

**IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CARACTERÍSTICAS
MORFOFISIOLÓGICAS PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE
MILHO-PIPOCA EM CONDIÇÃO DE SECA**

JHEAN TORRES LEITE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2023**

IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CARACTERÍSTICAS
MORFOFISIOLÓGICAS PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE
MILHO-PIPOCA EM CONDIÇÃO DE SECA

JHEAN TORRES LEITE

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Genética e Melhoramento de
Plantas.”

Orientador: Antônio Teixeira Do Amaral Júnior

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

L533

Leite, Jhean Torres.

IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA EM CONDIÇÃO DE SECA / Jhean Torres Leite. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

93 f. : il.

Bibliografia: 58 - 71.

Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2023.
Orientador: Antonio Teixeira do Amaral Junior.

1. Mudanças climáticas. 2. Raíz. 3. Fotossíntese. 4. Seleção indireta. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 631.5233

IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CARACTERÍSTICAS
MORFOFISIOLÓGICAS PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE
MILHO-PIPOCA EM CONDIÇÃO DE SECA

JHEAN TORRES LEITE

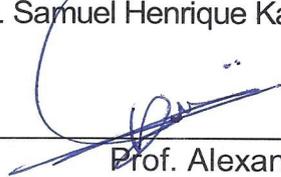
“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Genética e Melhoramento de
Plantas”.

Aprovada em 14 de fevereiro de 2023

Comissão Examinadora



Dr. Samuel Henrique Kamphorst (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) - UENF



Prof. Alexandre Pio Viana (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF



Dr. Cosme Damião Cruz (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) - UFV



Prof. Antônio Teixeira do Amaral Junior (D.Sc., Genética e Melhoramento) - UENF
(Orientador)

DEDICATÓRIA

A Deus por me dar a benção da vida e permitir que eu realizasse esse trabalho.

À minha família, em especial aos meus amados pais Joaquim e Carla e ao meu irmão Joaquim Junior.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, pela infraestrutura e possibilidade de realizar o curso;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pela concessão de bolsas e auxílios;

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, na pessoa da professora Telma Nair Santana Pereira;

Ao meu orientador Antônio Teixeira do Amaral do Júnior, pela dedicação, apoio, orientação e amparo;

Aos professores Marcelo Vivas e Eliemar Campostrini, pela coorientação nesse estudo;

Ao Grupo de Melhoramento em Milho-Pipoca, representado por Pedro, Fernando, Ismael, Yure, Fábio, Valdinei, Gabrielle, Juliana, Shahid, Carolina, Rosimeire, Talles, pelo apoio, dedicação e amparo;

Aos bons amigos Tiago, Bruno, Valter, Samuel, Divino, Flávia, Ravena e Rafaela, pelo carinho, momentos de descontração e amparo;

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, José Daniel Valle de Almeida;

Aos colegas do curso de mestrado;

A todos, meu muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	X
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivos do primeiro capítulo.....	4
2.2 Objetivos do segundo capítulo.....	4
3. CAPÍTULO	5
3.1 Análises multivariadas na seleção de genótipos de milho-pipoca eficientes no uso da água.....	5
3.1.1 INTRODUÇÃO	5
3.1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1.2.1 Aspectos gerais da cultura.....	7
3.1.2.2 Cultura do milho frente ao estresse hídrico	8
3.1.2.3 Características agronômicas do milho relacionadas à maior produção de grãos em condições de déficit hídrico	10
3.1.3 MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1.3.1 Genótipos	12
3.1.3.2 Condições experimentais.....	14
3.1.3.3 Características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular avaliadas	16
3.1.3.4 Análises estatísticas	18

3.1.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1.4.1	Análise de variância, estimativas de médias e impacto da limitação hídrica nas características morfoagronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular	19
3.1.4.2	Análise multivariada – GT <i>biplot</i>	26
3.1.5	CONCLUSÕES	34
3.2	Análise de trilha como método para a discriminação de características-suporte na seleção indireta de genótipos de milho-pipoca tolerantes à seca	35
3.2.1	INTRODUÇÃO	35
3.2.2	REVISÃO	37
3.2.2.1	Melhoramento genético para tolerância ao déficit hídrico em milho.....	37
3.2.2.2	Características morfofisiológicas em resposta ao estresse hídrico.....	38
3.2.3	MATERIAL E MÉTODOS	40
3.2.3.1	Material vegetal, desenho experimental e tratos culturais	40
3.2.3.2	Características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular avaliadas	41
3.2.3.3	Análises estatísticas	42
3.2.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.2.4.1	Análise de variância e estimativas de médias das características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular.	44
3.2.5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	APÊNDICES	72

