).



Fonte: autoral.

4 CONCLUSÕES

Observou-se a existência de variabilidade genética entre as entradas de cenoura tropical e a formação de seis grupos por meio da rede neural artificial pelo mapa auto-organizável de Kohonen. O grupo V foi formado por 16 entradas, dentre elas os híbridos comerciais, entradas 1 e 2, com maior contribuição das variáveis relacionadas à severidade da queima-de-folhas, qualidade e produtividade de raízes.

Os índices de vegetação HI, HUE, NGRDI, SCI e VARI apresentaram forte ou moderada correlação com a severidade da queima-das-folhas. Enquanto os índices BI, HI, NGRDI, SCI e VARI tiveram forte ou moderada correlação com os caracteres agronômicos: diâmetro médio de raiz, estimativa de produtividade total e estimativa de produtividade de raízes comerciais. A área das raízes comerciais e área total de raízes tiveram forte ou moderada correlação com os caracteres agronômicos: comprimento e diâmetro médio de raiz, peso da folha fresca, porcentagem de raízes comerciais e descarte, estimativa de produtividade total e produtividade de raízes comerciais. A área das raízes descarte apresentou forte correlação com porcentagem de raízes comerciais e porcentagem de descarte. Isso indica que entradas de cenoura tropical podem ser avaliadas indiretamente via sensoriamento remoto, para características relacionadas à severidade da queima-de-folhas e potencial produtivo.

Foram selecionadas 10 entradas pela distância-genótipo-ideótipo, sendo as entradas 2, 15, 16, 22, 34, 37, 39, 51, 52 e 53, que estão no mesmo grupo pelo mapa auto-organizável de Kohonen, confirmando sua superioridade no presente estudo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. J. M. D.; LORENÇO, M. S.; FERREIRA, A. N.; SCALICE, H. K.; VILAS BOAS, E. V. D. B.; PICCOLI, R. H.; CARVALHO, E. E. N. Artificial Neural Networks for the Evaluation of Physicochemical Properties of Carrots (*Daucus carota* L.) Subjected to Different Cooking Conditions as an Alternative to Traditional Statistical Methods. **ACS Food Science & Technology**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 143-150, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00375>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsfoodscitech.1c00375#>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- BALLESTEROS, R.; ORTEGA, J. F.; HERNANDEZ, D.; MORENO, M. A. Onion biomass monitoring using UAV-based RGB imaging. **Precision agriculture**, [s.l.], v. 19, n. 5, p. 840-857, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9560-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-018-9560-y>. Acesso em: 9 set. 2024.
- CARVALHO, A. D. F. de; SILVA, G. O. da; PEREIRA, G. E. Direct selection for phenotypic traits in carrot genotypes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 354-358, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620190316>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/D4xPrGVpXycJbCS3jHSRKWL/?lang=en>. Acesso em: 9 set. 2024.
- CARVALHO, A. D. F. de; PEREIRA, G. E.; SILVA, G. O. da. Estimates of genetic gains in the carrot using different selection indices. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 16, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v16i0.7154>. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/agroambiente/article/view/7154>. Acesso em: 9 set. 2024.
- CARVALHO, A. D. F. de; NOGUEIRA, M. T. M.; SILVA, G. O.; LUZ, J. M. Q.; MACIEL, G. M.; RABELO, P. G. Seleção de genótipos de cenoura para caracteres fenotípicos de raiz. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 97-102, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170115>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/RcY3SjHq7tb9gZGCWhWyY7H/?lang=pt>. Acesso em: 9 set. 2024.
- CARVALHO, A. D. F. de; SILVA, G.O. Divergência genética entre genótipos de cenoura através de caracteres agrônômicos. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 11, n. 2, p. 137-144, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i2.3642>. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/agroambiente/article/view/3642>. Acesso em: 9 set. 2024.
- CRUZ, C. D. Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/21251/pdf>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- DHONDT, S.; WUYTS, N.; INZÉ, D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. **Trends Plant Sci.**, [s.l.], v.18, n.8, p.428-439, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.04.008>. Disponível em: <https://www.cell.com/trends/plant->

[science/abstract/S1360-1385\(13\)00081-2?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS1360138513000812%3Fshowall%3Dtrue](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(13)00081-2?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS1360138513000812%3Fshowall%3Dtrue). Acesso em: 9 set. 2024.

ESCADAFAL, R.; BELGHITH, A.; BEM, M. H. Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. In *Actes du Sixième Symposium International. Mesures physiques et Signatures spectrales en Télédétection*, v. 494, p.7-21, 1994.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations statistics database**. Rome, Italy, 2020. Portal. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sens. Environ.**, [s.l.], v. 80, p.76-87, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425701002899?via%3Dihub>. Acesso em: 9 set. 2024.

GUO, Y.; YIN, G.; SUN, H.; WANG, H.; CHEN, S.; SENTHILNATH, J.; FU, Y. Scaling Effects on Chlorophyll Content Estimations with RGB Camera Mounted on a UAV Platform Using Machine-Learning Methods. **Sensors**, [s.l.], v. 20, n. 18, p. 5130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20185130>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5130>. Acesso em: 9 set. 2024.

HERZIG, P.; BORRMANN, P.; KNAUER, U.; KLÜCK, H.-C.; KILIAS, D.; SEIFFERT, U.; PILLEN, K.; MAURER, A. Evaluation of RGB and Multispectral Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for High-Throughput Phenotyping and Yield Prediction in Barley Breeding. **Remote Sens.**, [s.l.], v.13, p.2670, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13142670>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/14/2670>. Acesso em: 9 set. 2024.

JANASZEK, MONIKA A.; TRAJER, JĘDRZEJ J. Method of evaluating diversity of carrot roots using a self-organizing map and image data. **Computers and electronics in agriculture**, [s.l.], v. 79, n. 1, p. 75-81, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.07.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169911001736?via%3Dihub>. Acesso em: 09 set. 2024.

LE CLERC, V.; MARQUES, S.; SUEL, A.; HUET, S.; HAMAMA, L.; VOISINE, L.; AUPERPIN, E.; JOURDAN, M.; BARROT, L.; PRIEUR, R.; BRIARD, M. QTL mapping of carrot resistance to leaf blight with connected populations: stability across years and consequences for breeding. **Theoretical Applied Genetics**, [s.l.], v.8, p.1-11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2576-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-015-2576-z>. Acesso em: 9 set. 2024.

LEE, D. H.; JEONG, C. H.; GO, S. H.; PARK, J. H. Evaluation of applicability of RGB image using support vector machine regression for estimation of leaf chlorophyll content of onion and garlic. **Korean Journal of Remote Sensing**, Coreia, v. 37, n. 6_1, p. 1669-1683, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.7780/kjrs.2021.37.6.1.15>. Disponível em:
<https://koreascience.or.kr/article/JAKO202102153692178.page>. Acesso em: 10 out. 2024.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M.M.; JOHNSON, D.E. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. **Geocarto Int.**, [s.l.], v.16, p.65–70, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106040108542184>. Acesso em: 14 out. 2024.

MACIEL, G. M.; DE ARAÚJO GALLIS, R. B.; BARBOSA, R. L.; PEREIRA, L. M.; SIQUIEROLI, A. C. S.; PEIXOTO, J. V. M. Image phenotyping of inbred red lettuce lines with genetic diversity regarding carotenoid levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s.l.], v.81, p.154-160, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.016>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030324341930008X?via%3Dihub>. Acesso em: 14 out. 2024.

MATHIEU, R.; POUGET, M.; CERVELLE, B.; ESCADAFAL, R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated 498 using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. **Remote Sens Environ.**, [s.l.], v.66, p.17-28, 1998. DOI:
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-3). Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425798000303?via%3Dihub>. Acesso em: 14 out. 2024.

MOECKEL, T.; DAYANANDA, S.; NIDAMANURI, R. R.; NAUTIYAL, S.; HANUMAIAH, N.; BUERKERT, A.; WACHENDORF, M. Estimation of vegetable crop parameter by multi-temporal UAV-borne images. **Remote Sensing**, [s.l.], v.10, n.5, p. 805, 2018. DOI:
<https://doi.org/10.3390/rs10050805>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/5/805>. Acesso em: 14 out. 2024.

MONYR, N.; AGOUBI, B.; BERRADA, M.; ABDELAZIZ, A.; EL HMAIDI, A. Topological Maps of Kohonen Self-Organization (SOM) Applied to the Study of Sediments Contaminated With Heavy Metals. **American Journal of Engineering Research (AJER)**, [s.l.], v.5, p. 99-105, 2016. Disponível em: [https://ajer.org/papers/v5\(04\)/K05040990105.pdf](https://ajer.org/papers/v5(04)/K05040990105.pdf). Acesso em: 14 out. 2024.

NEUPANE, K.; BAYSAL-GUREL, F. Automatic Identification and Monitoring of Plant Diseases Using Unmanned Aerial Vehicles: A Review. **Remote Sens.**, [s.l.], v.13, p. 3841, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13193841>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/19/3841>. Acesso em: 14 out. 2024.

OLIVOTO, T.; NARDINO, M. MGIDI: toward an effective multivariate selection in biological experiments. **Bioinformatics**, [s.l.], v. 37, n. 10, p. 1383-1389, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>. Disponível em:
<https://academic.oup.com/bioinformatics/article/37/10/1383/5998663>. Acesso em: 14 out. 2024.

PEREIRA, R. B., DE CARVALHO, A. D. F., PINHEIRO, J. B., SILVA, G. O. da; VIEIRA, J. V. Resistência de populações de cenoura à queima-das-folhas com diferentes níveis de germoplasma tropical. **Horticultura brasileira**, Brasília, v. 30, p. 489-493, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000300022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/7ZZPyvfFyFFJg7k5CKtrJxk/>. Acesso em: 14 out. 2024.

RANDELOVIĆ, P.; ĐORĐEVIĆ, V.; MILIĆ, S.; BALEŠEVIĆ-TUBIĆ, S.; PETROVIĆ, K.; MILADINOVIĆ, J.; ĐUKIĆ, V. Prediction of Soybean Plant Density Using a Machine Learning Model and Vegetation Indices Extracted from RGB Images Taken with a UAV. **Agronomy**, [s.l.], v.10, p.1108, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10081108>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/8/1108>. Acesso em: 14 out. 2024.

RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C. Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. **Photogramm. Eng. Remote Sensing**, [s.l.], v.43, p.1541-1552, 1977. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1977journal/dec/1977_dec_1541-1552.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

RISSO, J.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, R. D. V. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v.47, n.9, p.1317-1326, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/KvV5m8S3VDMcQC8QxTT63Bg/?lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2024.

RYU, J. H.; NA, S. I.; CHO, J. Inter-comparison of normalized difference vegetation index measured from different footprint sizes in cropland. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 12, n. 18, p. 2980, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12182980>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/18/2980>. Acesso em: 15 out. 2024.

SILVA, G. O. da; VIEIRA, J. V.; VILELA, M. S. Seleção de caracteres de cenoura cultivada em dois sistemas de produção agroecológicos no Distrito Federal. **Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 5, 2009. Disponível em: <https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/3474>. Acesso em: 15 out. 2024.

