

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CAMPUS MONTE CARMELO

IURY PATTRYCK SOARES ROCHA

CARACTERIZAÇÃO DE HÍBRIDOS SIMPLES E DESENVOLVIMENTO DE
HÍBRIDOS DUPLOS DE ALFACES BIOFORTIFICADAS

Monte Carmelo
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
IURY PATTRYCK SOARES ROCHA

CARACTERIZAÇÃO DE HÍBRIDOS SIMPLES E DESENVOLVIMENTO DE
HÍBRIDOS DUPLOS DE ALFACES BIOFORTIFICADAS

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como requisito necessário para a obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli

Monte Carmelo
2025

IURY PATTRYCK SOARES ROCHA

CARACTERIZAÇÃO DE HÍBRIDOS SIMPLES E DESENVOLVIMENTO DE
HÍBRIDOS DUPLOS DE ALFACES BIOFORTIFICADAS

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso
de Agronomia da Universidade Federal de
Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como
requisito necessário para a obtenção do grau
de Engenheiro Agrônomo.

Monte Carmelo, 11 de setembro de 2025

Banca Examinadora

Profa. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli
Orientadora

Me. Ana Luisa Alves Ribeiro
Membro da Banca

Me. Heitor Franco de Souza
Membro da Banca

Monte Carmelo
2025

Dedico este trabalho a Deus e à Nossa Senhora, fonte de minha força e inspiração, cujo amor e proteção tem sido meu alicerce inabalável. Aos meus pais e minha irmã, que sempre me apoiaram e me incentivaram, e aos meus avós, que sempre trabalharam com a agricultura familiar e puderam construir suas vidas com este trabalho digno, fazendo com que fosse minha inspiração para chegar até aqui.

*"É justo que muito custe o que muito vale." Santa
Teresa D'Ávila.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, toda a honra e toda a glória a Deus, por ser amor e a força que sustentou meus braços quando as forças já não existiam. À Nossa Senhora, pelo título de Nossa Senhora do Carmo, meu eterno refúgio e consolo, pelo colo acolhedor nos instantes de desespero e pela intercessão constante em cada desafio.

Aos pilares da minha vida, Leonardo Soares e Patricia Rocha, não há palavras no mundo que possam expressar o amor e a gratidão que sinto, por serem minha inspiração de luta e persistência pelos objetivos. Obrigado pelo sacrifício silencioso de cada dia, pelo apoio incondicional que nunca me faltou, pelas orações feitas em segredo e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei de mim. Tudo o que sou é porque vocês foram fundamentais na minha educação. Esta vitória é tão minha quanto é de vocês.

À minha irmã, Maria Cecília, obrigado por todos os sorrisos, pelas saudades e choros escondidos. Você é um presente de Deus em minha vida.

Aos meus avós, Sr Vicente Rocha e Djanira, Sr Geraldo Tertiliano e Leir, com seu carinho tranquilo e conselhos sábios, que são as raízes fortes que permitiram que nossa família crescesse. Obrigado pelas histórias, pelas bênçãos e pelo amor que construiu o alicerce de quem eu sou.

À minha orientadora, Profa. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli, pela sua paciência, dedicação e sabedoria foram faróis essenciais para minha trajetória acadêmica. Muito obrigado por acreditar e sempre confiar em mim, gratidão pelos conselhos e puxões de orelha.

Aos meus primos, Danúbia Lopes e Paulo Ricardo (*in memoriam*), meu eterno agradecimento. A Danúbia, por toda a companhia, apoio incondicional e pelas mensagens de confiança a mim transmitidas ao longo desta jornada, eu sempre vou te amar. Ao Paulo, pelo legado de força e inspiração que deixou. Esta conquista é também de vocês.

Aos meus amigos, verdadeiros irmãos do coração: Jeferson Oliveira, pela parceria de sempre, desde o início da faculdade; Emilly Danielly, Lorena Rosa, Amanda Vasconcelos, Nathália oliveira, Lavinia Fernandes, Caroline Morotti, Myrlla, Kamilla e Lara Pagliarani. Obrigado por cada risada que afastou o estresse, por cada incentivo dito

com convicção, pelos bons momentos juntos. Vocês foram a família que eu escolhi, e carregarei cada um de vocês comigo para sempre.

Aos Professores Doutores, em especial, Andressa Costa, Adriane de Andrade, Gleice Aparecida, Odair José, Gabriel Mascarenhas que, com seu conhecimento e paixão, não apenas me ensinaram disciplinas, mas me inspiraram a pensar, questionar e buscar a excelência. Por ouvirem meu choro e pelos conselhos sábios. Muito obrigado por compartilharem um pouco de sua sabedoria e por deixarem um legado em minha formação.

Ao GOU Providência Divina, aos Acólitos e ao EJC. Esta família de fé me ensinou que o verdadeiro serviço é feito com amor e humildade. Obrigado por cada momento de espiritualidade e amizade que fortaleceu minha alma.

À família Dianin, em especial Tia Márcia, por ter me acolhido em Monte Carmelo. Obrigado por abrirem as portas de suas vidas e de seu lar, oferecendo não apenas um lugar, mas um porto seguro de paz.

Aos avaliadores desta banca, meus sinceros agradecimentos por dedicarem seu tempo e conhecimento à avaliação deste trabalho.

Por fim, um agradecimento especial a todos os servidores e funcionários da UFU, cujo trabalho, muitas vezes invisível, mantém esta instituição funcionando, ao Grupo de Estudos em Melhoramento Genético de Hortaliças (GEN-HORT) e ao Sr. Zé da Horta. Obrigado por cada sorriso, cada auxílio e por fazerem deste lugar um verdadeiro lar.

A cada um que, de alguma forma, cruzou meu caminho durante esta jornada, meu muito obrigado. Que Deus abençoe abundantemente a todos.

Chegar ao fim desta jornada é mais do que concluir uma etapa acadêmica; é fechar um ciclo de transformação, fé e descobertas que levarei para sempre gravado em meu coração. Se estas palavras pudessem carregar uma fração da gratidão que sinto, ainda assim seriam insuficientes. Por isso, deixo aqui meu singelo, porém sincero, obrigado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO.....	11
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	11
Cultura da Alface	11
Bioativos	12
Biofortificação	13
Melhoramento Genético	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
5.1. ANÁLISES dos pigmentos	17
5.2. ANÁLISES das Variáveis Agronômicas.....	23
5.3. Análise Multivariada de variáveis agronômicas e pigmentos.....	28
6. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS.....	36

RESUMO

A biofortificação representa uma estratégia promissora para aumentar os níveis de micronutrientes essenciais nas culturas alimentares, elevando a qualidade nutricional dos alimentos consumidos. A alface, uma hortaliça amplamente cultivada e consumida em todo o mundo, apresenta potencial para programas de biofortificação devido à sua alta demanda e acessibilidade. Além de ser rica em nutrientes, como vitaminas, minerais e fibras, a alface contém compostos bioativos como carotenoides, clorofilas e antocianinas, que possuem propriedades antioxidantes e podem prevenir doenças crônicas, como câncer e doenças cardiovasculares, além de fortalecer o sistema imunológico. A biofortificação da alface pode ser realizada por meio de técnicas de melhoramento genético, visando aumentar os níveis de compostos benéficos. Este trabalho teve como objetivo caracterizar híbridos simples e desenvolver híbridos duplos de alfaces biofortificadas. Os híbridos simples foram avaliados quanto a parâmetros agronômicos e teores de carotenoides, clorofilas e antocianinas, e foram utilizados como parentais nos cruzamentos para gerar os híbridos duplos. A dissimilaridade genética foi representada pelo dendrograma obtido pelo método de agrupamento UPGMA, confirmando que houve dissimilaridade genética promissora entre os genótipos, considerando o genótipo UFU 1 como uma elite multifuncional. Genótipos promissores se destacaram para diferentes finalidades: UFU 1, UFU 10, UFU 12, UFU 6 e UFU 8. As melhores combinações de cruzamentos sugeridas para obtenção dos híbridos duplos foram UFU 1 X UFU 9 e UFU 4 X UFU 2. Os resultados obtidos forneceram uma base genética diversificada e de qualidade para o desenvolvimento de duplos híbridos que, após sucessivas autofecundações, poderão gerar cultivares comerciais com alto valor agronômico e nutricional.

Palavras-Chave: *Lactuca sativa* L., Melhoramento genético, Segurança alimentar e nutricional.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial, que ultrapassou oito bilhões em 2022 e tem previsão de alcançar cerca de nove bilhões até 2050, tem influenciado significativamente o aumento da demanda por alimentos (MUTTARAK; WILDE, 2022). Visto que a agricultura representa a principal fonte de nutrientes para os seres humanos, fatores naturais e provocados por atividade humanas têm contribuído para a redução de nutrientes nos alimentos (SUSTAINABLE SOLUTION NETWORK, 2015). Esse cenário torna a suplementação nutricional um desafio essencial para a segurança alimentar global, uma vez que metade da população global enfrenta deficiências de micronutrientes, um problema crítico em países em desenvolvimento (DE ALMEIDA et al., 2020). Uma das estratégias discutidas nas últimas décadas para enfrentar esse desafio é a biofortificação, que busca elevar os níveis de micronutrientes nas partes comestíveis das culturas (KATHI et al., 2024).

Em 2020, a produção global de alface (*Lactuca sativa* L.) alcançou aproximadamente 27,66 milhões de toneladas, cobrindo uma área de cultivo de 1,22 milhão de hectares (FAOSTAT, 2022). A alface apresenta grande diversidade em formas, tamanhos e cores, refletindo a complexidade genética e morfológica dentro de seus grupos de cultivares (LEBEDA et al., 2007; MOU, 2008). Com base em características morfológicas, a alface é classificada nos grupos crespa, romana, manteiga, de folha ou corte e de caule (MOU, 2008). Além disso, suas folhas podem apresentar diferentes colorações, como verde, vermelho, semi-vermelho e roxo (KIM et al., 2016).

Nesse contexto, a alface é considerada uma cultura promissora para programas de melhoramento genético convencional visando a biofortificação, tendo em vista sua ampla popularidade e fácil aquisição. Esta hortaliça, pertencente à família Asteraceae, é amplamente reconhecida por seu valor nutricional (DE SOUZA, 2008).

O consumo de alface contribui para a saúde humana devido ao seu alto conteúdo de vitaminas, minerais e carotenoides (MARTINEZ, 2016). Além disso, o valor nutricional da alface pode ser ampliado com o incremento de compostos bioativos como carotenoides, clorofilas e antocianina. A biofortificação, realizada por meio de técnicas biotecnológicas

ou programas de melhoramento genético, constitui uma estratégia promissora para incrementar benefícios nutricionais na cultura da alface.

Apesar da crescente importância dos alimentos biofortificados, ainda são escassos estudos voltados para o desenvolvimento de cultivares de alface ricas em compostos bioativos.