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Condições ambientais (umidade relativa, radiação fotossinteticamente ativa e temperatura média) observadas em experimentos com 50 linhagens de milho-pipoca cultivadas nas safras de 2020 e 2021.....14
- Figura 2.** Quantidade de água aplicada (mm), nas safras de 2020 e 2021, em relação aos dias após a semeadura de linhagens de milho-pipoca. WW (condição de irrigação) e WS (condição de estresse hídrico). A linha vermelha se refere à condição WS e a linha azul se refere à condição WW.....15
- Figura 3.** Potencial hídrico do solo durante o cultivo das linhagens de milho-pipoca, em condições hídricas contrastantes (WS e WW) nas safras de 2020 e 2021.....16
- Figura 4.** Redução percentual entre médias das características avaliadas nas diferentes condições hídricas – Irrigação adequada (azul) e Irrigação com déficit hídrico (vermelho) – nas safras (CS) de 2020 e 2021.....22
- Figura 5.** Gráfico *biplot* “which-won-what” para condição de déficit hídrico (WS) e condição com irrigação adequada (WW) nas safras de 2020 e 2021.....27
- Figura 6.** Gráfico *biplot* “Mean vs. Stability” para condição de déficit hídrico (WS) e condição com irrigação adequada (WW) nas safras de 2020 e 2021.....29

Figura 7. Gráfico <i>biplo</i> t “Discriminateness vs. representativeness” para condição de déficit hídrico (WS) e condição com irrigação adequada (WW) nas safras de 2020 e 2021.....	31
Figura 8. Gráfico <i>biplo</i> t “Ranking Genotypes” para condição de déficit hídrico (WS) e condição com irrigação adequada (WW) nas safras de 2020 e 2021	32
Figura 9 – Diagrama causal com efeitos diretos (linhas contínuas unidirecionais) das variáveis explicativas sobre as variáveis dependentes GY e PE e correlações entre características.....	43
Figura 10: Correlação genotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), nas safras de 2020 e 2021.....	49
Figura 11: Correlação genotípica entre as características estudadas na condição bem irrigada (WW), nas safras de 2020 e 2021.....	50
Figura 12: Diagrama causal da análise de trilha de 17 variáveis explicativas sobre as variáveis dependentes GY e PE, para o ambiente WS, nos anos de 2020 e 2021.....	52
Figura 13: Diagrama causal da análise de trilha de 17 variáveis explicativas sobre as variáveis dependentes GY e PE, para o ambiente WW, nos anos de 2020 e 2021.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição de genótipos de milho-pipoca e informações quanto à geração, país de origem, procedência e adaptação climática.....	12
Tabela 2. Resumo da análise de variância conjunta e individual, das estimativas das médias e dos desvios-padrão associados a características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular de linhagens de milho-pipoca, sob diferentes condições hídricas (WS e WW) e safras (2020 e 2021).....	20
Tabela 3. Resumo da análise individual de variância, estimativas de médias, médias quadradas, coeficiente de variação e desvio-padrão associados a características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular de linhagens de milho-pipoca sob diferentes condições hídricas (WS e WW) em 2020.....	44
Tabela 4. Resumo da análise individual de variância, estimativas de médias, quadrados médios, coeficiente de variação e desvio-padrão associados a características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular de linhagens de milho-pipoca sob diferentes condições hídricas (WS e WW) em 2021.....	46

RESUMO

Leite, Jhean Torres; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Outubro, 2022. Importância relativa de características morfofisiológicas para a seleção de linhagens de milho-pipoca em condição de seca. Orientador: Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Conselheiros: Alexandre Pio Viana e Eliemar Campostrini.