SIMON, P. W. *et al.* Carrot. In: PROHENS, J.; NUEZ, F. (ed.). **Vegetables II: handbook of plant breeding**, vol 2, New York: Springer, 2008. v. 2, p.327-357. *E-book*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-74110-9_8. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-74110-9_8. Acesso em: 11 nov. 2024.

SWEET, D.D.; TIRADO, S.B.; SPRINGER, N.M.; HIRSCH, C.N.; HIRSCH, C.D. Opportunities and challenges in phenotyping row crops using drone-based RGB imaging. **The Plant Phenome J.**, [s.l.], v. 5, p.e20044, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppj2.20044>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppj2.20044>. Acesso em: 15 out. 2024.

TUCKER, C. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sens. Environ.**, [s.l.], v.8, p.127-150, 1979. DOI: [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0034425779900130?via%3Dihub>. Acesso em: 15 out. 2024.

VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VICTORIA, D. D. C.; GARÇON, E. A. M.; BOLFE, É. L.; ANDRADE, R. G.; SILVA, G. B. S. D. NDVI temporal series from the SPOT Vegetation sensor and SAM algorithm applied to sugarcane mapping. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 47, n. 9, p.1337-1345, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/fBLgmDXjgwCYmMzrKT797CP/>. Acesso em: 15 out. 2024.

WALTER, A.; LIEBISCH, F.; HUND, A. Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. **Plant methods**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0056-8>. Disponível em: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-015-0056-8>. Acesso em: 15 out. 2024.

XIE, J.; ZHOU, Z.; ZHANG, H.; ZHANG, L.; LI, M. Combining Canopy Coverage and Plant Height from UAV-Based RGB Images to Estimate Spraying Volume on Potato. **Sustainability**, [s.l.], v.4, p.6473, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14116473>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6473>. Acesso em: 15 out. 2024.

YADAV, S. P. IBARAKI, Y.i; GUPTA, S. D. Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, [s.l.], v. 100, n. 2, p. 183-188, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-009-9635-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11240-009-9635-6>. Acesso em: 15 out. 2024.

CAPÍTULO 2 - Análise da capacidade de combinação para obtenção de híbridos de cenoura tropical

RESUMO

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma hortaliça de importância global, que ainda apresenta escassos estudos sobre grupos heteróticos e análise dialélica para obtenção de combinações híbridas. Diante disso, objetivou-se estimar as capacidades de combinação e identificar os melhores genitores de cenoura para obtenção de híbridos adaptados ao clima tropical, com níveis metabólitos superiores. O experimento foi realizado em Carandaí-MG, onde foram selecionadas 5 entradas de cenoura nas suas versões fértil e macho-estéril, que passaram por cruzamentos em modelo dialélico balanceado (5 x 4). Foram avaliados 20 híbridos de cenoura, 5 genitores nas versões fértil e macho-estéril e três entradas comerciais como testemunhas, no verão dos anos 2020/2021 e 2021/2022. Após 115 dias da semeadura, foi realizada a avaliação agrônômica, feita a análise dialélica pelo método III de Griffing, e realizada a análise de GGE biplot. Também foi determinado o conteúdo foliar de carotenoides totais, clorofila a, b e total; e o conteúdo nas raízes de carotenoides totais e licopeno. Observou-se que diversos caracteres agrônômicos em cenoura tropical apresentaram efeito significativo de CGC, que indica efeitos gênicos aditivos. As entradas 5, 4 e 2 foram os melhores genitores de acordo com a CGC para diferentes características. Destacaram-se as CEC dos híbridos 1x2 e 3x5 para porcentagem de florescimento e peso da folha fresca no ambiente 1; e híbridos 1x5 e 5x3 para porcentagem de florescimento no ambiente 2. Através do GGE biplot, verificou-se que os híbridos 1x2 e 3x2 apresentaram médias superiores para diâmetro de raiz, encontrando-se dentro do grupo das melhores porcentagens de florescimento e com boa estabilidade entre os ambientes. Os híbridos 2x4, 3x1, 4x1, 4x2 demonstraram maiores conteúdos de metabólitos na folha e raiz. Com esses dados, verifica-se a possibilidade de obtenção de híbridos superiores para o mercado de cenoura tropical.

Palavras-chave: *Daucus carota* L.; sustentabilidade; análise dialélica; GGE biplot; clorofila; carotenoides.

ABSTRACT

Carrot (*Daucus carota* L.) is a vegetable of global importance, which still presents few studies on heterotic groups and diallel analysis to obtain hybrid combinations. Therefore, the objective was to estimate the combination ability and identify the best carrot parents to obtain hybrids adapted to the tropical climate, with higher levels of metabolites. The experiment was carried out in Carandaí-MG, where 5 carrot entries were selected in their fertile and male-sterile versions, which were crossed in a balanced diallel model (5 x 4). 20 carrot hybrids were evaluated, 5 parents in the fertile and male-sterile versions and three commercial entries as controls, in the summer of 2020/2021 and 2021/2022. After 115 days of sowing, the agronomic evaluation, the diallel analysis according to Griffing's method III, and the GGE biplot analysis were carried out. The leaf content of total carotenoids, chlorophyll a, b and total was also determined; and the root content of total carotenoids and lycopene. It was observed that several agronomic traits in tropical carrots showed a significant GCA effect, indicating additive gene effects. Entries 5, 4 and 2 were the best parents according to GCA for different traits. The SCA of the 1x2 and 3x5 hybrids stood out for flowering percentage and fresh leaf weight in environment 1; and hybrids 1x5 and 5x3 for flowering percentage in environment 2. Through GGE biplot, it was found that hybrids 1x2 and 3x2 presented higher averages for root diameter, they are within the group of the best flowering percentage and have good stability between environments. The 2x4, 3x1, 4x1, 4x2 hybrids demonstrated higher metabolite contents in the leaf and root. With these data, it is possible to obtain superior hybrids for the tropical carrot market.

Keywords: carotenoids; chlorophyll; *Daucus carota* L.; diallel analysis; GGE biplot; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma das hortaliças de maior importância global em termos de área de produção, valor de mercado, sabor agradável e composição nutricional. É excelente fonte de carotenoides, compostos fenólicos, fibras alimentares, vitaminas e carboidratos (Selvakumar *et al.*, 2019; Yoo *et al.*, 2020; Chevalier *et al.*, 2021). Apresenta produção maior que 41 milhões de toneladas e área de 1,1 milhão de hectares por ano em todo o mundo (FAO, 2023). No Brasil, aponta estimativas da produção superiores à 700 mil toneladas por ano, sendo a hortaliça do grupo de raízes com maior valor econômico no país (Carvalho *et al.*, 2022).

Atualmente, o mercado de sementes de cenouras é voltado para cultivares híbridas. A obtenção de híbridos de cenoura é possibilitada pela disponibilidade de esterilidade masculina citoplasmática (CMS) no seu germoplasma (Turner *et al.*, 2018). Consequentemente, a heterose é considerada um mecanismo promissor para aumentar o rendimento de raízes comerciais, conteúdo de carotenoides e resistência a doenças (Carvalho *et al.*, 2016). Apesar do potencial econômico da cenoura, existem poucos híbridos para cultivo no verão, especialmente nas condições tropicais do Brasil.

A obtenção de híbridos pode ser estudada pela análise dialélica, a qual propicia estimativas de parâmetros genéticos e capacidades de combinação. Essas informações são úteis para a seleção de genitores a serem utilizados na hibridação, e no entendimento da ação gênica envolvida na determinação dos caracteres e da existência de heterose, proporcionando, assim, grandes avanços para a seleção (Cruz *et al.*, 2012). O uso de análise dialélica para avaliar combinações híbridas é muito utilizado em diversas espécies, como milho (Abd El-Azeem *et al.*, 2021), tomate (Kumar *et al.*, 2016), berinjela (Datta *et al.*, 2021) e cebola (Patil; Subramaniam, 2020).

No entanto, o desenvolvimento e adoção de grupos heteróticos na cenoura permanecem limitados (Turner *et al.*, 2018). Há uma lacuna em relação ao uso de análise dialélica em cenoura, especialmente devido ao modo de obtenção de híbridos via macho esterilidade. Diante disso, objetivou-se estimar as capacidades de combinação e identificar os melhores genitores de cenoura para obtenção de híbridos adaptados ao clima tropical, com níveis de metabólitos nutricionais superiores.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material genético e local do experimento

O experimento foi realizado na estação experimental de hortaliças da Bayer no município de Carandaí-MG (1.096 m altitude), e a análise das amostras foi realizada na Universidade Federal de Uberlândia - UFU, campus Monte Carmelo. Foram selecionados 5 genótipos de cenoura macho-férteis e suas 5 respectivas linhas isogênicas macho-estéril, pertencentes ao programa de melhoramento de cenoura tropical da Seminis (Brasil). Os genótipos passaram por cruzamentos em modelo dialélico balanceado de Griffing método III (5 x 4), entre maio e outubro de 2020 (**Figura 1**). Os cruzamentos foram realizados de forma controlada em estufas, onde foram colocadas moscas (*Drosophila melanogaster*) para polinização.

Figura 1 - Cruzamentos entre 5 progenitores férteis de cenoura e suas respectivas linhagens isogênicas macho estéreis, em um modelo dialélico balanceado (5 x 4). P - parental, MS – macho estéril, F - fértil.

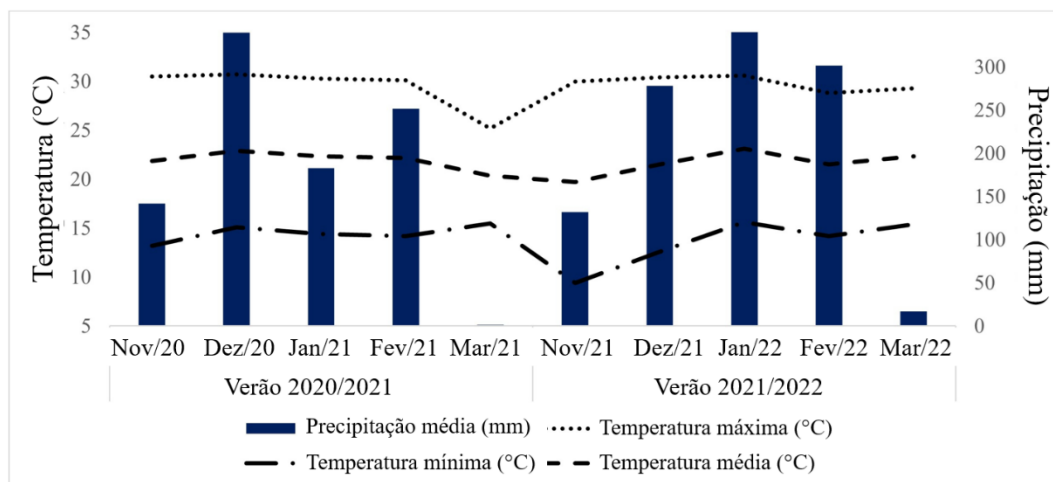
MS/F	P1F	P2F	P3F	P4F	P5F
P1MS		P1MSxP2F	P1MSxP3F	P1MSxP4F	P1MSxP5F
P2MS	P2MSxP1F		P2MSxP3F	P2MSxP4F	P2MSxP5F
P3MS	P3MSxP1F	P3MSxP2F		P3MSxP4F	P3MSxP5F
P4MS	P4MSxP1F	P4MSxP2F	P4MSxP3F		P4MSxP5F
P5MS	P5MSxP1F	P5MSxP2F	P5MSxP3F	P5MSxP4F	

Fonte: autoral.