2. OBJETIVO

Objetivou-se com este trabalho a caracterização de híbridos simples e o desenvolvimento de híbridos duplos de alface buscando incremento para biofortificação.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Cultura da Alface

A alface, pertencente a família Asteraceae, é amplamente cultivada no mundo, destacando-se por seus valores nutricionais. Em 2020, sua produção global foi de aproximadamente 27,66 milhões de toneladas, cultivada em 1,22 milhões de hectares (FAOSTAT, 2022). A cultura apresenta grande diversidade morfológica e genética, com variedades classificadas de acordo com características como tipo de folhas e cor das folhas, incluindo verde, vermelho, semi-vermelho e roxo (LEBEDA et al., 2007; MOU, 2008; KIM et al., 2016).

O consumo de alface, especialmente em misturas para salada, tem crescido nos últimos anos, tornando-se uma contribuição importante para a dieta humana (KENNY; O'BEIRNE, 2009). Apesar disso, a composição nutricional das variedades de alface

consumidas regularmente ainda precisa ser mais bem compreendida. Os estudos concentraram-se principalmente em aspectos genéticos e morfológicos (REYES-CHIN-WO et al., 2017; WEI et al., 2021), enquanto as características metabólicas, considerando a ampla gama de variedades e colorações, têm recebido menor atenção.

O aumento do consumo de alface como folhosa crua está associado às suas qualidades organolépticas e ao fato de ser uma excelente fonte de vitaminas, minerais e antioxidantes (KIM et al., 2016). Além disso, sua capacidade de adaptação a diferentes temperaturas permite o cultivo e a comercialização ao longo de todo o ano (PADASH et al., 2016).

Bioativos

As propriedades saudáveis da alface são atribuídas, em grande parte, ao seu alto conteúdo de compostos antioxidantes, como as vitaminas C e E, carotenoides, polifenóis, além de fibras dietéticas (SERAFINI et al., 2002; NICOLLE et al., 2004; LLORACH et al., 2008). Em adição, também contribuem para as propriedades sensoriais (LI et al., 2010), sendo as antocianinas particularmente abundantes nas variedades vermelhas (LLORACH et al., 2008). A hortaliça também contém minerais importantes, como cálcio e ferro, que complementam seu perfil nutricional (ROMANI et al., 2002).

No entanto, o valor nutricional da alface pode variar consideravelmente entre as diferentes variedades. De acordo com Mou e Ryder (2004), a variação nutricional é particularmente observada em variedades com folhas mais fechadas na estrutura da cabeça, já que grande parte da porção comestível não é exposta à luz, o que reduz a acumulação de certos nutrientes (RYDER, 1997).

Biofortificação

O termo "biofortificação" foi introduzido para descrever uma estratégia de melhoramento de plantas que busca aumentar o teor de micronutrientes em culturas alimentares básicas, com o objetivo de reduzir o impacto das deficiências de micronutrientes em países de baixa e média renda (BOUIS et al., 2024).

Apesar da crescente importância dos alimentos biofortificados, ainda são escassos estudos voltados para o desenvolvimento de cultivares de alface ricas em compostos bioativos, pelo fato de que a extração dos compostos das folhas de alface envolve altos custos e uma grande demanda de recursos laboratoriais, o que representa um obstáculo para programas de melhoramento genético que visam a obtenção de genótipos biofortificados (CLEMENTE et al., 2023).

Alguns estudos têm mostrado avanços significativos em relação ao aumento dos teores de bioativos em alfaces por meio de técnicas de melhoramento genético mendeliano, uma abordagem tradicional que tem se mostrado promissora para enriquecer as plantas com esses compostos essenciais para a saúde humana (MACIEL et al., 2020). No entanto, ainda existem possibilidades de alcançar incrementos ainda maiores na concentração de carotenoides e outros compostos bioativos, por meio de abordagens mais refinadas e o uso de tecnologias emergentes, como a biotecnologia e a engenharia genética, que podem complementar os métodos de melhoramento tradicional (OLIVEIRA et al., 2021). O avanço dessas técnicas pode trazer novas perspectivas para o desenvolvimento de cultivares de alface com maior valor nutricional, ajudando na mitigação de deficiências de micronutrientes na população mundial.

Melhoramento Genético

O melhoramento genético vegetal representa uma ferramenta fundamental para o avanço da agricultura, visando o desenvolvimento de genótipos com características

superiores como maior produtividade, resistência a estresses bióticos e abióticos, e melhor qualidade nutricional. Este processo baseia-se na exploração da variabilidade genética existente em bancos de germoplasma, permitindo a seleção e o cruzamento de genótipos superiores para a obtenção de novas variedades (LOPES et al., 2012).

A variabilidade genética é a matéria-prima indispensável para qualquer programa de melhoramento. A seleção e cruzamento parental constitui a etapa fundamental, onde genótipos com características complementares são cruzados para recombinar genes favoráveis. Como observado por Clemente et al. (2023) e Maciel et al. (2020), a escolha adequada dos parentais é crucial para obter populações segregantes com variabilidade genética para características de interesse, tanto nutricionais como agrônômicas. Sem diversidade, não há diferenças a serem selecionadas. A caracterização precisa, seja morfológica ou de pigmentos, é uma etapa crucial para orientar as estratégias de seleção e cruzamentos.

As gerações segregantes resultantes dos cruzamentos são avaliadas, e por meio de métodos de seleção recorrente, os indivíduos que combinam a alta nutrição com as boas características agrônômicas são selecionados para compor novas gerações. Esta etapa, conforme descrita por Lopes et al. (2012), permite a fixação de alelos desejáveis através de sucessivas gerações de seleção.

O melhoramento para biofortificação de alface representa, portanto, uma fronteira importante e viável, alinhando a produção agrícola às demandas por alimentos não apenas em quantidade, mas principalmente em qualidade nutricional, seguindo o caminho de sucesso traçado por programas de melhoramento de instituições como a Embrapa (LOPES et al., 2012). A continuação é essencial para oferecer ao consumidor opções mais nutritivas e contribuir para a segurança alimentar e nutricional, visando não apenas aumentar a concentração de nutrientes específicos, mas também garantir que essas melhorias sejam estáveis e acompanhadas de um bom desempenho no campo, oferecendo ao consumidor um produto mais nutritivo sem comprometer outras qualidades.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental de Hortaliças da UFU, campus Monte Carmelo e foi dividido em duas etapas:

A primeira etapa foi realizada a partir da semeadura de doze híbridos simples de alfaces biofortificadas para carotenoides, clorofila e antocianina do Programa de Melhoramento Genético de Alface Biofortificada da UFU (Tabela 1).

Tabela 1: Híbridos de alfaces biofortificadas.

Genótipos	Parentais	Características
UFU 1	UFU BIOFORT155E12 X UFU-199#1#1#1	variegata crespa
UFU 2	UFU BIOFORT155E12 X UFU MC BIOFORT1	verde crespa
UFU 3	UFU189#1#2#1 X UFU BIOFORT189E48	verde lisa
UFU 4	UFU BIOFORT197E34 X UFU189#1#2#1	verde crespa
UFU 5	UFU BIOFORT197E34 X UFU BIOFORT189E43	verde lisa
UFU 6	UFU BIOFORT197E34 X UFU MC MINIBIOFORT 2	variegata lisa
UFU 7	UFU-199#2#1#1 X UFU MC MINIBIOFORT 2	roxa crespa
UFU 8	UFU BIOFORT189E48 X UFU MC MINIBIOFORT 2	variegata lisa
UFU 9	UFU-199#1#1#1 X UFU75#1#3#1	variegata crespa
UFU 10	UFU-199#1#1#1 X UFU MC MINIBIOFORT 2	roxa crespa
UFU 11	UFU MC BIOFORT1 X UFU-199#2#1#1	variegata crespa
UFU 12	UFU MC MINIBIOFORT 2 X UFU-199#2#1#1	roxa lisa

A semeadura foi realizada em bandejas preenchidas com substrato. Trinta dias após a semeadura foi realizado o transplântio para o campo. Cada parcela do experimento foi composta por dezesseis plantas, arranjadas em quatro linhas com espaçamento de 0,25m x 0,25m, sendo avaliadas as quatro plantas centrais. O delineamento experimental realizado foi em blocos casualizados com três repetições.

Aos 40 dias após o transplântio foram avaliados os seguintes parâmetros agronômicos: massa verde, diâmetro da planta e caule, comprimento de caule, número de folhas e índice SPAD. Para a avaliação dos parâmetros nutricionais foram quantificados antocianina (AT), clorofila A (CA), clorofila B (CB), clorofila total (TC), betacaroteno

(CN) e luteína (LUT) de três folhas de cada uma das plantas em espectrofotômetro. A partir das absorbâncias foram calculados os teores de AT (FRANCIS, 1982); de CA, CB e CT (WITHAM et al., 1971) e de CN e LUT (LICHTENTHALER; WELLBURN, 1983).

Foram realizadas análises multivariadas de dissimilaridade genética entre os genótipos baseadas na distância generalizada de Mahalanobis, que foi representado por dendrograma obtido pelo método hierárquico *unweightedp Pair-Group Method Using Arithmetic Averages* (UPGMA). A linha de corte utilizada para formação dos grupos foi definida no ponto que representou o maior incremento na distância entre os grupos garantindo assim, que fossem internamente homogêneos e externamente heterogêneos (CRUZ e CARNEIRO, 2006). O coeficiente de correlação cofenética foi calculado para testar a eficiência do agrupamento. A importância relativa das variáveis foi analisada pelo método de Singh (1981). Todos os dados foram analisados no software R (R CORE TEAM, 2024), seguindo as premissas de análises biométricas para o melhoramento genético implementadas neste software (CRUZ, 2016).

Na segunda etapa, os híbridos simples foram mantidos em campo, pois se destacaram para parâmetros agronômicos e nutricionais na etapa anterior. Foram selecionados para os cruzamentos aqueles com características mais distintas e seguindo a variação de características como textura das folhas e cor. Ao atingir o estágio fenológico de pleno florescimento foram iniciadas as hibridações. A definição da direção dos cruzamentos foi realizada entre dois híbridos simples ricos em pelo menos um dos compostos (clorofila, carotenoides e antocianina) e com destaque para parâmetros agronômicos. Os cruzamentos foram realizados entre híbridos que compartilhavam fenótipos equivalentes, especificamente: plantas verdes com verdes, roxas com roxas, variegatas com variegatas, de folhas lisas com folhas lisas e de folhas crespas com folhas crespas, para dar continuidade ao programa de melhoramento e avançar na obtenção de linhagens com fenótipos desejados.

Os botões florais das plantas de cada genitor feminino foram emasculados pela manhã a partir da técnica de despolinização e hibridação (NAGAI, 1980). Posteriormente, as sementes produzidas pelos cruzamentos entre os híbridos simples foram colhidas, beneficiadas e armazenadas a 18°C. Elas representam a geração F₁ dos duplos híbridos,

sendo de fundamental importância para a continuidade do Programa de Melhoramento e alface da UFU.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISES DOS PIGMENTOS

Ao analisar o dendrograma, foi possível observar os níveis de dissimilaridade perceptíveis entre os híbridos para os pigmentos (Figura 1).