A busca por germoplasma produtivo e adaptado a condições adversas é uma ação importante para mitigar os efeitos nocivos das mudanças climáticas, traduzidos pelos eventos de seca no solo. Por isso, em um primeiro momento (Capítulo 1) objetivou-se identificar o potencial produtivo de 50 linhagens de milho-pipoca cultivadas em condição de campo, em duas safras (CS) (2020 e 2021) e sob condições hídricas (WC) contrastantes, com déficit hídrico (WS, referindo-se a *water stressed*) ($\psi_{\text{soil}} \geq -1.5$ MPa) e bem irrigada (WW, em atinência a *well watered*); num segundo momento (Capítulo 2) intencionou-se aquilatar a importância relativa de características radiculares e fisiológicas sobre o potencial produtivo de linhagens de milho-pipoca em condições contrastantes de disponibilidade hídrica, no intento de discriminar o mérito genético de tolerância à seca e, ou eficiência no uso da água. Para tal, independente da CS, a suspensão da irrigação ocorreu 15 dias antes da antese masculina. No Capítulo 1, realizou-se a análise de variância conjunta e individual, além da análise multivariada GGE *biplot*. De maneira geral, todas as características revelaram interações significativas para CS*WC, CS*genótipo (G), WC*G e CS*WC*G. Para CS, reduções expressivas (> 15%) entre as WCs (relação

entre WS e WW) foram observadas nos valores de massa de 100 grãos (100GW – 15,50%), capacidade de expansão (PE – 21,45%), rendimento de grãos (GY – 69,67%), volume de pipoca expandida por ha (EPV – 75,89%), número de fileira de grãos por espiga (RNE – 18,30%), altura de plantas (PH – 17,55%), e teor relativo de clorofila (SPAD – 49,11%) na CS 2020; e em PE (15,35%), GY (36,81%), EPV (45,70%), SPAD (56,34%), e índice de balanço de nitrogênio (NBI – 26,62%) na CS 2021. A alta plasticidade fenotípica, decorrente das interações significativas, fez com que os experimentos fossem analisados de forma individual, o que representa um desafio adicional para o melhorista de milho-pipoca, pois os programas de melhoramento devem ser individualizados para cada condição hídrica. Percebeu-se que as características SPAD, 100GW, GY, PE e número de grãos por espiga (GNE) apresentaram maior impacto para a seleção dos genótipos. Independente da WC e CS, de forma conjunta, as linhagens ideais foram L294 e L688 para PE; L691 e L480 para GY; e L291 e L292 para ambas as características. Os caracteres SPAD, 100GW e GNE poderão contribuir na seleção indireta, independente de WC e CS. Recomendam-se as linhagens L294, L691, L291 e L292 para a obtenção de híbridos produtivos e adaptados à seca. No Capítulo 2, resultante de dados colhidos no mesmo experimento do Capítulo 1, os caracteres agronômicos, morfológicos, fisiológicos e de arquitetura de raízes utilizados na análise de trilha foram suficientes para explicar as variações observadas em GY e PE, nas condições WW e WS, em ambas as CS. A seleção indireta via EH e via GNR promoverá incrementos em GY em ambas as WCs; já para PE, a seleção via EH e via GNE foi a que apresentou maiores ganhos em ambos os ambientes. A seleção indireta via EH se apresentou como uma alternativa viável e promissora para uso em programas de melhoramento genético com a cultura do milho-pipoca.

Palavras-chaves: Mudanças climáticas; raiz; fotossíntese.

ABSTRACT

Leite, Jhean Torres; D.Sc.; North Fluminense State University Darcy Ribeiro. October, 2022. Relative importance of morphophysiological characteristics for the selection of popcorn lines in drought conditions. Advisor: Antônio Teixeira do Amaral Junior. Co-advisors: Alexandre Pio Viana e Eliemar Campostrini.

The search for productive germplasm adapted to adverse conditions is an important action to mitigate the harmful effects of climate change, translated by drought events in the soil. Therefore, at first (Chapter 1) the objective was to identify the productive potential of 50 popcorn lines cultivated under field conditions, in two seasons (CS) (2020 and 2021) and under contrasting water conditions (WC), with water deficit (WS, referring to water stressed) ($\psi_{\text{soil}} \geq -1.5$ MPa) and well irrigated (WW, referring to well watered); in a second moment (Chapter 2) it was intended to evaluate the relative importance of root and physiological characteristics on the productive potential of popcorn lines in contrasting conditions of water availability, in the attempt to discriminate the genetic merit of drought tolerance and/or water use efficiency. For this purpose, regardless of CS, the suspension of irrigation occurred 15 days before male anthesis. In Chapter 1, joint and individual analysis of variance was performed, in addition to the multivariate GGE *biplot* analysis. Overall, all traits revealed significant interactions for CS*WC, CS*genotype (G), WC*G and CS*WC*G. For CS, expressive reductions (> 15%) between the WCs (ratio between WS and WW) were observed in the mass values of 100 grains (100GW – 15.50%), expansion capacity (PE – 21.45%), grain yield (GY – 69.67%),