Foram avaliados os 20 híbridos de cenoura, os 10 genitores e três entradas comerciais como testemunhas (dois híbridos e uma cultivar tropical de polinização aberta), no verão dos anos 2020/2021 e 2021/2022. Em ambos os ensaios, foi utilizado o delineamento experimental de blocos completos casualizados (DBC) com três repetições. Os materiais foram semeados em canteiros de 1,5 m de largura e as parcelas foram constituídas de cinco linhas de plantio com 2 m comprimento, espaçadas em 20 cm entre si. As plantas de cada linha espaçavam entre si em 5 cm. A área útil da

parcela foi constituída de todas as linhas, excluindo-se 50 cm no início e final das parcelas. Os dados de precipitação e temperatura durante o experimento estão apresentados na **Figura 2**.

Figura 2 - Temperatura e precipitação representando o período experimental em Carandaí, MG, Brasil, no verão 2020/2021 e verão 2021/2022.

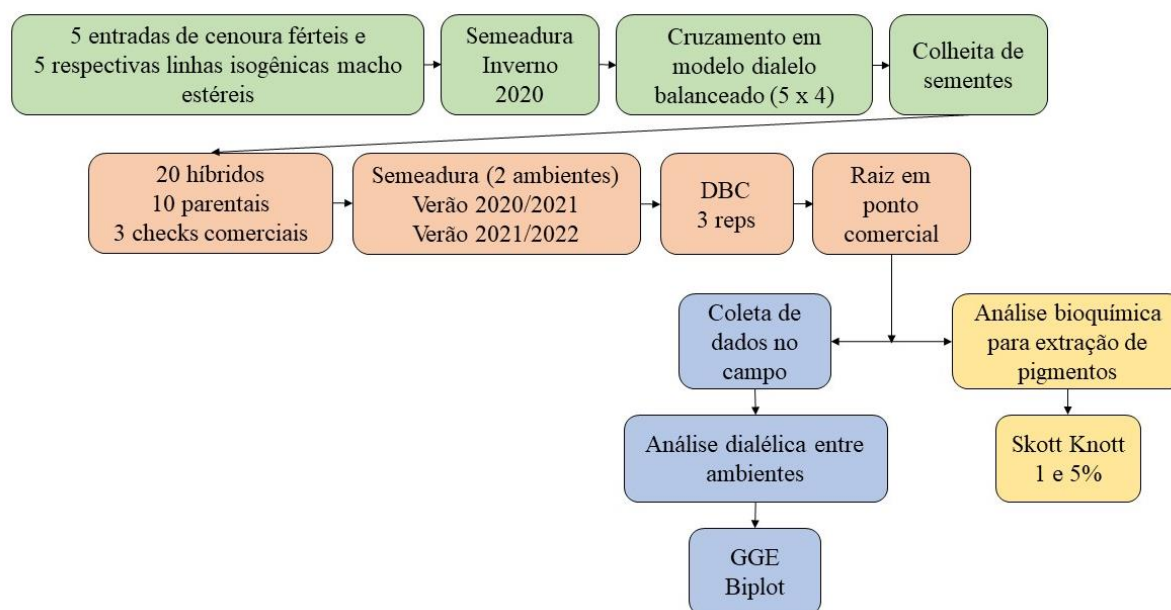


Fonte: autoral.

2.2 Fluxo do experimento

As etapas metodológicas para avaliação agrônômica, análises bioquímicas e análise dos dados estão apresentadas no fluxograma da **Figura 3**.

Figura 3 - Fluxograma das etapas de cruzamento, coleta de dados em campo, análise bioquímica e análise de dados em entradas de cenoura tropical na cidade de Carandaí-MG.



Fonte: autoral.

2.3 Avaliação dos caracteres agrônômicos no campo

Decorrido 110 dias após a semeadura, foi feita a avaliação agrônômica das entradas. Foi contado o número de plantas florescendo na parcela e calculada a porcentagem de florescimento (BP). Em seguida, foi avaliada a severidade da queima-das-folhas (DIS), utilizando-se uma escala de notas de 1 a 5 (1 = > 90% de severidade, 2 = 50-90%, 3 = 12,5-50%, 4 = 3,8-12,55% e 5 = < que 3,8% de severidade) (Pereira et al., 2012). Para esses caracteres são desejados menores valores.

Após a colheita, foi mensurado o peso da folha fresca (kg) (LW). Foram avaliados o número e a massa (kg) de raízes comercializáveis (10 a 26 cm de comprimento) e não comercializáveis (menores que 10 cm de comprimento, quebradas, rachadas e bifurcadas). Os dados foram transformados em estimativa de produtividade de raízes comercializáveis ($t\ ha^{-1}$) (MYH) e estimativa de produtividade total ($t\ ha^{-1}$) (TYH). Em uma amostra ao acaso de 10 raízes, foram determinados o diâmetro médio de raízes (realizado na porção média da raiz) (RD) e o comprimento médio das raízes (RL).

2.4 Análise dialélica

As análises dialélicas em cada ambiente foram obtidas a partir das médias de cada local, segundo os modelos estatísticos de Griffing (1956), método 3, o qual considera o efeito das F1's e recíprocos, com auxílio do software GENES (Cruz, 2013). O modelo matemático estatístico, adaptado por Cruz e Regazzi (2001) é dado por:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + r_{ij} + \bar{e}_{ij}$$

em que y_{ij} é o valor médio dos F1's e recíprocos, onde $i, j=1, 2, \dots$; μ é a média geral; g_i, g_j é o efeito da capacidade geral de combinação do i -ésimo e j -ésimo genitor, respectivamente; s_{ij} é o efeito da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os genitores i e j ; r_{ij} é o efeito recíproco, que mede as diferenças proporcionadas pelo genitor i , ou j , quando utilizados como macho ou fêmea no cruzamento; e e_{ij} é o erro experimental médio.

2.5 GGE Biplot

A análise GGE biplot (Genotype main effect plus Genotype by Environment interaction) (Yan, 2001) foi proposta para analisar os dados do Multi-Environment Trial (MET) usando apresentação gráfica. GGE biplot depende da análise de componentes principais para interpretar os dois componentes (PC1 e PC2): genótipo (G) e interação genótipo x ambiente (GxE). A apresentação gráfica do biplot será válida se explicar a maior parte (pelo menos 70%) dos componentes (Yan *et al.*, 2007).

Os dados de porcentagem de florescimento e diâmetro de raízes em todos os ambientes foram submetidos à construção do GGE biplot de acordo com o modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \theta_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

onde, Y_{ij} é o valor do efeito misto da média geral (μ) modificado pelo efeito principal do genótipo (α_i), o efeito principal do ambiente (β_j) e a interação genótipo por ambiente devido ao genótipo i e ao ambiente j (θ_{ij}), mais qualquer erro aleatório (ε_{ij}).

Ferramentas GGE biplot foram usadas para identificar entradas de cenoura altamente adaptáveis com média máxima por 'Mean vs Stability' (Yan, 2001). A visualização da coordenada ambiental média (AEC – average-environment coordinate) do GGE biplot revelou os altos rendimentos médios e entradas estáveis através da abscissa AEC e da ordenada AEC,

respectivamente. O padrão ‘which-won-where’, uma propriedade intrínseca do GGE biplot, exibida pela propriedade do produto interno do biplot do conjunto de dados genótipo por ambiente, também foi apresentado visualmente. A associação dentro e entre os genótipos e ambientes foi mostrada visualmente no gráfico ‘Discriminativeness vs Representativeness’.

A análise foi realizada com auxílio do pacote GGEbiplotGui implementado no software R (R Development Core Team, 2014).

2.6 Análise bioquímica para extração de pigmentos na folha e raiz

Para determinação do valor nutricional de cada entrada, foi avaliado o conteúdo foliar de carotenoides totais (CTL), clorofila a (CloA), clorofila b (CloB) e clorofila total (CloT); e o conteúdo nas raízes, de β -caroteno (CTR) e licopeno (LP). As amostras foram obtidas no experimento realizado no ano 2020/2021, onde foram coletadas as folhas e cinco raízes de cada parcela e encaminhadas ao laboratório.

As folhas e raízes, ainda frescas, foram lavadas e trituradas. Foi utilizado 0,5 g de folha em 5 mL da solução de acetona e éter de petróleo (1:1), e 1 g de raiz em 3 mL da solução de acetona e éter de petróleo (1:1). Após 24 horas de reação em ausência de luz, foi realizada a leitura da absorbância do extrato sobrenadante em espectrofotômetro digital modelo UV-5100. Os comprimentos de onda empregados foram: 470 nm para CTL e CTR; 645, 652 e 663 nm para CloA, CloB, CloT; e 450 nm para LP. A partir das absorbâncias, foram calculados os teores de pigmentos ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de tecido fresco), conforme Francis (1982) e Cassetari (2015).

As médias dos teores de cada pigmento foram agrupadas com base no teste de Scott-Knott ao nível de 1% e 5% de probabilidade, com auxílio do software GENES (Cruz, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dialélica

Observa-se existência de variabilidade genética entre as entradas de cenoura para todos os caracteres avaliados, evidenciando a existência de variabilidade fenotípica entre elas (**Tabela 1**).

Tabela 1- Análise de variância conjunta para entradas de cenoura tropical em dialelo balanceado 5x4, avaliadas em Carandaí-MG no verão 2020/2021 e 2021/2022.

FV	GL	Quadrado médio						
		BP	DIS	RL	RD	LW	MYH	TYH
Bloco/Ambiente	4	45,37	1,11	8,84	0,15	5,12	921,77	824,70
Bloco	2	60,16	1,51	17,58	0,26	0,37	1423,26	1293,43
Bloco x Ambiente	2	30,59	0,71	0,09	0,03	9,86	420,28	355,97
Genótipos	29	47,67**	1,45* *	3,55**	0,16* *	4,33* *	242,98* *	364,96**
Ambiente	1	344,20n s	0,09n s	516,81* *	0,23n s	6,08n s	8572,84 *	3603,09n s
Genótipos x Ambiente	29	26,11**	0,72*	2,49ns	0,06*	0,37n s	80,44ns	88,58ns
Resíduo	116	3,19	0,42	1,59	0,04	0,37	85,80	69,92
Média geral		3,06	3,38	18,78	3,31	3,44	30,95	47,24
CV (%)		58,30	19,22	6,72	5,85	17,58	29,93	17,70
H ² (%)		93,31	70,87	55,17	76,52	91,57	64,69	80,84
CVg (%)		88,90	12,24	3,04	4,31	23,65	16,54	14,84
CVg/CVe		1,52	0,64	0,45	0,74	1,35	0,55	0,84

**, *significância a 1% e 5%, respectivamente pelo teste F; ns: não significativo; FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; CV, CVg e CVe: coeficiente de variação geral (%), genético (%) e experimental (%); H²: herdabilidade; BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima das folhas, RL - Comprimento da raiz (cm), RD - Diâmetro da raiz (cm), LW - peso fresco da folha (kg), MYH - Rendimento estimado de raízes comercializáveis (t ha⁻¹), TYH - Produtividade total estimada (t ha⁻¹).