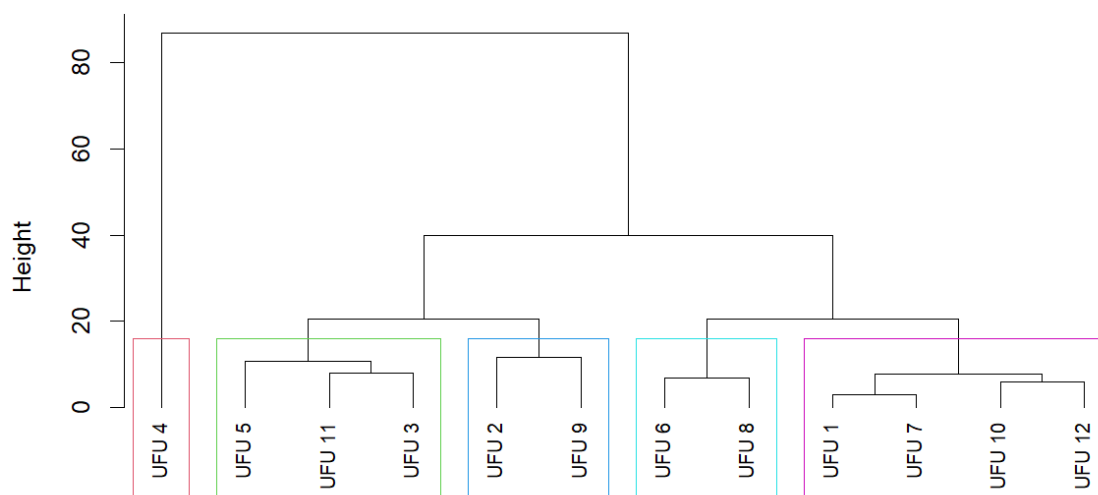


Figura 1: Dendrograma da dissimilaridade genética para pigmentos entre os 12 híbridos de alface biofortificada, obtido pelo Método Hierárquico de ligação média (UPGMA) como medida de dissimilaridade.

De acordo com o dendrograma obtido pelo método hierárquico UPGMA (Figura 1), os genótipos foram reunidos em cinco grupos distintos. A formação de cinco grupos distintos é biologicamente consistente, refletindo padrões claros de acumulação de pigmentos entre os genótipos. Esses agrupamentos refletem a similaridade nos perfis de pigmentos foliares, que incluem teores de clorofila, beta-caroteno, luteína e antocianina, os

quais são desempenham papéis essenciais na eficiência fotossintética e a resposta ao estresse em plantas (TAIZ et al., 2017). O Grupo I foi formado exclusivamente pelo genótipo UFU 4. O Grupo II foi composto pelos genótipos UFU 5, UFU 11 e UFU 3. O Grupo III incluiu os genótipos UFU 2 e UFU 9. O Grupo IV foi constituído pelos genótipos UFU 6 e UFU 8. Por fim, o Grupo V agrupou os genótipos UFU 1, UFU 7, UFU 10 e UFU 12.

O isolamento do genótipo UFU 4 em um grupo singular evidenciou sua elevada divergência em relação aos demais, o que pode ser atribuído aos seus valores significativamente inferiores para todos os pigmentos avaliados (REGO et al., 2003).

O segundo grupo reuniu os genótipos UFU 5, UFU 11 e UFU 3, que apresentaram valores intermediários de clorofila e níveis moderados de carotenoides e antocianinas. O genótipo UFU 11 apresentou o menor teor de clorofila, enquanto o UFU 5 se destacou com teores elevados de beta-caroteno e luteína. Apesar das variações, a proximidade entre os genótipos sugere um perfil pigmentar semelhante para antocianina.

O terceiro grupo foi composto pelos genótipos UFU 2 e UFU 9, que apresentaram teores de clorofila, beta-caroteno e luteína similares. O genótipo UFU 2 apresentou teores de antocianina superior ao do genótipo UFU 9. Contudo, manteve proximidade suficiente para a formação de um grupo coeso, demonstrando uma base genética similar para a síntese de pigmentos (SANTOS et al., 2020).

O quarto grupo incluiu UFU 6 e UFU 8, que apresentaram teores de clorofila próximos e níveis elevados de beta-caroteno e luteína. Os valores de antocianina são semelhantes entre os genótipos, evidenciando forte similaridade.

O quinto grupo foi formado pelos genótipos UFU 1, UFU 7, UFU 10 e UFU 12, que apresentaram maiores teores de clorofila e se destacam pelos elevados níveis de beta-caroteno, luteína e antocianina. Esse grupo representou os genótipos com maior concentração geral de pigmentos, o que pode estar associado a uma maior capacidade fotossintética ou resposta a estresses ambientais (TAIZ et al., 2017).

A análise do dendrograma, com coeficiente de correlação cofenética (CCC) de 0,923, indicou uma boa representação da matriz de dissimilaridade. Genótipos com perfis pigmentares semelhantes tendem a se agrupar, enquanto aqueles com valores extremos,

como o genótipo UFU 4, com teores muito baixos, ou o genótipo UFU 10, com teores muito altos, ficam isolados ou em grupos distintos.

Segundo Tserkis et al. (2025), o coeficiente de correlação de Pearson pode ser utilizado como uma medida universal para quantificar correlações totais em sistemas quânticos, capturando tanto dependências clássicas quanto quânticas. De forma análoga, o coeficiente de correlação cofenética quantifica a correlação entre a matriz de dissimilaridade original e a matriz de distâncias representada pelo dendrograma. Um CCC de 0,92, como obtido na análise, indica uma correlação muito forte (TSERKIS et al., 2025), sugerindo que a representação hierárquica do dendrograma preserva fielmente as relações de dissimilaridade originais entre os genótipos.

O trabalho de Tserkis et al. (2025) enfatizou que valores de correlação próximos a 1 indicam uma forte relação linear e uma representação precisa da estrutura subjacente. Portanto, um CCC de 0,92 valida a robustez do agrupamento e confirma que a estrutura de dissimilaridade entre os perfis de pigmentos dos genótipos foi capturada com alta fidelidade pelo método UPGMA, refletindo adequadamente a variabilidade genética existente.

Com base na análise do mapa de calor para teores de pigmentos foliares (Figura 2), observou-se um nítido gradiente de acumulação de compostos entre os genótipos, padrão este que corrobora com a estrutura de agrupamento revelada pelo dendrograma. A ordenação dos genótipos no eixo vertical do mapa segue quase que integralmente a lógica hierárquica estabelecida, validando a consistência das duas abordagens de análise multivariada (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). No mapa de calor, os genótipos com valores altos (tons de laranja) indicam concentrações acima da média, enquanto escores mais baixos (tons de azul) indicam concentrações abaixo da média.

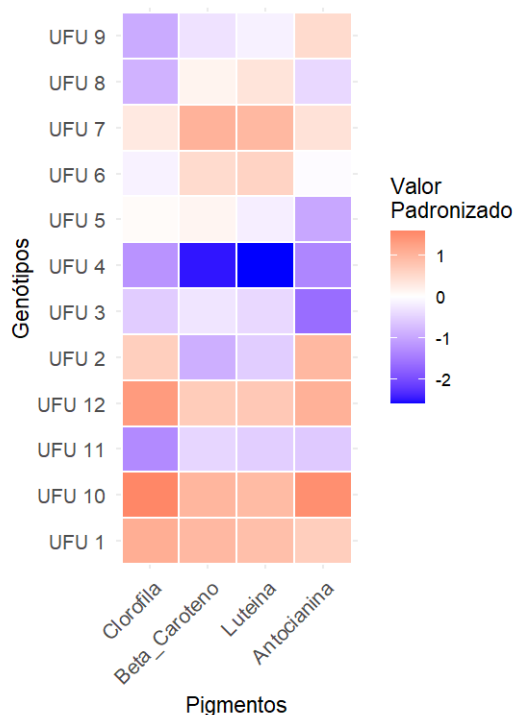


Figura 2: Mapa de calor para pigmentos dos 12 híbridos. Cores mais laranjas indicam que o genótipo apresentou maior resposta para a variável analisada e cores de tons mais azulados menores respostas.

O genótipo UFU 4, isolado no primeiro grupo do dendrograma, aparece no mapa de calor com escores consistentemente baixos em todas as variáveis de pigmentos - clorofila, beta-caroteno, luteína e antocianina. Isto confirma seu perfil único com baixa acumulação de pigmentos, justificando sua separação dos demais (REGO et al., 2003).

Os genótipos pertencentes ao segundo grupo do dendrograma (UFU 5, UFU 11 e UFU 3) apareceram no mapa de calor com padrão similar: escores predominantemente azuis (abaixo da média) para clorofila, intermediários para carotenoides e antocianina. O genótipo UFU 3 destaca-se com escores ligeiramente positivos para beta-caroteno, enquanto o genótipo UFU 5 e UFU 11 mantêm valores em torno da média ou negativos, corroborando sua formação em um grupo de perfil moderado.

No mapa de calor, o terceiro grupo (UFU 2 e UFU 9) apresenta um padrão contrastante no acúmulo de pigmentos, enquanto o genótipo UFU 2 apresenta escores moderados em clorofila, mas elevados em antocianina, o UFU 9 tem escores mais baixos

em clorofila, mas intermediários nos demais pigmentos. Esta combinação de características explica sua proximidade no dendrograma.

O quarto grupo (UFU 6 e UFU 8), que demonstrou forte similaridade no mapa de calor, apresentaram escores acima da média em beta-caroteno e luteína e escores próximos à média em clorofila e antocianina. Esta concordância de padrão justifica o agrupamento. O quinto grupo (UFU 1, UFU 7, UFU 10 e UFU 12) destacou-se claramente no mapa de calor com escores predominantemente acima da média em todas as variáveis relacionadas a pigmentos, especialmente em clorofila e carotenoides. Os genótipos UFU 10 e UFU 12 apresentaram os escores mais fortes em antocianina, enquanto UFU 1 e UFU 7 têm valores superiores para beta-caroteno e luteína. Esta uniformidade explica sua fusão em um único grupo.

O mapa de calor revela que a maior variabilidade entre genótipos foi para teores de antocianina, enquanto os carotenoides (beta-caroteno e luteína) tendem a ter padrões de expressão com maior estabilidade.

A concordância entre as duas análises valida a consistência dos agrupamentos e confirma que as diferenças nos perfis de pigmentos são o principal fator responsável pela estruturação dos grupos. A análise integrada do dendrograma e do mapa de calor demonstraram que a ordenação hierárquica segue um gradiente de aumento na concentração de pigmentos, desde o UFU 4 (menos pigmentos) até o UFU 12 (mais pigmentos).