volume of expanded popcorn per hectare (EPV – 75.89%), number of grain rows per ear (RNE – 18.30%), plant height (PH – 17.55%), and relative chlorophyll content (SPAD – 49.11%) in CS 2020; and in PE (15.35%), GY (36.81%), EPV (45.70%), SPAD (56.34%), and nitrogen balance index (NBI – 26.62%) in CS 2021. The high phenotypic plasticity, resulting from the significant interactions, meant that the experiments were analyzed individually, which represents an additional challenge for popcorn breeders, as breeding programs must be individualized for each water condition. It was noticed that the characteristics SPAD, 100GW, GY, PE and number of grains per ear (GNE) had a greater impact on the selection of genotypes. Regardless of WC and CS, jointly, the ideal strains were L294 and L688 for PE; L691 and L480 for GY; and L291 and L292 for both characteristics. The characters SPAD, 100GW and GNE may contribute to indirect selection, regardless of WC and CS. Lines L294, L691, L291 and L292 are recommended to obtain productive and drought-adapted hybrids. In Chapter 2, resulting from data collected in the same experiment as in Chapter 1, the agronomic, morphological, physiological and root architecture characters used in the path analysis were sufficient to explain the variations observed in GY and PE, under WW and WS conditions, in both CS. Indirect selection via EH and via GNR will promote increments in GY in both WCs; for PE, the selection via EH and via GNE was the one that presented the greatest gains in both environments. Indirect selection via EH was presented as a viable and promising alternative for use in genetic improvement programs with the popcorn crop.

Keywords: Climate changes; root; photosynthesis.

1. INTRODUÇÃO

O cenário atual para a produção de milho revela a grande dependência da cultura aos fatores climáticos, os quais afetam a produtividade das principais áreas agricultáveis do Brasil e do mundo (Kamphorst et al., 2018b; Hussain et al., 2019). As mudanças climáticas promovem grandes alterações nos ecossistemas naturais, caracterizadas pela atuação na relação planta-solo-atmosfera (Farooq et al., 2014). Essas alterações no clima, fundamentadas no aumento de temperatura e irregularidade de chuvas, além da queda de produção, promovem a modificação no zoneamento agroclimático (Cattivelli et al., 2008). A seca é o principal fator nessa relação, causando severa redução na produção de grãos na cultura do milho (Avramova et al., 2016).

A disponibilidade de água tornou-se um sério problema, ocorrendo em inúmeras regiões de clima tropical e subtropical (Durães et al., 2004; Zia et al., 2013; Adebayo et al., 2014). Nesse cenário, a maioria dos produtores não dispõe de capital suficiente para se adequar à demanda hídrica das culturas agrícolas, via irrigação. Portanto, o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a estresses abióticos e, ou eficientes no uso da água revela-se uma alternativa eficiente e importante, haja vista que 80% de todas as terras agricultáveis no mundo são dependentes da precipitação pluviométrica (Ali et al., 2017).

Sob déficit hídrico, as plantas sofrem inúmeras mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares (Ali et al., 2014, 2016; Farooq et al., 2014; Obata et al., 2015; Avramova et al., 2016; Hussain et al., 2019). Pode-se citar,

dentre elas, a redução do tamanho e da área foliar, a ocorrência de maturidade precoce e o fechamento estomático prolongado (Binott et al., 2017). O estresse hídrico, iniciado com limitação da água no solo, promove a diminuição da atividade da enzima nitrato redutase nas raízes, sinalizando o aumento na síntese de ácido abscísico (ABA) nas raízes e nas folhas, processo que culmina com o fechamento estomático, diminuição na assimilação de CO₂ e redução no crescimento celular (Taiz e Zeiger, 2015).

Para a avaliação de germoplasma visando à mitigação da tolerância ao déficit hídrico, consideram-se os principais caracteres agronômicos secundários associados ao estresse, a citar: menor intervalo entre florescimento masculino e feminino (Durães et al., 2004), sistema radicular profundo (Lynch, 2013), senescência tardia (maior índice *stay green*) (Zia et al., 2013), controle efetivo da condutância estomática e menor temperatura foliar do dossel (Araus, 2002; Cattivelli et al., 2008; Obata et al., 2015). A busca por genótipos de milho que apresentam características associadas a maior produção de grãos e tolerância ao déficit hídrico revela-se uma estratégia eficiente no melhoramento genético para ambientes com escassez hídrica (Hussain et al., 2019).