Fonte: autoral.

O coeficiente de variação (CV) oscilou entre 5.85% e 58.30% para diâmetro de raiz e porcentagem de florescimento, respectivamente. Os caracteres agrônômicos porcentagem de florescimento, peso da folha fresca e estimativa de produtividade total apresentaram alta herdabilidade (93.31, 91.57 e 80.84%, respectivamente), em concordância com valores do quociente CVg/CVe próximos ou maiores de 1. Semelhante ao presente estudo, Carvalho *et al.*

(2019) encontraram herdabilidade alta para os caracteres massa de raízes comerciais (82,18%) e massa das raízes totais (81,85%).

Houve interação significativa entre genótipos e ambientes (GxA) para porcentagem de florescimento, severidade da queima-de-folhas e diâmetro de raiz. Carvalho *et al.* (2016), em estudo com cenoura no Distrito Federal – Brasil, observaram interação GxA para todos os caracteres avaliados: número e massa total de raízes, número e massa de raízes comerciais, e severidade da queima-das-folhas. Turner *et al.* (2018), em estudo com cenoura nos Estados Unidos, encontraram interação GxA para altura de planta e peso das folhas.

No presente estudo, pelo fato da maioria dos caracteres demonstrarem interação genótipo x ambiente não significativa, optou-se por seguir com análise dialélica individual por ambiente. A análise dialélica avalia a capacidade combinatória dos genitores e permite identificar aqueles mais aptos para transmitir os caracteres desejáveis à descendência, bem como auxilia na escolha dos cruzamentos mais promissores para exploração de híbridos (Carvalho *et al.*, 2016).

A capacidade geral de combinação (CGC) é estimada com base no desempenho médio de um genitor quando cruzado com outros e está associada à presença de efeitos aditivos dos alelos e às associações epistáticas do tipo aditiva. Por outro lado, a capacidade específica de combinação (CEC) refere-se a uma combinação particular entre dois genitores cujo desempenho está acima ou abaixo do esperado com base no desempenho médio de ambos e está associada aos efeitos de dominância e epistasia envolvendo dominância (Griffing, 1956; Cruz; Vencovsky, 1989). O predomínio da ação gênica aditiva para determinado caractere favorece o melhoramento genético por meio de seleção.

As análises de variâncias dialélica (**Tabela 2**) revelaram que no ambiente 1 há variabilidade genética entre as entradas de cenoura e efeito significativo de CGC, indicando efeitos aditivos para os caracteres porcentagem de florescimento, severidade da queima-de-folhas, diâmetro de raiz e peso da folha fresca. No ambiente 2, o efeito significativo de CGC ocorreu para porcentagem de florescimento, comprimento de raiz, peso da folha fresca e estimativa de produtividade total. Existe efeito significativo de CEC para porcentagem de florescimento e peso da folha fresca no ambiente 1, e apenas para porcentagem de florescimento no ambiente 2.

Tabela 2 - Análise de variância dialélica por ambiente, para entradas de cenoura tropical em dialelo balanceado 5x4, avaliadas em Carandaí-MG no verão 2020/2021 e 2021/2022.

FV	GL	Quadrado médio						
		BP	DIS	RL	RD	LW	MYH	TYH
Ambiente 1								
Genótipo (G)	19	5,40**	0,65*	2,78ns	0,08*	1,81**	158,17ns	89,44ns
CGC	4	11,15**	1,00*	4,10ns	0,13*	6,14**	43,92ns	55,02ns
CEC	5	5,49*	0,81ns	0,91ns	0,01ns	1,11*	265,84ns	184,16ns
Recíproco	10	3,07ns	0,43ns	3,18ns	0,09*	0,42ns	150,03ns	55,86ns
Resíduo	38	1,76	0,33	2,64	0,03	0,43	175,67ns	128,42ns
Ambiente 2								
Genótipo (G)	19	36,15**	0,96ns	1,86*	0,04ns	1,76**	48,08ns	58,09**
CGC	4	107,52**	1,52ns	3,82**	0,03ns	6,62**	60,57ns	100,23**
CEC	5	13,34*	0,39ns	1,75ns	0,03ns	0,57ns	16,09ns	13,79ns
Recíproco	10	19,02**	1,01ns	1,13ns	0,05ns	0,42ns	59,07*	63,38
Resíduo	38	4,05	0,62	0,93	0,03	0,39	27,34	23,40

**, *significância a 1% e 5%, respectivamente pelo teste F; ns: não significativo; CGC - capacidade geral de combinação; CEC - capacidade específica de combinação; BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima das folhas, RL - Comprimento da raiz (cm), RD - Diâmetro da raiz (cm), LW - peso fresco da folha (kg), MYH - Rendimento estimado de raízes comercializáveis (t ha⁻¹), TYH - Produtividade total estimada (t ha⁻¹).

Fonte: autoral.

Verifica-se na literatura outros estudos que avaliaram a capacidade combinatória em genótipos de cenoura. Carvalho *et al.* (2016) encontraram efeitos significativos de CGC e CEC para número e massa total de raízes, número e massa de raízes comerciais, e severidade da queima-das-folhas. Os autores verificaram que não houve predominância de efeitos de CGC ou de CEC nos diferentes anos avaliados, ou seja, ambos os efeitos foram importantes. Enquanto Turner *et al.* (2018) indicaram que os fenótipos observados em seus estudos estavam em grande parte sob controle genético aditivo.

Carvalho *et al.* (2014) avaliaram híbridos obtidos em cruzamentos de linhagens de origem tropical e temperada e verificaram predominância de efeitos não aditivos para a queima-das-folhas e de efeitos aditivos na expressão dos caracteres de produtividade de raízes. De forma similar, Jagosz (2012), estudando linhagens de cenoura da Europa, verificou predominância de efeitos aditivos para produtividade total de raízes, e não aditivos para produtividade de raízes comerciais. Carvalho *et al.* (2016) sugerem que a predominância de ação gênica aditiva ou não aditiva, em híbridos de cenoura, é específica dos grupos heteróticos que são avaliados.

As estimativas de CGC e CEC podem ser estudadas para as variáveis em que apresentaram significância desses efeitos na análise de variância (**Tabela 2**). Em relação aos efeitos de CGC (**Tabela 3**), observa-se no ambiente 1, que a entrada 5 foi superior para porcentagem de florescimento e peso da folha fresca, enquanto a entrada 2 destacou-se para severidade da queima-de-folhas e diâmetro de raiz. Já no ambiente 2, houve novamente destaque da entrada 5 para porcentagem de florescimento e peso da folha fresca, demonstrando a estabilidade dessa entrada para essas características. Enquanto a entrada 4 destacou-se para comprimento de raiz, e a entrada 2 teve melhores efeitos para estimativa de produtividade total.

Tabela 3 - Estimativas dos efeitos da CGC para entradas de cenouras tropicais em dialelo balanceado 5x4, avaliadas em Carandaí-MG no verão 2020/2021 e 2021/2022.

Entrada	BP	DIS	RL	RD	LW	MYH	TYH
Ambiente 1							
1	0,11	0,17	0,29	0,03	0,17	2,05	2,02
2	0,45	-0,33	-0,76	0,12	-0,84	-0,78	-0,22
3	0,38	0,28	0,34	0,02	0,14	0,34	0,99
4	0,46	-0,06	0,31	-0,06	-0,22	-2,13	-0,13
5	-1,38	-0,06	-0,18	-0,10	0,75	0,53	-2,66
Ambiente 2							
1	2,23	0,23	-0,46	0,02	0,13	-1,03	-1,17
2	-1,18	-0,43	-0,23	0,06	-0,89	2,75	3,36
3	-1,49	0,29	-0,23	-0,03	-0,01	0,08	0,74
4	2,98	-0,10	0,69	0,00	-0,04	-2,17	-3,02
5	-2,54	0,01	0,24	-0,05	0,81	0,38	0,09

CGC - capacidade geral de combinação; BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima das folhas, RL - Comprimento da raiz (cm), RD - Diâmetro da raiz (cm), LW - peso fresco da folha (kg), MYH - Rendimento estimado de raízes comercializáveis (t ha⁻¹), TYH - Produtividade total estimada (t ha⁻¹).

Fonte: autoral.

Para os efeitos de CEC (**Tabela 4**), é importante destacar que para a recomendação de um cruzamento, é necessário que pelo menos um dos genitores tenha apresentado elevada CGC (Cruz *et al.*, 2012). Considerando que no ambiente 1 as variáveis significativas para CEC foram porcentagem de florescimento e peso da folha fresca (**Tabela 2**), e as entradas com melhor CGC para essas variáveis foram as entradas 5 e 1 (**Tabela 3**), tem-se que os melhores cruzamentos para porcentagem de florescimento foram 1x2, 2x5 e 3x5, com 0.51, 0.00 e 0.00% de florescimento,

respectivamente. Os cruzamentos 1x2, 1x5, 3x5 e 4x5 foram os melhores para peso da folha fresca, com 3.60, 4.72, 4.37 e 3.86 kg, respectivamente. Os efeitos dos recíprocos não foram significativos para essas duas variáveis (**Tabela 2**).

Tabela 4 - Estimativas dos efeitos da CEC para entradas de cenouras tropicais em dialelo balanceado 5x4, avaliadas em Carandaí-MG no verão 2020/2021 e 2021/2022.