Com base na matriz de correlação (Figura 3), a clorofila apresentou correlações positivas moderadas a fortes com todos os outros pigmentos: 0,64 com beta-caroteno, 0,64 com luteína e 0,76 com antocianina. Isto indica que genótipos com maiores teores de clorofila tendem a apresentar maiores concentrações dos demais pigmentos. Esta é uma relação fisiológica esperada, já que clorofila e carotenoides atuam em conjunto no aparato fotossintético (TAIZ et al., 2017).

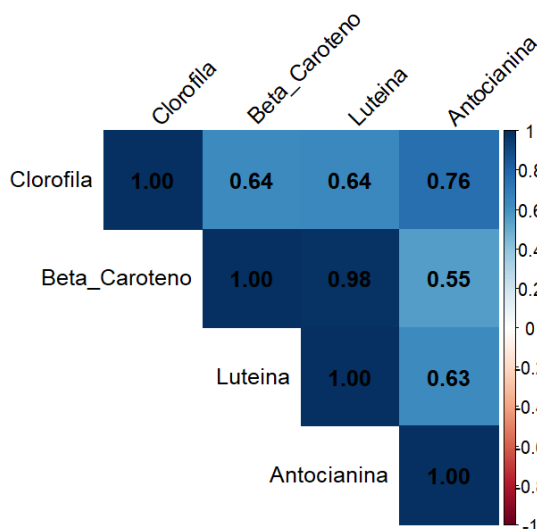


Figura 3: Matriz de correlação para pigmentos dos 12 híbridos. Cores mais escuras indicam maior correlação entre as variáveis analisada e cores mais claras menores correlação.

A maior correlação observada na matriz foi entre beta-caroteno e luteína (0,98), o que era esperado uma vez que ambos são carotenoides e compartilham vias biossintéticas comuns. O resultado da correlação justifica também os resultados apresentados no mapa de calor para esses compostos.

O beta-caroteno apresentou uma correlação moderada com a antocianina (0,55), assim como a correlação entre luteína e antocianina (0,63). Isto sugere que, embora sejam classes diferentes de pigmentos (carotenoides *versus* flavonoides), existe uma tendência de co-acúmulo em muitos genótipos, possivelmente em resposta a mesmos fatores ambientais ou regulatórios (SANTOS et al., 2020).

A antocianina, por sua vez, apresentou a correlação mais forte justamente com a clorofila (0,76), indicando que genótipos com maior capacidade fotossintética (mais clorofila) também tendem a produzir mais antocianina.

Estas correlações explicam a estrutura de agrupamento observada no dendrograma. Os genótipos do grupo 5 (UFU 1, UFU 7, UFU 10 e UFU 12), que apresentaram os maiores valores de clorofila, também tiveram os maiores teores de carotenoides e antocianinas, refletindo as fortes correlações positivas entre essas variáveis. Por outro lado, o genótipo

UFU 4, com seus valores excepcionalmente baixos em todos os pigmentos, ficou isolado precisamente por não seguir este padrão geral.

A matriz de correlação revelou, portanto, que as variáveis de pigmentos se correlacionaram de forma positiva entre elas, com destaque para a forte associação entre os carotenoides (beta-caroteno e luteína) e a conexão entre clorofila e antocianina. Este comportamento sugere uma regulação coordenada da biossíntese destes compostos, possivelmente mediada por fatores ambientais comuns e mecanismos regulatórios integrados (CASSETARI et al., 2015).

5.2. ANÁLISES DAS VARIÁVEIS AGRONÔMICAS

A análise de agrupamento (Figura 4), fundamentada pela distância generalizada de Mahalanobis, resultou em um dendrograma com coeficiente cofenético de 0,809. Este valor, considerado alto, indica boa representatividade e fidelidade da estrutura de agrupamento em relação à matriz de dissimilaridade original (ARAÚJO et al., 2016).

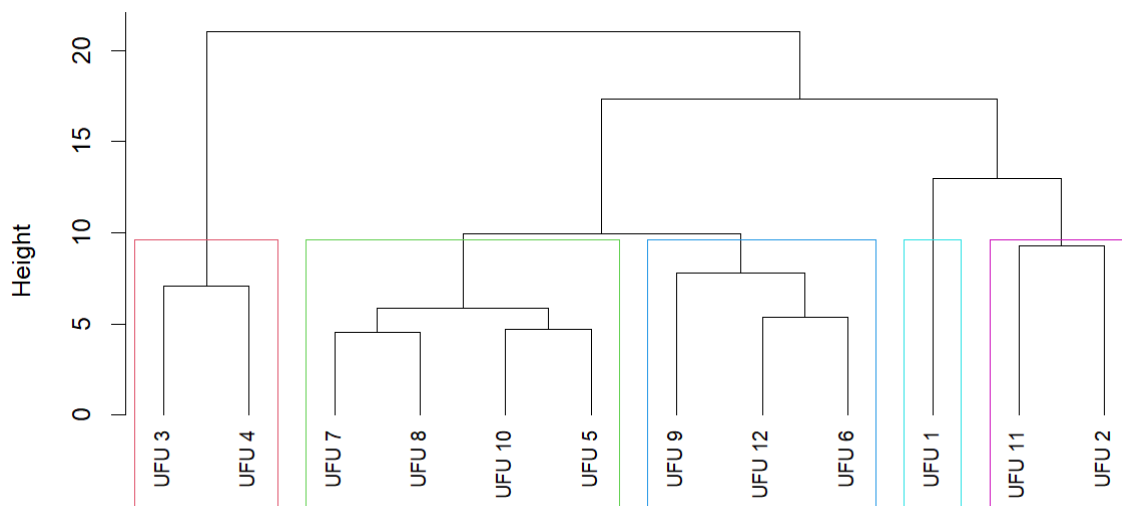


Figura 4: Dendrograma da dissimilaridade genética para as variáveis agronômicas entre os 12 híbridos de alface biofortificada, obtido pelo Método Hierárquico de ligação média (UPGMA) como medida de dissimilaridade.

Com base na análise do dendrograma gerado a partir das variáveis agronômicas (Figura 4), foram identificados cinco grupos distintos de genótipos. Estes grupos revelaram padrões de similaridade morfoagronômica, permitindo inferir relações funcionais e possíveis aptidões comuns. Observou-se que o primeiro grupo foi composto pelos genótipos UFU 3 e UFU 4. O segundo grupo pelos genótipos UFU 7, UFU 8, UFU 10 e UFU 5. O terceiro grupo foi formado pelos genótipos UFU 9, UFU 12 e UFU 6. O quarto grupo formado apenas pelo genótipo UFU 1. E por fim, o quinto grupo foi formado pelos genótipos UFU 11 e UFU 2.

O primeiro grupo, composto pelos genótipos UFU 3 e UFU 4, apresentou características associadas a menor vigor vegetativo em comparação aos demais. Com base nos dados agronômicos, observou-se que os genótipos pertencentes a esse grupo apresentaram valores intermediários de peso fresco e peso de folhas, mas se destacaram por apresentarem valores superiores de números de folhas com destaque para o genótipo UFU 3.

O segundo grupo, formado por UFU 7, UFU 8, UFU 10 e UFU 5 demonstrara uma coesão baseada em um desempenho agronômico intermediário a alto. Estes genótipos apresentaram valores superiores de diâmetro de planta e SPAD, que refletem o teor de clorofilas nas folhas. O genótipo UFU 10, apresentou valores de SPAD superiores a 30, sugerindo maior eficiência na captura de luz. O genótipo UFU 5 evidenciou menor vigor dentro do grupo, com valores de peso e comprimento de caule inferiores. No entanto, foi agrupado com os demais devido à sua similaridade nos parâmetros de SPAD, um caráter de grande importância para a seleção de genótipos (AZEVEDO et al., 2013).

O terceiro grupo, constituído por UFU 9, UFU 12 e UFU 6, foi caracterizado por um desempenho sólido e equilibrado. Estes genótipos não são os extremos em nenhuma variável específica, mas apresentam valores consistentemente superiores na maioria dos parâmetros mensurados. Os genótipos exibiram números de folhas robustos, diâmetros de planta favoráveis e valores de SPAD elevados, em especial o genótipo UFU 12 e o UFU 6. A proximidade no dendrograma indica que suas arquiteturas de planta e perfis fisiológicos são muito similares.

O quarto grupo, representado pelo genótipo UFU 1, destacou-se como um genótipo singular e divergente. A separação dos demais grupos foi justificada pelo vigor vegetativo, registrando os maiores valores médios de peso total e de folhas e maior comprimento de caule entre todos os genótipos, característica indesejada por indicar um genótipo não tropicalizado. Os maiores valores de número de folhas e diâmetro de caule indicaram que este genótipo possui uma estratégia de crescimento distinta dos demais, característica desejável em programas de melhoramento, exceto o comprimento de caule (SOUZA et al., 2008; SALA; COSTA, 2012).

Por fim, o quinto grupo, formado pelos genótipos UFU 11 e UFU 2, agregou genótipos que se caracterizaram pelo menor desempenho agrônômico e acumulação de biomassa. O genótipo UFU 11 apresentou os menores valores de número de folhas.

A análise do dendrograma revelou que a formação dos grupos foi primordialmente guiada por características morfológicas relacionadas ao vigor e à arquitetura da planta (peso, número de folhas e comprimento de caule), refletindo a divergência genética existente no germoplasma. A interação dentro de cada grupo sugeriu que genótipos com estratégias de crescimento e desenvolvimento similares foram agrupados, enquanto as diferenças entre os grupos foram marcadas principalmente por contrastes de vigor vegetativo e arquitetura de planta.

O mapa de calor das variáveis agrônômicas (Figura 5) revelara um padrão claro de agrupamento e contraste entre os genótipos e as características avaliadas. Observou-se uma forte divisão entre dois grandes grupos de genótipos. De um lado UFU 1, UFU 4, UFU 3 e UFU 11 que formaram um cluster coeso, caracterizado por valores acima da média (tons de vermelho) para a maioria das variáveis morfológicas como peso, peso de folhas, número de folhas, diâmetro de caule e comprimento de caule. Isso indica que estes genótipos se distinguem pelo alto vigor vegetativo e biomassa.