O milho-pipoca é uma cultura de grande importância econômica, dado seu alto valor agregado, sendo comercializado com preço superior ao milho comum (Santos et al., 2021). A pipoca é um alimento bastante nutritivo, apresentando elevados teores de antioxidantes, além de proteínas, fibras, vitaminas, açúcares e gorduras (Steve e Babatunde, 2013). O consumo da pipoca é crescente no país, sendo comercializada em diversos estabelecimentos, destinada exclusivamente ao consumo humano. O Brasil é o segundo maior produtor de milho-pipoca do mundo, com cerca de 300 mil toneladas de grãos produzidos por ano. O cultivo é concentrado na região da Chapada dos Parecis, oeste do Mato Grosso. No entanto, a produção nacional não é suficiente para atender o mercado interno, necessitando de importações, sobretudo dos Estados Unidos da América e da Argentina (Freitas et al., 2013).

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF – vem desenvolvendo um programa de melhoramento de milho-pipoca com diferentes vertentes, dentre as quais se inclui a adaptação de genótipos ao estresse hídrico (Kamphorst et al., 2018b). Essas atividades possuem parceria com a EMBRAPA/Sete Lagoas, com a Universidad de Talca (Chile) e com a Universitat

de Barcelona (Espanha). Para potencializar a perspectiva de resultados alvissareiros, a exploração da variabilidade genética é uma importante estratégia para transpor a necessidade de importações de grãos e pode promover o lançamento de cultivares mais adaptadas às diversas regiões do país (Oliveira et al., 2019). Nesse sentido, a UENF dispõe de uma das maiores coleções de genótipos de milho-pipoca da América Latina, com linhagens S₇ oriundas de países de clima temperado e tropical. Para além das linhagens produzidas na UENF, as demais foram cedidas pelos principais institutos de pesquisa da América, sobretudo o CYMMIT, localizado no México, mas que atua em diversos Continentes.

Diante do exposto, dividiu-se essa pesquisa em dois capítulos, obtidos de dados de experimentos realizados nas safras (CS) de 2020 e 2021, os quais tiveram por intentos principais: i) identificar linhagens de milho-pipoca com elevados níveis de tolerância ao déficit hídrico e eficiência no uso da água; e ii) estimar os efeitos diretos e indiretos de componentes morfoagronômicos, fisiológicos e arquitetônicos radiculares de linhagens de milho-pipoca para com rendimento de grãos e capacidade de expansão.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos do primeiro capítulo

- Avaliar características agronômicas, morfológicas e fisiológicas em linhagens de milho-pipoca sob dois ambientes hídricos distintos; e
- Identificar linhagens de milho-pipoca com elevados níveis de tolerância ao déficit hídrico e eficiência no uso da água.

2.2 Objetivos do segundo capítulo

- Determinar a importância relativa de características radiculares e imagens termais sobre o potencial produtivo de linhagens de milho-pipoca em condições contrastantes de disponibilidade hídrica discriminar o mérito genético de tolerância a seca e ou eficiência no uso da água;
- Estimar os efeitos diretos e indiretos de componentes morfoagronômicos, fisiológicos e arquitetônico-radiculares de linhagens de milho-pipoca, sobre rendimento de grãos e capacidade de expansão.

3. CAPÍTULOS

3.1 Análises multivariadas na seleção de genótipos de milho-pipoca eficientes no uso da água.

3.1.1 INTRODUÇÃO

A resiliência a ambientes com restrição de recursos naturais é uma importante característica para mitigar os efeitos nocivos das mudanças climáticas (Razzaq et al., 2021; Temesgen, 2021). Em decorrência do aumento da concentração de CO₂ e da temperatura, a escassez e irregularidade de chuvas representa o evento climático que mais afeta a agricultura (Snowdon et al., 2021). Os eventos de seca causam inúmeras perdas na agricultura mundial, podendo promover danos à produção de cereais em proporções superiores a 50% (Zhang et al., 2021). Na cultura do milho-pipoca, as situações extremas de falta d'água, podem causar danos que comprometem até 60% da produção de grãos (Kamphorst et al., 2021). Nesse sentido, a identificação de genótipos com alta produtividade e elevada capacidade adaptativa a ambientes adversos é um desafio para os melhoristas, fisiologistas, fitotecnistas e biotecnologistas que atuam com estresses abióticos (Zhang et al., 2020; Barbosa et al., 2021).