Entrada	BP	DIS	RL	RD	LW	MYH	TYH
Ambiente 1							
F1s							
1 2	-1,11	0,34	0,14	0,04	0,31	1,48	0,83
1 3	0,15	-0,11	0,21	-0,03	-0,04	0,95	3,62
1 4	0,32	-0,28	0,13	0,01	-0,31	1,89	-1,72
1 5	0,64	0,06	-0,47	-0,02	0,05	-4,32	-2,74
2 3	1,17	-0,45	0,03	-0,01	-0,25	-3,83	-6,02
2 4	0,40	0,22	-0,02	0,00	0,44	6,01	6,64
2 5	-0,46	-0,11	-0,15	-0,03	-0,50	-3,65	-1,45
3 4	-0,93	0,28	-0,48	-0,01	-0,15	-6,50	-3,36
3 5	-0,39	0,28	0,25	0,05	0,44	9,38	5,75
4 5	0,21	-0,22	0,37	0,00	0,02	-1,40	-1,57
Recíprocos							
2 1	-0,33	0,0	1,27	0,20	0,40	10,09	4,99
3 1	-0,92	0,17	-0,57	-0,10	-0,21	-8,88	-2,76
4 1	1,47	0,0	-0,33	-0,10	0,28	-1,89	-3,41
5 1	0,20	0,34	1,30	-0,15	0,19	7,26	0,60
3 2	-0,71	0,33	0,67	-0,17	-0,01	-0,49	-4,24
4 2	-0,95	0,67	0,07	-0,10	-0,04	0,54	-0,25
5 2	0,0	0,0	-0,10	-0,13	0,07	1,13	-0,47
4 3	0,33	0,0	0,30	0,04	0,22	-2,20	0,39
5 3	0,0	0,0	0,67	-0,05	-0,52	-1,64	-4,17
5 4	-0,68	0,17	-0,77	-0,08	-0,25	-2,02	-3,59
Ambiente 2							
F1s							
1 2	-0,32	0,08	-0,22	0,02	0,04	0,79	-0,48
1 3	0,01	-0,31	0,55	0,00	-0,29	-0,14	-0,54
1 4	2,05	-0,09	0,13	0,03	-0,04	-1,90	-1,21
1 5	-1,74	0,31	-0,46	-0,05	0,29	1,25	2,23
2 3	0,31	0,19	-0,01	0,00	0,38	-1,48	0,08
2 4	-0,80	-0,08	-0,39	-0,10	-0,04	0,73	0,73
2 5	0,82	-0,20	0,62	0,07	-0,37	-0,03	-0,32

3 4	-1,24	0,20	-0,06	0,04	-0,05	2,01	1,43
3 5	0,93	-0,08	-0,48	-0,04	-0,04	-0,38	-0,96
4 5	-0,01	-0,03	0,33	0,03	0,13	-0,84	-0,95
Recíprocos							
2 1	-2,86	-0,17	-0,17	-0,07	-0,11	1,13	-0,28
3 1	-1,95	-0,17	-0,34	-0,05	-0,04	-0,77	-0,45
4 1	2,51	0,67	0,50	0,02	0,24	-2,10	-2,30
5 1	-0,24	0,50	0,20	0,08	0,17	-1,75	-1,30
3 2	-1,20	-0,67	0,53	0,00	0,65	6,50	6,74
4 2	-3,03	0,00	0,94	0,13	0,02	1,69	1,63
5 2	0,46	0,33	-0,17	0,15	0,15	2,26	1,87
4 3	1,57	-0,33	0,47	-0,15	-0,37	-3,49	-4,47
5 3	-0,24	0,17	-0,13	-0,09	-0,02	-4,64	-3,17
5 4	-0,33	-0,50	-0,20	-0,09	-0,16	-2,30	-4,11

CEC - capacidade específica de combinação; BP - Porcentagem de florescimento (%), DIS - Nota para severidade da queima das folhas, RL - Comprimento da raiz (cm), RD - Diâmetro da raiz (cm), LW - peso fresco da folha (kg), MYH - Rendimento estimado de raízes comercializáveis ($t\ ha^{-1}$), TYH - Produtividade total estimada ($t\ ha^{-1}$).

Fonte: autoral.

Analisando o ambiente 2, apenas a variável porcentagem de florescimento tem efeitos significativos para CEC, apresentando efeito dos recíprocos significativos (**Tabela 2**). Como no ambiente 1, a entrada 5 apresentou o melhor efeito de CGC, destacando também a entrada 3 (**Tabela 3**). Com isso, verifica-se que os melhores cruzamentos para a porcentagem de florescimento no verão 2021/2022 foram os híbridos 1x5, 3x2, 3x4, 4x5, 5x3 e 5x4, com 1.62, 2.73, 5.71, 4.00, 1.03, 4.66% de florescimento.

Estes resultados das combinações específicas indicam que houve complementaridade gênica nesses cruzamentos, ocasionada por genes aditivos e por genes não aditivos (Carvalho *et al.*, 2016).

3.2 GGE Biplot

Com o conhecimento dos melhores genótipos e os melhores híbridos, faz-se importante também compreender o desempenho e a estabilidade deles nos diferentes ambientes. Ensaios com multilocais podem ajudar a obter essa informação. Porém, a avaliação do genótipo é limitada aos seus efeitos principais, enquanto as interações genótipo x ambiente (GEI) são ignoradas como ruído

ou fator de confusão. As avaliações de genótipos, tanto G quanto GE, devem ser consideradas simultaneamente. O G e GE (GGE) biplot detecta um padrão de interação e integra o efeito de G com GE de um conjunto de dados G×E (Kaur *et al.*, 2022).

Desta forma, procedeu-se a análise de GGE Biplot para as variáveis porcentagem de florescimento e diâmetro de raiz, que apresentaram interação significativa entre genótipos e ambientes (G×A) pela análise de variância (**Tabela 1**).

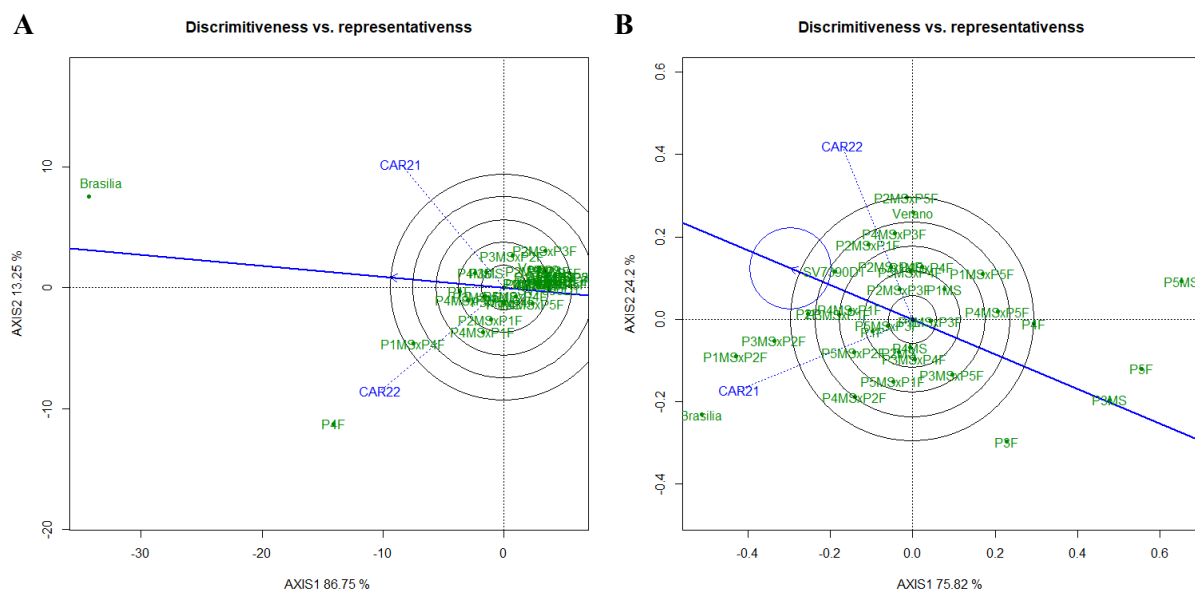
Na metodologia GGE Biplot, os dois primeiros componentes principais (PCA1 e PCA2) são derivados da decomposição de valores singulares dos genótipos (G) + efeitos de interação (G×E). Eles representaram 86.75% e 13.25% da variação total, respectivamente, para porcentagem de florescimento; e 75.82% e 24.20% da variação total, respectivamente, para diâmetro de raiz (**Figuras 4, 5 e 6**). Para as duas características, PCA1 e PCA2 explicam 100% da variação observada no experimento.

A visualização do GGE biplot *Discriminateness vs. representativeness* (**Figura 4**) contribui para determinar a representatividade e a capacidade de discriminação dos ambientes testados. O comprimento do vetor, ou seja, a distância absoluta entre o marcador de um ambiente e a origem da parcela, é uma medida da capacidade de discriminação. À medida que o vetor é mais longo, a discriminação do ambiente aumenta (Frutos *et al.*, 2014). Assim, verifica-se que os dois ambientes testados são discriminantes (informativos), pois se distanciam do eixo principal, e são discriminantes na mesma intensidade, já que os vetores têm o mesmo tamanho.

O ambiente médio (representado pelo pequeno círculo no final da seta) tem as coordenadas médias de todos os ambientes de teste. AEA (average environment axis) é a linha que passa pelo ambiente médio e a origem do biplot. Um ambiente de teste que tem um ângulo menor com o AEA é mais representativo do que outros ambientes de teste (Frutos *et al.*, 2014). Desse modo, os dois ambientes são distintos entre si, pois estão em posições opostas do gráfico, e são igualmente representativos, pois tem o mesmo ângulo com o AEA. Os ambientes não são correlacionados, pois apresentam um ângulo reto entre si.

Singamsetti *et al.* (2021) estudaram a interação genótipo × ambiente e seleção de híbridos de milho em regimes de diferentes umidades. Eles verificaram que a visualização do GGE biplot *Discriminateness vs. representativeness* teve a capacidade gráfica de desvendar a capacidade discriminativa e representatividade presente entre os sete ambientes testados.

Figura 4 - Porcentagem de florescimento (%) (A) e diâmetro da raiz (cm) (B) na visualização discriminativeness vs. representativeness do GGE biplot para entradas de cenoura tropical, avaliadas em Carandaí-MG (Total 100%). CAR21 – verão 2020/2021 e CAR22 – verão 2021/2022.



Fonte: autoral.

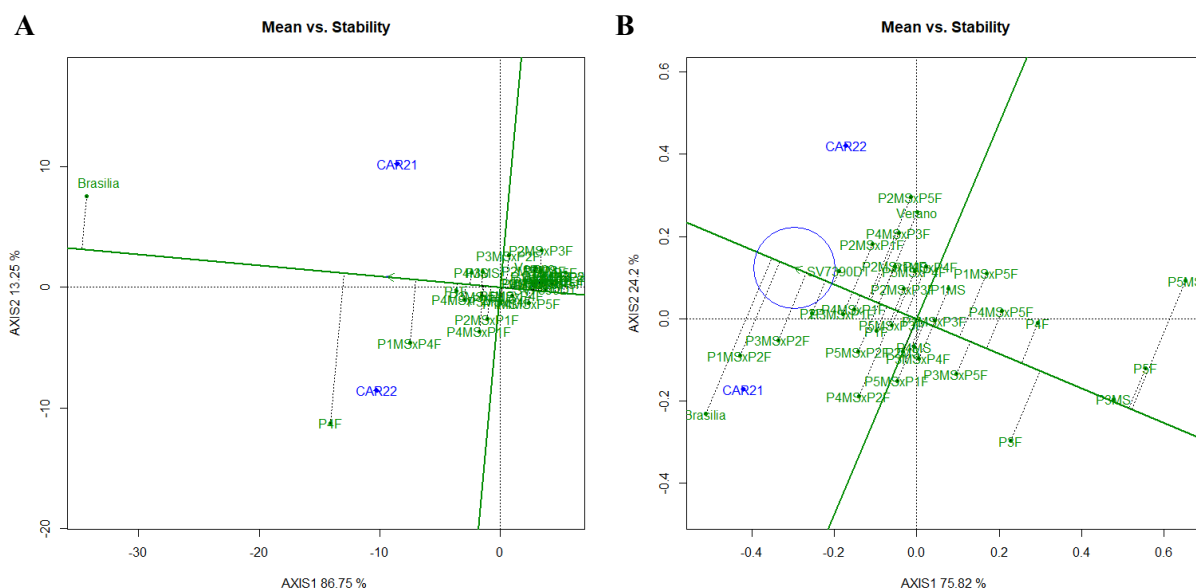
O desempenho e a estabilidade dos genótipos foram verificados graficamente através do GGE biplot na visualização *Mean vs. stability* da **Figura 5**. O primeiro componente principal (PCA1) indica a adaptabilidade dos genótipos e o segundo componente principal (PC2) indica estabilidade, ou seja, os genótipos mais próximos do zero de origem do biplot são os mais estáveis (Kaur *et al.*, 2022).