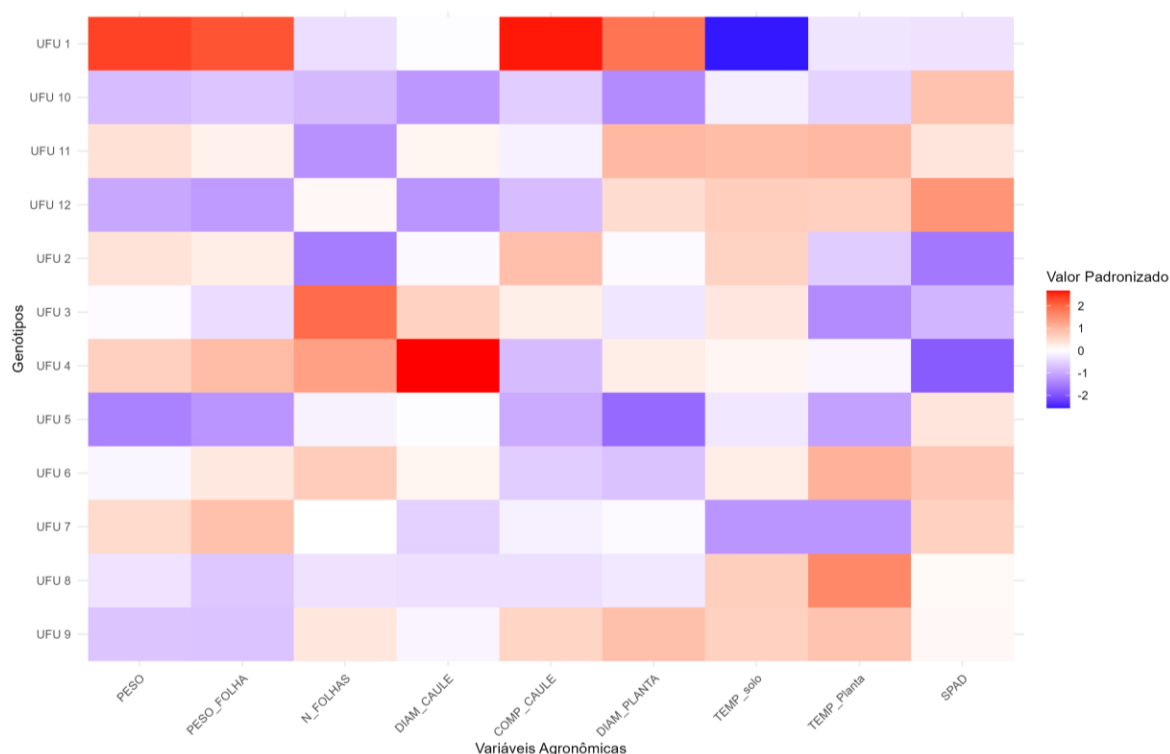


Figura 5: Mapa de calor das variáveis agronômicas para os 12 híbridos. Cores mais vermelhas indicam que o genótipo apresentou maior resposta para a variável analisada e cores de tons mais azulados indicam menores respostas.

Em oposição, os genótipos UFU 5, UFU 10, UFU 2, UFU 7, UFU 12, UFU 6, UFU 8 e UFU 9 formaram um segundo grupo, com um perfil oposto. Os genótipos exibiram valores abaixo da média (tons de amarelo) para as variáveis de biomassa indicando menor vigor vegetativo.

A variável SPAD apresentou padrão independente, não seguindo essa divisão principal. Os genótipos UFU 10 e UFU 5 se destacaram com valores superiores de SPAD, apesar de terem baixa biomassa. No entanto, o genótipo UFU 1, que apresentou maior biomassa, teve um valor de SPAD médio.

O mapa de calor confirmou a conclusão obtida pela análise do dendrograma: a maior variação entre os genótipos foi observada para o vigor vegetativo e a produção de biomassa. O genótipo UFU 1 confirmou-se como um *outlier* positivo extremo para as características, enquanto o grupo oposto (UFU 5 e UFU 10), refletiu diferentes estratégias de alocação de recursos ou adaptações. Esta dissociação entre vigor vegetativo e teor de

clorofila é um fenômeno observado em estudos de variabilidade genética (ERTIRO et al., 2013).

Analisando a matriz de correlação ($p < 0.05$) para as variáveis agronômicas (Figura 6), identificou-se relações estatisticamente significativas que explicaram a estrutura dos grupos formados nas análises. As correlações mais fortes e positivas estão entre as variáveis de biomassa e tamanho da planta. Peso da planta e de folhas, apresentaram uma correlação extremamente alta (0.96), o que era esperado, já que as folhas são o principal componente do peso fresco (OLIVEIRA et al., 2021). Peso de planta e peso de folhas se correlacionam positivamente com comprimento de caule (0.71 e 0.59, respectivamente) e diâmetro de planta (0.56 e 0.53, respectivamente), indicando que plantas mais pesadas tendem a ser maiores e mais desenvolvidas.

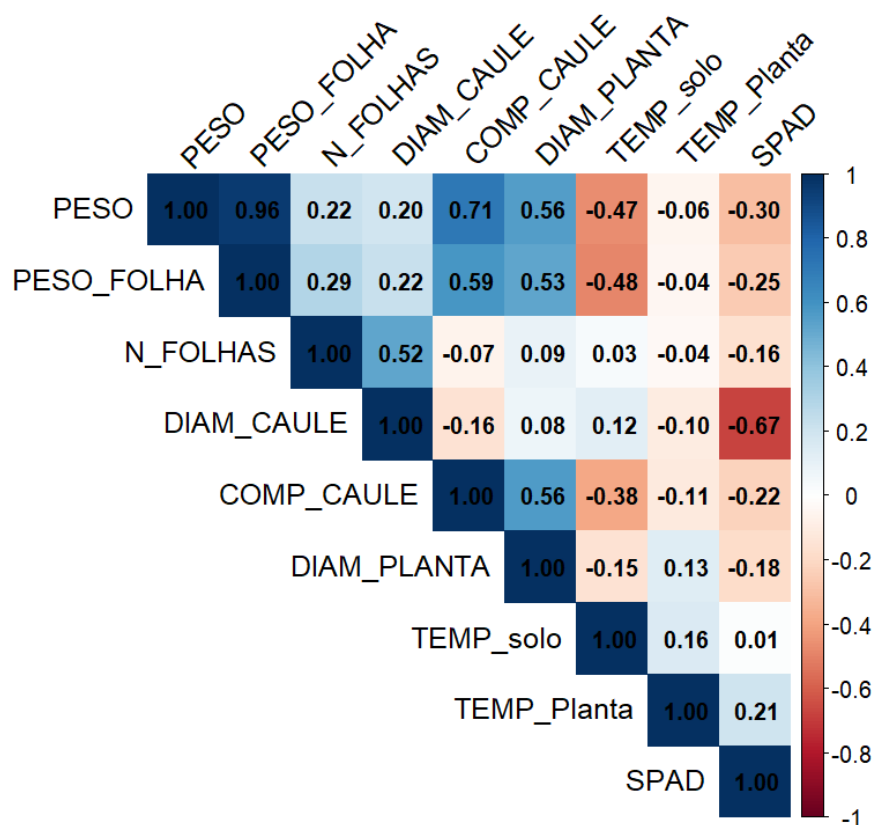


Figura 6: Matriz de correlação para variáveis agronômicas dos 12 híbridos. Cores mais escuras indicam maior correlação entre as variáveis analisada e cores e tons mais azulados indicam menores correlação.

Destacaram-se a correlação negativa moderada entre as variáveis de vigor (peso, peso de folhas e comprimento de caule) e a temperatura do solo (-0,47, -0,48, -0,38, respectivamente). Embora essas correlações não sejam relevantes para fins de melhoramento genético, contribuem para a observação do mapa de calor, no qual genótipos com maior biomassa estiveram consistentemente associados a temperaturas do solo mais baixas, sugerindo que plantas mais vigorosas e com maior área foliar podem promover um maior sombreamento do solo.

O diâmetro de caule se destacou por apresentar uma correlação positiva moderada com número de folhas (0.52) e correlação negativa com SPAD (-0.67). Isso indica que o tamanho do caule está associado a maior quantidade de folhas, porém, resulta em menor teor de clorofila (SPAD), possivelmente devido a uma estratégia distinta de alocação de recursos.

5.3. ANÁLISE MULTIVARIADA DE VARIÁVEIS AGRONÔMICAS E PIGMENTOS

Os genótipos de alface apresentaram dissimilaridade genética e constituíram diferentes grupos de acordo com os métodos de agrupamento UPGMA (Figura 7).

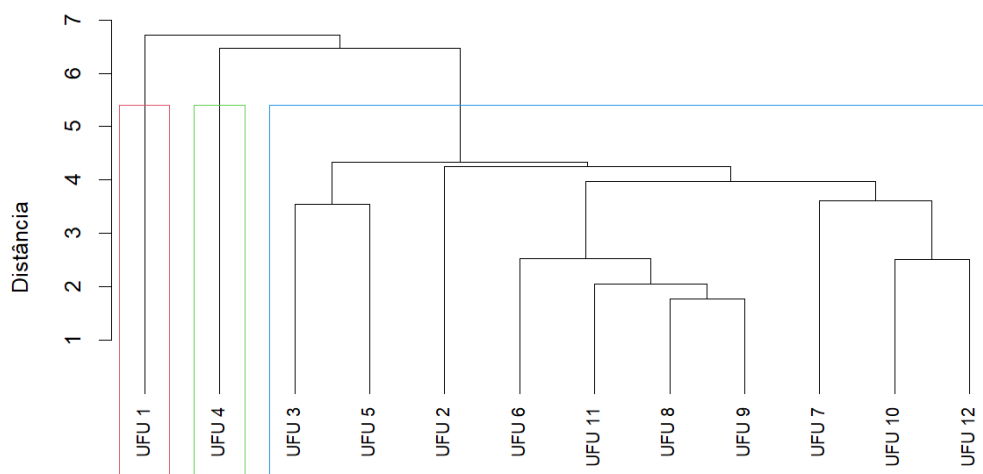


Figura 7: Dendrograma da dissimilaridade genética entre os 12 híbridos de alface biofortificada, obtido pelo Método Hierárquico de ligação média (UPGMA) como medida de dissimilaridade para as variáveis agronômicas e pigmentos.

A formação de três grupos distintos no dendrograma evidenciou a existência de variabilidade genética significativa entre os acessos, um requisito fundamental para o sucesso dos programas de melhoramento genético (AZEVEDO et al., 2013). Observou-se que o primeiro grupo foi composto pelo genótipo UFU 1. O segundo grupo pelo genótipo UFU 4. E por fim, o terceiro grupo foi formado pelos demais genótipos (UFU 3, UFU 5, UFU 2, UFU 6, UFU 11, UFU 8, UFU 9, UFU 7, UFU 10 e UFU 12). Essa segregação indicou que estes genótipos possuem características diferenciadas, justificando sua utilização como possíveis parentais em cruzamentos estratégicos para a geração de variabilidade e obtenção de ganhos genéticos (ARAUJO et al., 2016).