O gráfico *Mean vs. stability* mostra duas linhas, a sete verde é a average environment axis (AEA) ou average environment coordination (AEC) abscissa. No eixo Y, tem-se a AEC ordinate. AEA é a linha paralela ao PCA1, passando pelo ambiente médio hipotético. A distância da AEA aponta para valores médios mais elevados para a característica medida, ou seja, entradas mais à esquerda do gráfico, possuem as maiores médias através dos ambientes (Frutos *et al.*, 2014).

Verifica-se para a porcentagem de florescimento, que a cultivar Brasília, entrada 4 fértil e híbrido 1x4, apresentaram valores mais elevados, com 28,37, 12,94 e 8,71% de florescimento, respectivamente. Todas as demais entradas tiveram valores menores muito próximos entre si, variando de 0 a 6,27% (**Figura 5a**). Enquanto para diâmetro de raiz, a cultivar Brasília, híbridos 1x2 e 3x2, apresentaram médias superiores, com 3,6, 3,58 e 3,53 cm, respectivamente. As entradas

3 fértil e estéril e 5 fértil e estéril apresentaram médias inferiores, com 3,10, 2,97, 2,93 e 2,93, respectivamente (**Figura 5b**). Isso está de acordo com os as estimativas do efeito de CGC (**Tabela 3**), que mostraram que a entrada 2 destacou-se em suas combinações híbridas para o diâmetro de raiz.

Figura 5 - Porcentagem de florescimento (%) (**A**) e diâmetro da raiz (cm) (**B**) na visualização mean vs. stability do GGE biplot para entradas de cenoura tropical, avaliadas em Carandaí-MG (Total 100%). CAR21 – verão 2020/2021 e CAR22 – verão 2021/2022.



Fonte: autoral.

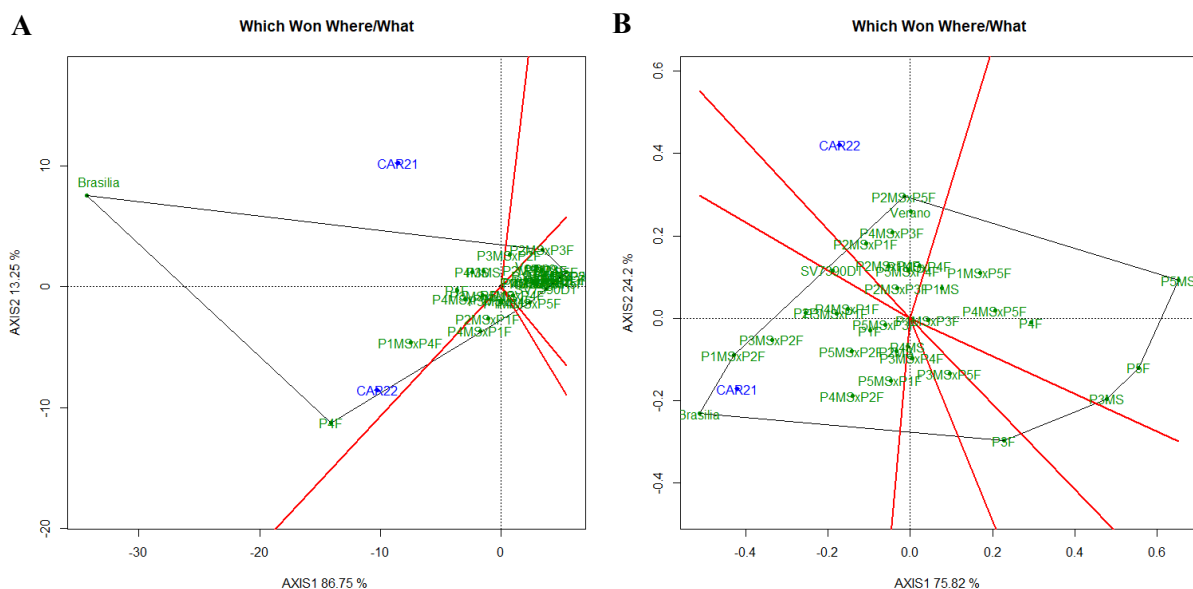
A segunda linha paralela a PCA2 é ordenada AEC, também chamada de linha de estabilidade. Esta linha passa pela origem e é perpendicular à AEA. Portanto, quanto menor a projeção ou distância da AEA, mais estável ou menor a variação no desempenho dos genótipos entre os ambientes testados (Frutos *et al.*, 2014).

Para porcentagem de florescimento, a maioria das entradas apresentaram alta estabilidade entre os ambientes, pois estão muito próximas da AEA, exceto a cultivar Brasília, entrada 4 e híbrido 1x4 (**Figura 5a**). Para diâmetro de raiz, apesar da cultivar Brasília apresentar a maior média, ela demonstra baixa estabilidade entre os ambientes, pois o vetor que liga a AEA é longo. Os híbridos 1x2 e 3x2 são mais estáveis, e a entrada 3 na versão macho estéril é altamente estável, mas

tem baixa média de diâmetro de raiz. Yan e Tinker (2006) relataram que alta estabilidade é desejada apenas quando apresenta um desempenho médio alto.

O gráfico *Which-won-where* da **Figure 6** ilustra os melhores genótipos, chamados de vencedores, e os apresenta na forma de um polígono. A visualização do polígono biplot ilustra quais foram os genótipos com melhor desempenho em um ou mais ambientes. Vários setores são desenvolvidos pelas linhas perpendiculares aos lados do polígono e passam pelo centro do biplot. Estas linhas são referidas como linhas de igualdade (Yan, 2001). Os genótipos nos vértices do polígono são os melhores ou os piores em um ou mais ambientes. O genótipo no vértice do polígono apresenta melhor desempenho no ambiente enquadrado nos setores (Yan; Tinker, 2006). Os setores desenvolvidos pela linha de igualdade facilitam a comparação visual dos genótipos entre os ambientes testados.

Figura 6 - Porcentagem de florescimento (%) **(A)** e diâmetro da raiz (cm) **(B)** na visualização do polígono which – won – where pattern do GGE biplot para entradas de cenoura tropical e ambientes em Carandaí-MG (Total 100%). CAR21 – verão 2020/2021 e CAR22 – verão 2021/2022.



Fonte: autoral.

Para a característica porcentagem de florescimento (**Figura 6a**), houve a formação de um setor onde encontram-se os dois ambientes. A cultivar Brasília e a entrada 4 fértil são os vértices desse setor, com os maiores valores, de 28,37 e 12,94% de florescimento, respectivamente. Porém,

para essa variável, busca-se genótipos com os menores valores ou que não floresça, assim, essas duas entradas foram as piores nos dois ambientes. As demais entradas se agruparam próximo da origem entre os dois ambientes, com valores entre 0 e 8,71% de florescimento, e apresentam melhor estabilidade.

Para diâmetro de raiz (**Figura 6b**), o ambiente CAR21 encontra-se em um setor em que a cultivar Brasília é o vértice, significando que ela tem o melhor desempenho nesse ambiente, com diâmetro médio de raízes de 3,6 cm. O ambiente CAR22 está em outro setor onde o híbrido 2x5 é o vértice e genótipo vencedor, com 3,42 cm de diâmetro médio de raiz.

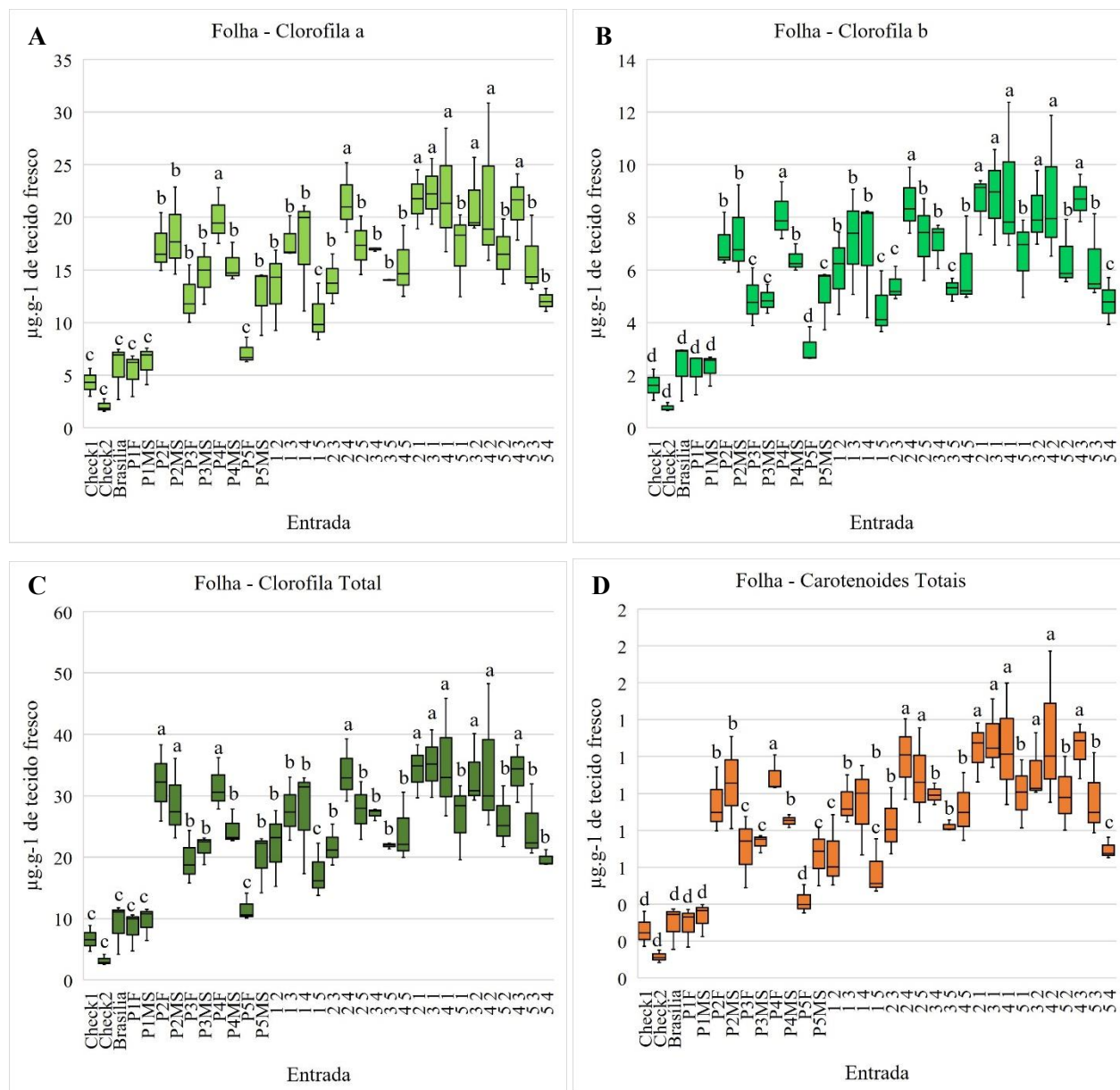
Kaur *et al.* (2022) utilizaram os gráficos de GGE biplot *Mean vs. stability* e *Which-won-where* para encontrar áreas adequadas em Punjab na Índia, para a produção de sementes de cultivares de cenoura europeias. Através do GGE biplot foi possível verificar que as cultivares europeias de cenoura podem produzir sementes nas zonas submontanas do Punjab. Silva *et al.* (2011), em estudo para verificação da adaptabilidade e estabilidade de populações de cenoura no Brasil pelos métodos AMMI, GGE biplot e REML/BLUP, afirmam que a representação gráfica GGE biplot proporcionou melhor agrupamento dos ambientes em relação à produtividade de raízes.