O grupo 1 (UFU 1) destacou-se como o genótipo performático em termos agronômicos e de teores de pigmentos, sendo um candidato excelente para biofortificação, podendo ser utilizado para melhorar a produtividade e teores de pigmentos. O Grupo 2 (UFU 4) foi morfológicamente distinto, com arquitetura compacta, caule curto e possui teores de pigmentos menos expressivos. O Grupo 3 apresentou ampla variabilidade, com subgrupos funcionais (roxos, variegatas, verdes) que permitem seleção para características específicas como teores de antocianina ou carotenoides (CASSETARI et al., 2015). A diversidade presente no grupo 3, permitiu cruzamentos que combinassem características agronômicas e pigmentos específicos. Porém, como estratégias adotadas no programa de melhoramento da UFU, os cruzamentos serão conduzidos entre híbridos que compartilhavam fenótipos equivalentes, especificamente: plantas verdes serão cruzadas com verdes, plantas roxas com roxas, e variegatas com variegatas. Sendo mantida a uniformidade foliar, cruzando-se plantas de folhas lisas preferencialmente com folhas lisas, e folhas crespas unicamente com folhas crespas. Esta estratégia de cruzamentos direcionados por similaridade fenotípica visa preservar e intensificar as características desejadas em cada genótipo.

O valor do coeficiente cofenético obtido (0,8685) foi considerado excelente, indicando alta correlação entre a matriz de dissimilaridade original e a representação

dendrográfica. Observou-se que quando obtemos um valor próximo de 1 representa correlações fortes e positivas, como as que ocorreram entre peso e peso de folhas ($r = 0.96$), indicando uma relação linear quase perfeita e sugerindo que essas variáveis podem estar medindo aspectos muito similares da biomassa da planta.

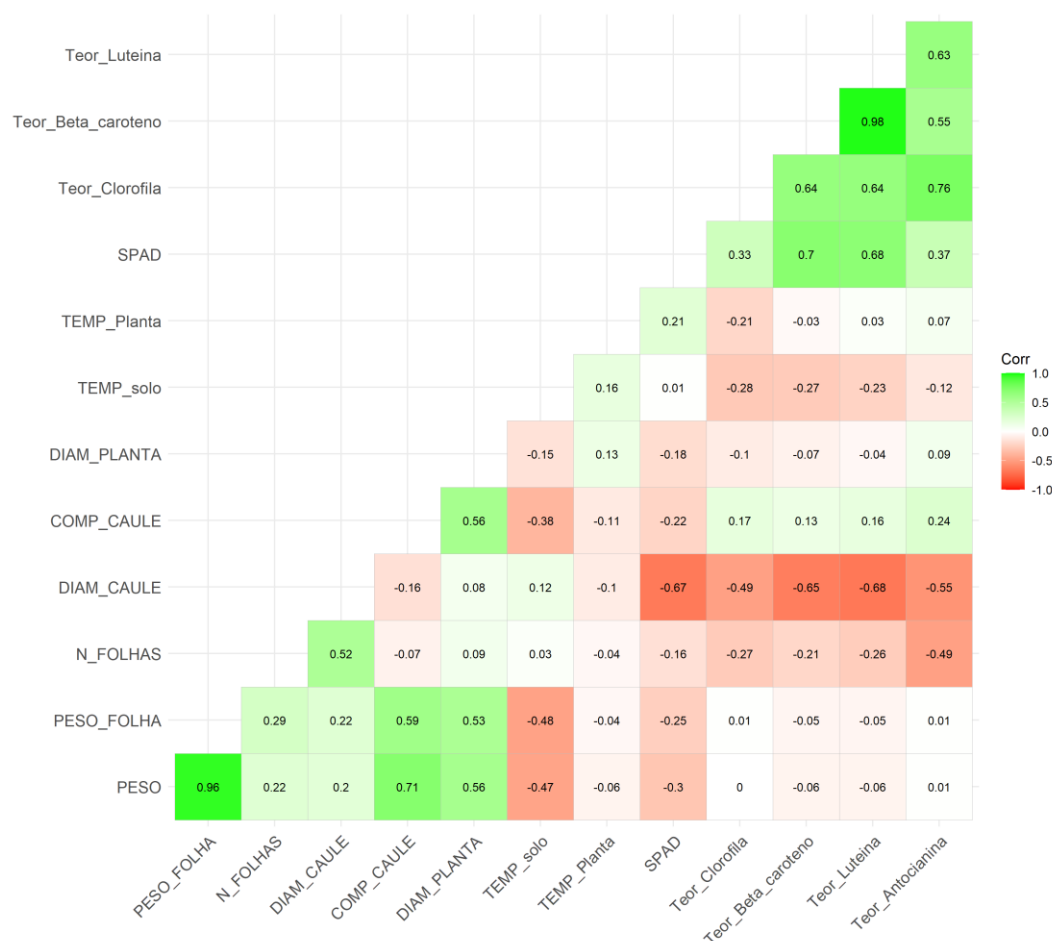


Figura 8: Matriz de correlação para variáveis agronômicas e pigmentos dos 12 híbridos. Cores mais verdes indicam maior correlação entre as variáveis analisada e cores mais vermelhas menores correlação.

O trabalho de Tserkis et al. (2025) evidenciou que correlações próximas de zero não necessariamente implicam a ausência de qualquer relação, mas sim a ausência de uma relação *linear*. Isso é crucial para interpretar correlações significativas entre número de folhas e antocianina ($r = -0.67$) e com clorofila ($r = -0.63$), o que também foi observado

para as correlações entre os pigmentos (beta-caroteno, luteína e antocianina) e o diâmetro de caule (valores entre $r = -0,71$ e $r = -0,76$). As fortes correlações negativas observadas com valores próximos a -1, são tão importantes quanto as positivas. Elas indicaram que quando uma característica aumenta, a outra diminui, sugerindo uma relação de competição ou oposição. A forte correlação positiva entre beta-caroteno e luteína ($r = 0,98$) sugere uma via biossintética coordenada ou regulação genética comum para esses carotenoides (LICHTENTHALER e WELLBURN, 1983).

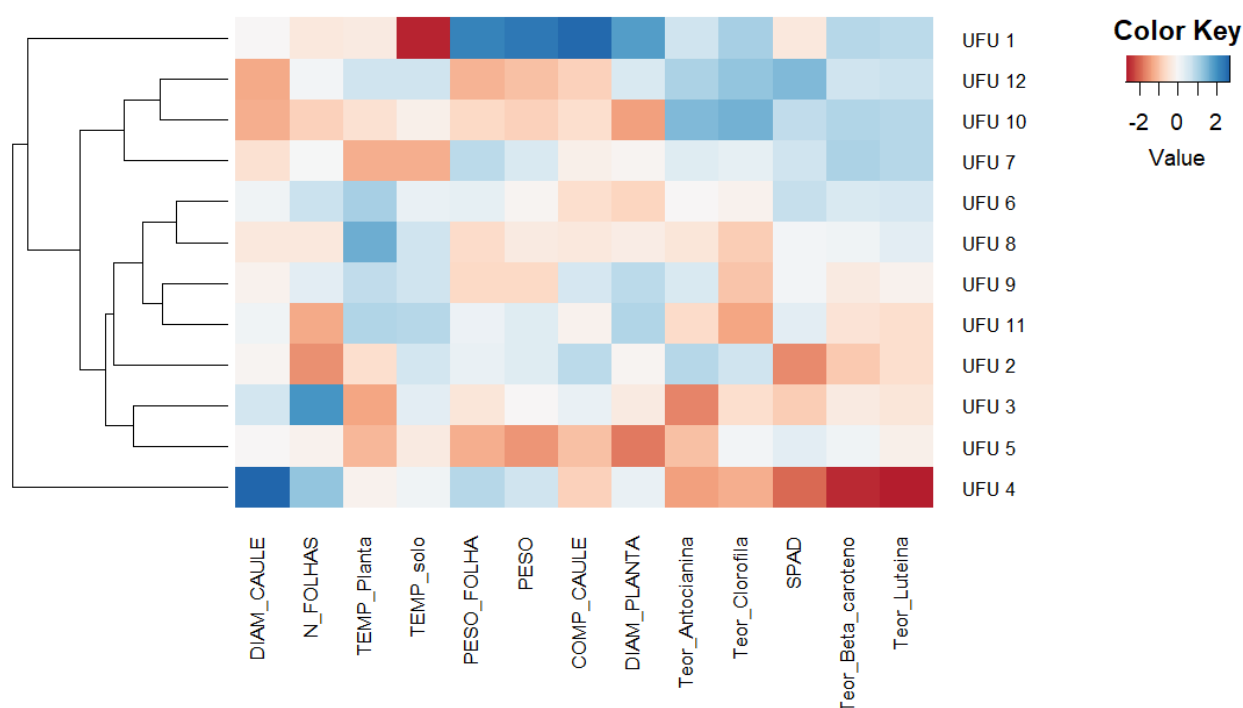


Figura 9: Mapa de calor para variáveis agrônômicas e pigmentos dos 12 híbridos. Cores mais azul indicam que o genótipo apresentou maior resposta para a variável analisada e cores mais vermelhas menores respostas.

Com base nas análises do dendrograma UPGMA, o mapa de calor (figura 9) revelou padrões consistentes de variação entre os genótipos de alfaca, complementando a estrutura de agrupamento observada anteriormente. O mapa de calor confirmou a distinção entre os três grupos principais e detalharam as características específicas que contribuíram para essas dissimilaridades.

O genótipo UFU 1, que formou um grupo isolado no dendrograma, apresentou perfil expressivo e positivo nas variáveis agronômicas (diâmetro de planta, peso da planta e peso de folhas) e de pigmentos, com tons de azul predominantes indicando valores acima da média. Esse padrão reforça o potencial superior do genótipo para programas de biofortificação, devido a combinação da alta produtividade com altos teores de compostos bioativos. O UFU 4 mostra um perfil distinto, com valores abaixo da média para a maioria dos pigmentos, confirmando sua menor expressão para estes bioativos. No entanto, esse genótipo mantém valores próximos ou acima da média em algumas variáveis agronômicas (diâmetro de planta e caule, peso da planta e peso de folhas), o que está alinhado com sua arquitetura compacta observada anteriormente.

O grupo composto pelos demais genótipos exibiu diversidade considerável e subpadrões bem definidos. Os genótipos UFU 12, UFU 10 e UFU 7 apresentaram tons de azul para teores de antocianina e outros pigmentos, corroborando sua classificação como alfaces roxas com alto potencial para antocianina ou características antioxidantes. Por outro lado, os genótipos UFU 6 e UFU 8, destacaram-se em carotenoides. Os genótipos UFU 2, UFU 3 e UFU 5 apresentaram valores abaixo da média para pigmentos, mas com variações em características agronômicas. A ordenação no mapa de calor com os genótipos UFU 12, UFU 10, UFU 7 e UFU 6 próximos ao topo indicara que esses genótipos compartilham perfis favoráveis para dar continuidade ao programa de melhoramento genético, enquanto UFU 4, é o menos expressivo. A análise multivariada é uma ferramenta poderosa na caracterização morfoagronômica de germoplasma, permitindo identificar genótipos promissores (SANTOS et al., 2020), como realizado neste estudo.

De acordo com o método de Singh (1981), a importância relativa das variáveis (Figura 10) que acumulam aproximadamente 80% ou mais da variância total são considerados suficientes para explicar a maior parte da variação existente no conjunto de dados multivariados. Observou-se que as quatro primeiras variáveis são as que mais contribuíram, acumulando 90.1% do total. Este resultado está de acordo com o referencial, indicando que a diversidade presente nos genótipos pode ser adequadamente representada por um número reduzido de dimensões, facilitando a visualização e interpretação dos dados (ARAÚJO et al., 2016; SANTOS et al., 2020).

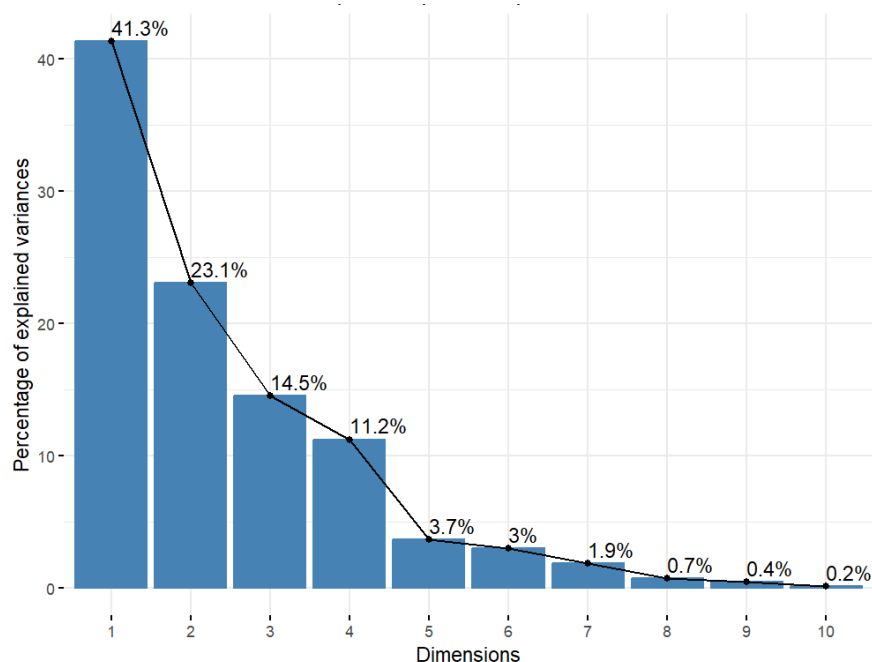


Figura 10: Contribuição relativa dos caracteres agrônômicos e pigmentos na dissimilaridade genética dos híbridos de alfaces segundo critério de Singh (1981). 1- PESO, 2- PESO_FOLHA, 3- N_FOLHA, 4- DIAM_CAULE, 5- COMP_CAULE, 6- DIAM_PLANTA, 7- TEMP_SOLO, 8- TEMP_PLANTA, 9- SPAD, 10- CLOROFILA.

A sequência de caracteres dominantes – peso de folha, número de folhas e diâmetro do caule – demonstra que a produtividade (biomassa) e a arquitetura da planta são os principais eixos de variação e, portanto, as características mais relevantes para discriminar geneticamente os genótipos avaliados. Em contraste, observou-se a contribuição marginal dos teores de clorofila e SPAD para a variância total, com somatória de 1%, que é um indicativo claro do sucesso do processo de biofortificação. Conforme observado por Cassetari et al. (2015) e Oliveira et al. (2021), quando um programa de melhoramento é bem-sucedido em fixar geneticamente caracteres de qualidade como altos teores de pigmentos, a variabilidade genética para esses traços torna-se mínima na população selecionada. Assim, a diversidade remanescente e útil para a seleção subsequentemente se concentra em atributos agrônômicos que ainda não foram totalmente fixados.

Com base na Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 11), foi possível identificar os genótipos mais promissores para o Programa de Melhoramento Genético de

Alfaces Biofortificadas, considerando as características agronômicas e de pigmentos analisadas. O biplot permite visualizar tanto a posição dos genótipos no espaço reduzido dos componentes principais quanto a direção e influência das variáveis, facilitando a seleção de genótipos superiores.

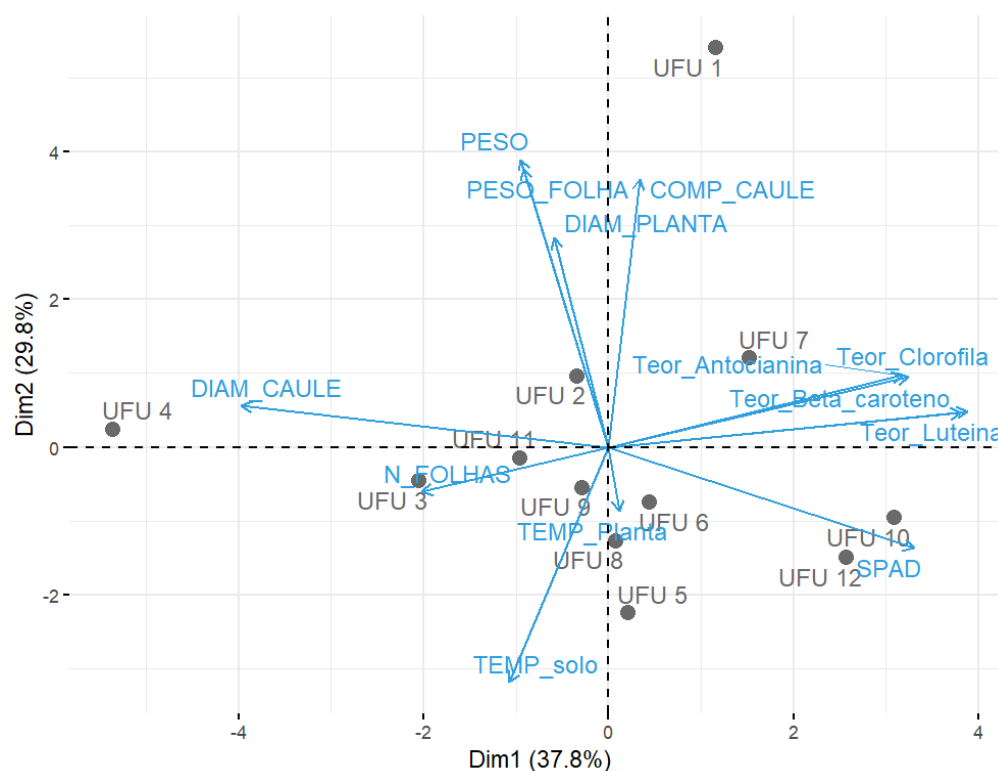


Figura 11: Análise de Componentes Principais (PCA) dos caracteres agronômicos e pigmentos na dissimilaridade genética dos Híbridos de alfaces.

Os genótipos que se destacam são aqueles localizados nas extremidades dos eixos dos componentes principais, especialmente onde se concentram os vetores das variáveis desejáveis. Por exemplo, genótipos como UFU 1, UFU 7, UFU 10 e UFU 12 aparecem em regiões associadas a altos valores de características agronômicas (como peso, número de folhas, diâmetro do caule) e elevados teores de pigmentos (clorofila, beta-caroteno, luteína e antocianina).

O genótipo UFU 1 apresenta forte associação a múltiplas variáveis positivas, confirmando seu potencial como parental elite para produtividade e biofortificação integrada. Os genótipos UFU 10 e UFU 12 localizados na direção dos vetores de

antocianinas são ideais para programas de melhoramento visando antioxidantes roxos, enquanto genótipos próximos a vetores de carotenoides (beta-caroteno e luteína), como UFU 6 e UFU 8, são superiores para biofortificação em pró-vitamina A.

Além disso, genótipos com boa arquitetura vegetal (diâmetro de planta e caule) e vigor (peso e número de folhas) devem ser priorizados para garantir adaptabilidade e rendimento. A herdabilidade de caracteres em alface, conforme demonstrado por Oliveira et al. (2021), garante que a seleção desses genótipos superiores resulte em ganhos genéticos efetivos para as próximas gerações. Por outro lado, genótipos próximos à origem ou em regiões opostas aos vetores desejáveis (como UFU 4 e UFU 5) têm desempenho inferior em pigmentos ou características agronômicas.

A partir destes resultados foram selecionados os híbridos simples que mais se destacaram para pigmentos, como parentais doadores dos bioativos de biofortificação. Paralelamente, genótipos com excelente desempenho agrônômico e características comerciais superiores foram escolhidas como parentais doadores.

A estratégia de cruzamento foi baseada no princípio de complementaridade, buscando combinar, em um único genótipo, a alta qualidade nutricional e o vigor agrônômico, seguindo a orientação de cor das plantas e textura das folhas semelhantes. Para isso, foram realizados cruzamentos direcionados entre UFU 1 X UFU 9. O parental UFU 1, embora apresente os melhores resultados em conteúdo de pigmentos, possui a limitação de não ser tropicalizado. Buscou-se, portanto, introgridir a característica de adaptação tropical e menor comprimento de caule do parental UFU 9. Outro cruzamento foi entre UFU 4 X UFU 2. O parental UFU 4 destaca-se por suas características agronômicas superiores, embora possua teor de pigmentos moderado. Para incrementar seu perfil de bioativos, utilizou-se como parental doador o UFU 2, reconhecido por ter um bom conteúdo de pigmentos.

Essas combinações específicas visaram criar populações segregantes com variabilidade genética suficiente para permitir a seleção de genótipos superiores, que expressem simultaneamente as características de biofortificação almejadas e as características agronômicas indispensáveis para o sucesso comercial da cultura.

6. CONCLUSÃO

Concluiu-se que houve dissimilaridade genética entre os híbridos avaliados. Destacaram-se genótipos promissores para diferentes finalidades: UFU 1, UFU 10, UFU 12, UFU 6 e UFU 8. Foi selecionada a combinação entre UFU 1 X UFU 9 e UFU 4 X UFU 2 para o desenvolvimento de híbridos duplos. Os resultados obtidos forneceram uma base genética diversificada e de qualidade para o desenvolvimento de duplos híbridos que, após sucessivas autofecundações, poderão gerar cultivares comerciais com alto valor agronômico e nutricional.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. J. de; CARMONA, V. M. Vergara; INOCÊNCIO, M. Ferreira; NETO, A. E. Furtini; FILHO, A. B. Cecílio; MAUAD, M. Soil type and zinc doses in agronomic biofortification of lettuce genotypes. *Agronomy*, v. 10, n. 1, p. 124, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010124>.
- ARAÚJO, J.C. et al. Univariate and multivariate procedures for agronomic evaluation of organically grown tomato cultivars. *Horticultura Brasileira*, v.34, p.374-380, 2016.
- AZEVEDO, A. M. et al. Seleção de genótipos de alface para cultivo protegido: divergência genética e importância de caracteres. *Horticultura Brasileira*, v. 31, p. 260-265, 2013.
- BARRADO, L. C. **Dissimilaridade genética para compostos bioativos em híbridos de alfaces biofortificadas**. 2023. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, ICIAG, Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2023.
- BASLAM, M.; MORALES, F.; GARMENDIA, I.; GOICOECHEA, N. Qualidade nutricional das folhas externas e internas de alfaces pigmentadas de verde e vermelho (*Lactuca sativa* L.) consumidas em saladas. *Ciência Horticulturae*, v. 151, p. 103-111, 28 fev. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.023>
- BENIN, G. et al. Identificação da dissimilaridade genética entre genótipos de feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) do grupo preto. *Revista Brasileira de Agrociência*, v. 8, n. 3, p. 179-184, 2002. Disponível em: <http://www.ufpel.tche.br/faem/agrociencia/v8n3/artigo01.pdf>.