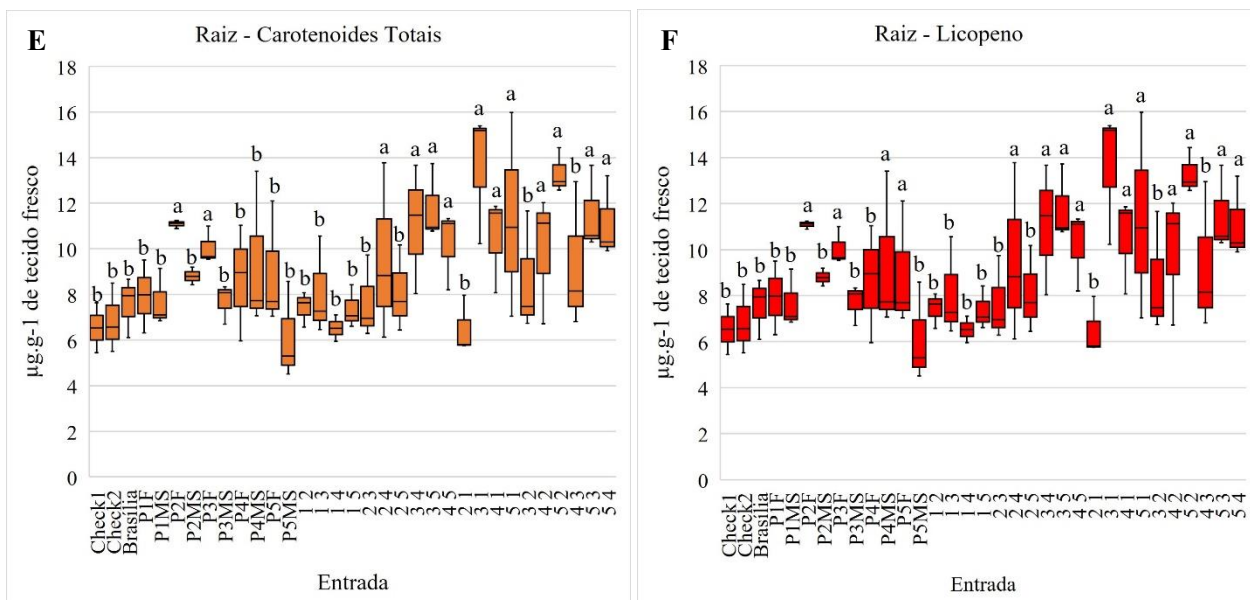
3.3 Análise bioquímicas

A qualidade nutricional e sensorial é um atributo essencial de frutas e hortaliças com interesse crescente de consumidores, produtores e programas de melhoramento. Consumida mundialmente, a cenoura é reconhecida como um vegetal saudável devido ao seu conteúdo substancial em carboidratos, fibras e abundância em vários metabólitos especializados, com destaque ao acúmulo de carotenoides (Chevalier *et al.*, 2021).

A estimativa da extensão da variabilidade fenotípica para uma grande variedade de metabólitos é determinante nas perspectivas de melhoramento da cenoura. Assim, verificou-se o conteúdo foliar de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides totais; e o conteúdo nas raízes, de carotenoides totais e licopeno (**Figura 7**).

Figura 7 - Conteúdo de pigmentos em folhas e raízes de entradas de cenoura tropical avaliadas em Carandaí-MG ($\mu\text{g.g}^{-1}$ de tecido fresco). **(A)** Conteúdo de clorofila a na folha. **(B)** Conteúdo de clorofila b na folha. **(C)** Conteúdo de clorofila total na folha. **(D)** Conteúdo de carotenoides totais na folha. **(E)** Conteúdo de carotenoides totais na raiz. **(F)** Conteúdo de licopeno na raiz.





Fonte: autoral.

O teor de clorofila desempenha um papel importante no processo de fotossíntese, pois capturam a luz solar para produzir glicose (Yadav *et al.*, 2022). Portanto, desempenham um papel importante no desenvolvimento da planta e da raiz da cenoura. Os carotenoides das folhas também são importantes pigmentos fotossintéticos que desempenham a função de proteger o sistema fotossintético, evitando a foto-oxidação das clorofilas ao controlar a absorção da energia radiante. Os carotenoides são substâncias antioxidantes nas plantas e protegem a planta dos danos causados pelo estresse (Terletskaia *et al.*, 2021). Os carotenoides, por outro lado, apresentam uma série de benefícios à saúde, atuando como antioxidantes ou agentes na prevenção do câncer ou na preservação da visão. Tanto o α - quanto o β -caroteno funcionam como pró-vitamina A e produzem uma ou duas moléculas de retinol (vitamina A) no corpo humano. O licopeno tem sido relatado como antioxidante e auxilia na prevenção do câncer (Yoo *et al.*, 2020).

Os teores de clorofila a na folha de cenoura variaram de 1,59 a 30,89 $\mu\text{g.g}^{-1}$ e houve a formação de três grupos. Os níveis de clorofila b foram de 0,66 a 12,37 $\mu\text{g.g}^{-1}$ e tiveram a formação de quatro grupos. Para esses dois metabólitos, os melhores resultados foram verificados para as entradas 4 fértil e os híbridos 2x4, 2x1, 3x1, 4x1, 3x2, 4x2 e 4x3. As concentrações de clorofila total oscilaram de 2,54 a 48,26 $\mu\text{g.g}^{-1}$ e tiveram a formação de três grupos. As mesmas entradas destacaram-se com os maiores teores de clorofila a e b, juntamente com as entradas 2 fértil e macho estéril.

Yadav *et al.* (2022) estudaram a resposta de adubos orgânicos e fertilizantes na produtividade e qualidade da cenoura em solo arenoso e encontraram conteúdo de clorofila na folha de cenoura variando de 40 a 2690 $\mu\text{g.g}^{-1}$. Os autores encontraram que a aplicação de adubos e fertilizantes pode trazer o aumento do teor de nitrogênio e da área foliar, que está diretamente correlacionado com o aumento do teor total de clorofila.

Os teores de carotenoides totais na folha foram de 0,08 a 1,77 $\mu\text{g.g}^{-1}$ com a formação de quatro grupos. Observa-se destaque nos resultados das entradas 4 fértil, híbridos 2x4, 2x1, 3x1, 4x1, 3x2, 4x2 e 4x3, que em maioria são as mesmas entradas que se destacaram para clorofila a, b e total. Yoo et al. (2020) caracterizaram o conteúdo de terpenóides, caroteno, antocianina e sólidos solúveis em cenouras laranja, amarela, preta e roxa no Texas, e verificaram que os tecidos foliares apresentaram geralmente altos níveis de conteúdo de carotenoides totais, com variação de 73,7 a 164,8 $\mu\text{g.g}^{-1}$.

Os checks comerciais, a cultivar Brasília e a entrada 1 nas versões fértil e macho estéril apresentaram as menores médias para todos os pigmentos extraídos da folha: clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides totais.

A concentração de licopeno na raiz variou de 4,23 a 14,16 $\mu\text{g.g}^{-1}$ e houve a formação de dois grupos. Os melhores valores encontrados foram das entradas 2 fértil, 3 fértil, 4 macho estéril, 5 fértil e os híbridos 2x4, 3x4, 3x5, 4x5, 3x1, 4x1, 5x1, 4x2, 5x2, 5x3 e 5x4. Os níveis de beta-caroteno variaram de 4,50 a 15,97, e apresentou a formação de dois grupos, sendo o melhor grupo formado pelas entradas 2 fértil, 3 fértil e os híbridos 2x4, 3x4, 3x5, 4x5, 3x1, 4x1, 5x1, 4x2, 5x2, 5x3 e 5x4 (mesmas entradas que se destacaram no conteúdo de licopeno, exceto pela entrada 4 macho estéril e 5 fértil).

É possível verificar que os melhores genitores segundo GCA, as entradas 5, 4, 2, também forneceram híbridos com alto teor de pigmentos. Os híbridos 3x5 e 5x3 que se destacaram pela SGA apresentaram elevados teores de beta-caroteno e licopenos na raiz.

O estudo de metabólitos em cenoura é fundamental devido sua importância nutricional. Verificam outros trabalhos na literatura, como de Selvakumar et al. (2019), em estudo de características nutricionais em cenoura tropical na Índia. Os autores encontraram teores de carotenoides totais e licopeno variando de 11,9 a 218,8 $\mu\text{g.g}^{-1}$ e 2,1 a 141,8 $\mu\text{g.g}^{-1}$, respectivamente, para cenouras amarela, roxa, vermelha e laranja. Chevalier *et al.* (2021), ao realizarem uma avaliação multissítio da plasticidade fenotípica para metabólitos especializados, alguns envolvidos

na qualidade da cenoura e na resistência a doenças, identificaram que o acúmulo de tipos de carotenoides em cenoura tem influência moderada a alta do ambiente de acordo com a variedade. No presente estudo, não se verificou uma relação clara entre o conteúdo de carotenoides nas folhas e raízes, o que corrobora com os resultados encontrados por Yoo *et al.* (2020). No entanto, análises adicionais são necessárias para determinar os perfis e o conteúdo de carotenoides em cenoura.