BOUIS, H. et al. Biofortificação: desafios futuros para uma nova tecnologia emergente para melhorar a segurança nutricional de forma sustentável. *Current Developments in Nutrition*, no prelo, p. 104478, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2024.104478>

Cassetari, LS; Gomes, MS; Santos, DC; Santiago, WD; Andrade, J.; Guimarães, AC; Souza, JA; Cardoso, MG; Maluf, WR; Gomes, LA Níveis de β -caroteno e clorofila em cultivares e linhagens de alface. *Acta Horticulturae*, v.1083, p.469-474, 2015. <https://10.17660/ActaHortic.2015.1083.60>

CLEMENTE, A. A.; MACIEL, G. M.; SIQUIEROLI, A. C. S.; GALLIS, R. B. A.; LUZ, J. M. Q.; SALA, F. C.; PEREIRA, L. M.; YADA, R. Y. Nutritional characterization based on vegetation indices to detect anthocyanins, carotenoids, and chlorophylls in mini-lettuce. *Agronomy-Basel*, v. 13, p. 1-16, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051403>

CRUZ, C. D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 35, n.3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C. D. **Genes Software - extended and integrated with the R, Matlab and Selegen.** *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 38, n. 4, p. 547-552, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i4.32629>.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético.** 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2012. 514 p.

ERTIRO, B. T. et al. Genetic variability of maize stover quality and the potential for genetic improvement of fodder value. *Field Crops Research*, v. 153, p. 79-85, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.12.019>

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** Statistical database. FAOSTAT, 2022.

FRANCIS, F. J. Analysis of anthocyanins. *Anthocyanins as food colors*, 1, p. 280, 1982.

GUPTA, S.; SRIVASTAVA, P. K.; SINGH, R. P. Promoção do crescimento e biofortificação de zinco em alface (*Lactuca sativa* L.) pela aplicação da cepa *Talaromyces* como bioestimulante. *Scientia Horticulturae*, v. 323, p. 112534, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112534> .

HAMEED, M. K.; UMAR, W.; RAZZAQ, A.; WEI, S.; NIU, Q.; HUANG, D.; CHANG, M. Quantificação de polifenóis totais, antioxidantes, antocianinas e metabólitos secundários por análise UPLC VION IMS QTOF MS/MS em cultivares de alface verde e vermelha. *Ciência Horticulturae*, v. 315, p. 111994, 1 maio 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111994>

KATHI, S.; LAZA, H.; SINGH, S.; THOMPSON, L.; LI, W.; SIMPSON, C. Uma década de melhoria da qualidade nutricional de culturas hortícolas agronomicamente (2012-2022): uma revisão sistemática da literatura. *Science of the Total Environment*, v. 911, Artigo 168665, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168665>

KENNY, O.; O'BEIRNE, D. Efeitos do tratamento de lavagem na retenção de antioxidantes em alface americana pronta para uso. *International Journal of Food Science & Technology*, v. 44, n. 6, p. 1146-1156, 2009.

KIM, M. J.; MOON, Y.; TOU, J. C.; MOU, B.; WATERLAND, N. L. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 49, p. 19-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>.

LEBEDA, A.; RYDER, E.; GRUBE, R.; DOLEZALOVÁ, I.; KRISTKOVÁ, E. Lettuce (Asteraceae; *Lactuca* spp.). In: SINGH, R. J. (Ed.). *Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement*. Boca Raton: CRC Press, 2007. v. 3, p. 377-472.

LI, Z.; ZHAO, X.; SANDHU, A. K.; GU, L. Efeitos do ácido abscísico exógeno no rendimento, capacidade antioxidante e conteúdo fitoquímico de alfaces cultivadas em estufa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 58, p. 6503-6509, 2010.

LICHTENTHALER, H.; WELLBURN, A. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, n. 603, p. 591-592, 1983.

LLORACH, R.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, A.; TOMÁS-BERBERÁN, F. A.; GIL, M. I.; FERRES, F. Caracterização de polifenóis e propriedades antioxidantes de cinco variedades de alface e escarola. *Food Chemistry*, v. 108, p. 1028-1038, 2008.

LOPES, M.A.; FALEIRO, F.G.; FERREIRA, M.E.; LOPES, D.B.; VIVIAN, R.; BOITEUX, L.S. Embrapa's contribution to the development of new plant varieties and their impact on Brazilian agriculture. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v.12, p.31-46, 2012.

MACIEL, G. M.; GALLIS, R. B. A.; BARBOSA, R. L.; PEREIRA, L. M.; SIQUIEROLI, A. C. S.; PEIXOTO, J. V. M. Image phenotyping of lettuce germplasm with genetically diverse carotenoid levels. *Bragantia*, v. 8, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190519><https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190519>

MARTINEZ, D. G. et al. Valor nutricional do cultivo de alface hidropônico. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 4, p. 481-489, 2016.

MOU, B. Lettuce. In: PROHENS, J.; NUEZ, F. (Eds.). *Manual de Melhoramento de Plantas*, Vol. I: Vegetais I: Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae e Cucurbitaceae. Nova York: Springer, 2008. p. 75-116.

MOU, B.; RYDER, E. J. Relação entre o valor nutricional e a estrutura da cabeça da alface. *Acta Horticulturae*, v. 637, p. 361-367, 2004.

MUTTARAK, Raya; WILDE, Joshua (Eds.). *O mundo aos 8 bilhões*. Nova York: Population Council, 2022. <https://doi.org/10.31899/pdr2022.1000>

NAGAI, H. Obtenção de novos cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.) resistentes ao mosaico e ao calor. *Revista de Olericultura*, v.18. p.14-21. 1980.

NICOLLE, C.; CARDINAULT, N.; GUEUX, E.; JAFFRELO, L.; ROCK, E.; MAZUR, A.; AMOUROUX, P.; RÉMÉSY, C. Efeitos na saúde de uma dieta baseada em vegetais: o consumo de alface melhora o metabolismo do colesterol e o estado antioxidante em ratos. *Clinical Nutrition*, v. 23, p. 605-614, 2004.

OLIVEIRA, A. H. G.; MACIEL, G. M.; SIQUIEROLI, A. C. S.; LUZ, J. M. Q.; SILVA, E. C. D. Dynamics of heritability in different characters of lettuce. *Revista Caatinga*, v. 34, p. 514–526, 2021. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n303rcht><https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n303rc>

ORTIZ, Raquel; GASCÓ, Gabriel; MÉNDEZ, Ana; OBRADOR, Ana; GONZÁLEZ, Demetrio; ALMENDROS, Patrícia. Biofortificação de alface com zinco usando fontes de zinco ecologicamente corretas em solo ácido. *Scientia Horticulturae*, v. 338, p. 113620, 1 dez. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113620><https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113620>

PADASH, A.; SHAHABIVAND, S.; BEHTASH, F.; AGHAEI, A. A practicable method for zinc enrichment in lettuce leaves by the endophyte fungus *Piriformospora indica* under increasing zinc supply. *Scientia Horticulturae*, v. 213, p. 367-372, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.040> .

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

REGO, E. R. et al. Genetic diversity analysis of peppers: a comparison of discarding variable methods. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 3, n. 1, p. 19-26, 2003. Disponível em: <http://www.sbmp.org.br/cbab/siscbab/uploads/c8128f42-9aca-6335.pdf>.

REYES-CHIN-WO, S.; WANG, Z.; YANG, X.; KOZIK, A.; ARIKIT, S.; SONG, C.; XIA, L.; FROENICKE, L.; LAVELLE, D. O.; TRUCO, M.-J. Montagem do genoma com dados

de ligação de proximidade in vitro e triplicação do genoma completo em alface. *Nature Communications*, v. 8, p. 14953, 2017.

ROMANI, A.; PINELLI, P.; GALARDI, C.; SANI, G.; CIMATO, A.; HEIMLER, D. Polifenóis em alface cultivada em estufa e ao ar livre. *Food Chemistry*, v. 79, p. 337-342, 2002.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacultura brasileira. *Hortic Bras*, v. 30, p. 187-194, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000200002>
<https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000200002>

SALES JÚNIOR, R.; NUNES, G.H.S.; SILVA, K.J.P.; COSTA, G.G.; GUIMARÃES, I.M.; MICHEREFF, S.J. Caracterização morfológica de fontes de resistência de meloeiro a *Rhizoctonia solani*. *Horticultura Brasileira*, v.33, p.196-202, 2015.

SANTOS, R. M. C. et al. Análise multivariada na caracterização morfoagronômica de germoplasma de pimenta. *Horticultura Brasileira*, v. 38, n. 2, p. 130-137, 2020.

SERAFINI, M.; BUGIANESI, R.; SALUCCI, M.; AZZINI, E.; RAGUZZINI, A.; MAIANI, G. Efeito da ingestão aguda de alface fresca e armazenada (*Lactuca sativa*) na capacidade antioxidante total do plasma e nos níveis de antioxidantes em humanos. *Irish Journal of Nutrition*, v. 88, p. 615-623, 2002.

SINGH, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, v. 41, p. 237-245, 1981.

SOUZA et al. Variabilidade genética para características agronômicas em progênies de alface tolerantes ao calor. *Horticultura Brasileira*, v. 26, p. 354-358, 2008.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT SOLUTIONS NETWORK. *Solutions for sustainable agriculture and food systems*: Technical report for the Post-2015 development agenda. 2015. Nova York, NY, EUA.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TSERKIS, Spyros; ASSAD, Syed M.; LAM, Ping Koy; NARANG, Prineha. Quantifying total correlations in quantum systems through the Pearson correlation coefficient. *Physics Letters A*, v. 543, p. 130432, 2025. ISSN 0375-9601. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.130432>.

WEI, T.; VAN TREUREN, R.; LIU, X.; ZHANG, Z.; CHEN, J.; LIU, Y.; DONG, S.; SUN, P.; YANG, T.; LAN, T. O resequenciamento do genoma completo de 445 acessos de *Lactuca* revela a história de domesticação da alface cultivada. *Nature Genetics*, v. 53, p. 752-760, 2021.

WITHAM, F. H.; BLAYDES, D. F.; DEVLIN, R. M. *Experimentos em Fisiologia Vegetal*. Nova York: Van Nostrand, 1971.