4 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram efeitos significativos na capacidade geral de combinação (CGC) para várias características agronômicas em cenouras tropicais, sugerindo efeitos genéticos aditivos. Isto favorece o melhoramento genético através da seleção. Com base na GCA, os cultivares 5, 4 e 2 foram identificados como os genitores mais promissores para diferentes características.

A análise da capacidade específica de combinação (SCA) revelou que os híbridos 1x2 e 3x5 se destacaram em porcentagem de pendoamento e massa fresca de folhas no ambiente 1, enquanto os híbridos 1x5 e 5x3 tiveram bom desempenho em porcentagem de pendoamento no ambiente 2. Os híbridos 3x5 e 5x3 apresentaram altos níveis de beta-caroteno e licopenos na raiz.

A análise biplot do GGE mostrou que os híbridos 1x2 e 3x2 apresentaram maiores diâmetros radiculares médios, pertenceram ao grupo com melhores percentagens de pendoamento e exibiram estabilidade entre os ambientes.

Esses dados indicam que os genótipos de cenoura tropical podem ser selecionados como genitores para obtenção de híbridos para cultivo no verão, com qualidade em suas características. Destaca-se boa estabilidade, baixa porcentagem de florescimento, maior volume foliar, maior diâmetro de raiz e alto conteúdo de clorofila, carotenoides e licopeno. Isso possibilita o desenvolvimento do mercado de sementes de cenoura tropical, mais possibilidades para o agricultor, e melhora da oferta para o consumidor final, com aumento de metabólitos nutricionais.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, A. D. F.; SILVA, G. O.; PEREIRA, R. B.; PINHEIRO, J. B.; VIEIRA, J. V. Capacidade combinatória em cenoura para componentes de produção e tolerância à queima-das-folhas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 2, p. 190-193, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000200012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/QT5fmJYW995G8RDXszR8hbM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 ago. 2024.
- CARVALHO, A. D. F. D.; SILVA, G. O. D.; PEREIRA, R. B. Capacidade de combinação de genitores de cenoura para caracteres de produtividade de raízes e tolerância à queima-das-folhas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 2, p. 183-190, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663020009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/5NZ7gDzsYL7x846kfBFWBWH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 ago. 2024.
- CARVALHO, A. D. F.; SILVA, G. O. da; PEREIRA, G. E. Direct selection for phenotypic traits in carrot genotypes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 354-358, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620190316>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/D4xPrGVPXycJbCS3jHSRKWL/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 08 ago. 2024.
- CARVALHO, A. D. F.; PEREIRA, G. E.; SILVA, G. O. Estimates of genetic gains in the carrot using different selection indices. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470agro.v16i0.7154>. Disponível em: <https://revista.ufrb.br/agroambiente/article/view/7154>. Acesso em: 08 ago. 2024.
- CASSETARI, L. S.; GOMES, M. S.; SANTOS, D. C.; SANTIAGO, W. D.; ANDRADE, J.; GUIMARÃES, A. C.; SOUZA, J. A.; CARDOSO, M. G.; MALUF, W. R.; GOMES, L. A. β -Carotene and chlorophyll levels in cultivars and breeding lines of lettuce. In: VIII International Symposium on In Vitro Culture and Horticultural Breeding, n. 1083, 2015, Coimbra, Portugal. **Acta Horticulturae**, Coimbra, 2015, p. 469-473. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1083.60>. Disponível em: https://www.actahort.org/books/1083/1083_60.htm. Acesso em: 11 nov. 2024.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. **Métodos biométricos aplicados ao melhoramento genético**, 4. ed. Viçosa: UFV, 2012.
- CRUZ, C. D.; VENCOSKY, R. Comparação de alguns métodos de análise dialélica. **Revista Brasileira de Genética**, [s.l.] v. 12, n. 2, p. 425-38, 1989.
- CRUZ, C. D. Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>. Disponível em:

<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/21251/pdf>. Acesso em: 08 ago. 2024.

DATTA, D. R.; RAFII, M. Y.; MISRAN, A.; JUSOH, M.; YUSUFF, O.; HAQUE, M. A.; JATTO, M. I. Half diallel analysis for biochemical and morphological traits in cultivated eggplants (*Solanum melongena* L.). **Agronomy**, [s.l.], v. 11, n. 9, p. 1769, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091769>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/9/1769>. Acesso em: 12 nov. 2024.

EL-AZEEM, A.; ALY, R. S. H.; EL SAYED, W. M.; HASSAN, N. A. Combining ability and gene action using 10 x 10 diallel crosses of ten maize inbred lines (*Zea mays* L.). **Journal of Plant Production**, [s.l.], v. 12, n. 11, p. 1205-1211, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21608/JPP.2021.105615.1073>. Disponível em: https://jpp.journals.ekb.eg/article_207297.html. Acesso em: 12 nov. 2024.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations statistics database. Rome, Italy, 2023. Portal. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FRANCIS, F. J. Analysis of anthocyanins. In: MARKAKIS, P. (ed.). **Anthocyanins as food colors**, 2 ed. Nova York, NY: Academic Press, 1982, Capítulo 7, p. 181-207. ISBN 978-0-12-472550-8. E-book. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-472550-8.50011-1>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124725508500111>. Acesso em: 12 nov. 2024.

FRUTOS, E.; GALINDO, M. P.; LEIVA, V. An interactive biplot implementation in R for modeling genotype-by-environment interaction. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s.l.], v. 28, p. 1629-1641, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-013-0821-z>. Acesso em: 12 nov. 2024.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Science**, Austrália, v. 9, n. 4, p. 463-493, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1071/BI9560463>. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Concept-of-general-and-specific-combining-ability-Griffing/a3e1cfc3aa5aece580bbdb059f07d0005d50f84e>. Acesso em: 12 nov. 2024.

JAGOSZ, B. Combining ability of carrot (*Daucus carota* L.) lines and heritability of yield and its quality components. **Folia Horticulturae**, Polônia, v. 24, n. 2, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10245-012-0014-0>. Disponível em: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/v10245-012-0014-0>. Acesso em: 12 nov. 2024.

KAUR, K.; DHILLON, T. S.; SINGH, R. GGE biplot analysis for seed production potential of European carrot (*Daucus carota* L.) genotypes in plains and submountainous zones of Punjab. **Genetika**, Sérvia, v. 54, n. 1, p. 233-254, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2298/GENSR2201233K>. Disponível em: <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0534-00122201233K>. Acesso em: 12 nov. 2024.

KUMAR, R.; SHARMA, H. R.; KUMAR, M. Heterosis for post harvest and nutritional quality traits in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Journal of Applied and Natural Science**, [s.l.], v. 8, n. 4, p. 1987-1991, 2016. DOI: <https://doi.org/10.31018/jans.v8i4.1075>. Disponível em: <https://journals.ansfoundation.org/index.php/jans/article/view/1075>. Acesso em: 12 nov. 2024.

PATIL, D. G.; SUBRAMANIAM, V. R. Combining Ability Analysis for Yield and Processing Qualities in White Onion (*Allium cepa* L.). **Current Agriculture Research Journal**, [s.l.], v. 8, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12944/CARJ.8.1.04>. Disponível em: <https://www.agriculturejournal.org/volume8number1/combining-ability-analysis-for-yield-and-processing-qualities-in-white-onion-allium-cepa-l/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

PEREIRA, R. B.; DE CARVALHO, A. D. F.; PINHEIRO, J. B.; SILVA, G. O. da; VIEIRA, J. V. Resistência de populações de cenoura à queima-das-folhas com diferentes níveis de germoplasma tropical. **Horticultura brasileira**, Brasília, v. 30, p. 489-493, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000300022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/7ZZPyvfYFFJg7k5CKtrJxk/?lang=pt>. Acesso em: 12 nov. 2024.

R Development Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Versão 4.1.2, [s.l.], 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 23 maio 2023.

SELVAKUMAR, R., KALIA, P., RAJE, R. S. Genetic analysis of nutritional traits in tropical carrot (*Daucus carota* L.). **Genetika**, Sérvia, v. 51, n. 2, p. 641-660, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2298/GENSR1902641S>. Disponível em: <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0534-00121902641S>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SILVA, G. O. D.; CARVALHO, A. D. F. D.; VIEIRA, J. V.; BENIN, G. Verificação da adaptabilidade e estabilidade de populações de cenoura pelos métodos AMMI, GGE biplot e REML/BLUP. **Bragantia**, [s.l.], v. 70, p. 494-501, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011005000003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/spMbb3wbsPpGcnKt9g6hXBL/?lang=pt>. Acesso em: 12 nov. 2024.

TERLETSKAYA, N.V.; KORBOZOVA, N.K.; KUDRINA, N.O.; KOBYLINA, T.N.; KURMANBAYEVA, M.S.; MEDUNTSEVA, N.D.; TOLSTIKOVA, T.G. The influence of abiotic stress factors on the morphophysiological and phytochemical aspects of the acclimation of the plant *Rhodiola semenowii* Boriss. **Plants**, [s.l.], v.10, p.1196, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10061196>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/6/1196>. Acesso em: 12 nov. 2024.

TURNER, S. D.; MAURIZIO, P. L.; VALDAR, W.; YANDELL, B. S.; SIMON, P. W. Dissecting the genetic architecture of shoot growth in carrbbbbbbgot (*Daucus carota* L.) using a diallel mating design. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 411-426, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1534/g3.117.300235>. Disponível em: <https://academic.oup.com/g3journal/article/8/2/411/6029812>. Acesso em: 12 nov. 2024.

YADAV, A.; JAKHAR, R. K.; KUMARI, N.; YADAV, G. N.; KANT, R.; SHARMA, S. L.; KUMAR, A. Response of organic manures and fertilizers on yield and quality of carrot under sandy soil condition. **The Pharma Innovation Journal**, India, v.11, n.4, p.1822-27, 2022. Disponível em: <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2022&vol=11&issue=4&ArticleId=12216>. Acesso em: 12 nov. 2024.

YAN, W. GGE biplot—a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. **Agronomy journal**, Estados Unidos, v. 93, n. 5, p. 1111-1118, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351111x>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2001.9351111x>. Acesso em: 12 nov. 2024.

YAN, W.; TINKER, N. A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. **Canadian journal of plant science**, Canadá, v. 86, n. 3, p. 623-645, 2006. <https://doi.org/10.4141/P05-169>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/P05-169>. Acesso em: 12 nov. 2024.

YAN, W.; KANG, M. S.; MA, B.; WOODS, S.; CORNELIUS, P. L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop science**, Estados Unidos, v. 47, n. 2, p. 643-653, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2135/cropsci2006.06.0374>. Acesso em: 12 nov. 2024.

YOO, K. S.; BANG, H.; PIKE, L.; PATIL, B. S.; LEE, E. J. Comparing carotene, anthocyanins, and terpenoid concentrations in selected carrot lines of different colors. **Horticulture, Environment and Biotechnology**, [s.l.], v. 61, p. 385-393, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00225-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13580-019-00225-6>. Acesso em: 12 nov. 2024.