A principal forma de identificar as características secundárias associadas à adaptação a estresses abióticos e elevada produção, dá-se por meio da avaliação de germoplasma da cultura-alvo (Álvarez-Iglesias et al., 2018; Barbosa et al., 2021). O *screening* de recursos genéticos possibilita o desenvolvimento de cultivares com distintas expressões e desempenho superior em resposta à restrição hídrica (Santos et al., 2021). Nesse sentido, para a cultura do milho-pipoca, a integração de características secundárias relacionadas à produtividade de grãos e à capacidade de expansão aponta novos horizontes de possibilidades para o desenvolvimento de cultivares superiores (Kamphorst et al., 2020; Kamphorst et al., 2021; Leite et al., 2021). Em condição de déficit hídrico, as plantas estão submetidas a inúmeras mudanças morfofisiológicas, bioquímicas e moleculares, que ocorrem em diferentes níveis de intensidade (Avramova et al., 2016; Hussain et al., 2019). Em nível morfoagronômico, para avaliação de germoplasma visando à obtenção de maior rendimento de grãos (GY) sob déficit hídrico no solo, consideram-se como os principais caracteres secundários associados a GY, um menor intervalo entre florescimento masculino e feminino (Durães et al., 2004), um sistema radicular profundo (Lynch, 2013), uma senescência tardia das folhas (maior índice *stay green*) (Zia et al., 2013), um controle efetivo da condutância estomática/transpiração em associação com uma menor temperatura foliar do dossel (Obata et al., 2015), um incremento de prolificidade e um menor número ramificações do pendão (Kamphorst et al., 2021), bem como um maior diâmetro de colmo e uma maior taxa fotossintética líquida (Leite et al., 2021).

O milho-pipoca é uma cultura de grande importância econômica, considerando que esta espécie tem alto valor agregado, sendo comercializado com preço superior ao milho comum (Oliveira et al., 2019). A pipoca é um alimento proveniente da expansão do grão e é bastante nutritiva, possuindo elevados teores de moléculas antioxidantes, além de um adequado conteúdo de proteínas, fibras, vitaminas, açúcares e gorduras (Steve and Babatunde, 2013). O consumo da pipoca é crescente no Brasil, sendo comercializada em diversos estabelecimentos, destinada exclusivamente ao consumo humano. A produção nacional não é suficiente para atender o mercado interno, necessitando de importações, sobretudo dos Estados Unidos da América e da Argentina (Freitas et al., 2013; Cheim et al., 2021), além do que o cultivo do grão ocorre na segunda safra do ano, período de maior incidência de instabilidade hídrica (Faria Junior et al., 2020). Esse cenário,

associado às frequentes mudanças climáticas mundiais, impulsiona o desenvolvimento de cultivares de milho-pipoca mais produtivas e adaptadas à seca. Nesse contexto, objetivou-se avaliar características agrônômicas, morfológicas e fisiológicas em linhagens de milho-pipoca sob dois ambientes hídricos distintos e identificar linhagens com elevados níveis de tolerância ao déficit hídrico e eficiência no uso da água.

3.1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.2.1 Aspectos gerais da cultura

O milho-pipoca (*Zea mays* L. var. *Everta*) pertence à família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Maydeae, sendo uma espécie de crescimento herbáceo, anual e monoica (Doebley e Iltis, 2006). Apresenta menor porte, grãos menores, maior fragilidade em seus órgãos vegetativos, suscetibilidade a pragas e doenças, maior prolificidade e menor número de folhas, quando comparado ao milho comum (Sawazaki, 2001). Contudo, a principal característica que distingue os dois tipos de milho é a capacidade de expansão (CE) que ocorre com o milho-pipoca em condições específicas (Linares, 1987; Larish e Brewbaker, 1999).

O milho-pipoca tem como origem o Sul do México e a América Central, incluindo as Antilhas (Kistler et al., 2018). Utilizado pelos indígenas da América Central e do Norte (Flint-Garcia, 2017). Trata-se de uma cultura americana típica, que possui enorme valor cultural (Luz et al., 2005), tendo sido responsável pela aglutinação de indígenas na realização de festas e adoração religiosa (Blake, 2015); e, mais recentemente, nas salas de cinema (Gupta et al., 2016). Há duas teorias mais aceitas pelos historiadores sobre a origem do milho-pipoca. Uma delas o associa à genealogia do milho “flint” e a outra, que tenha surgido a partir do teosinte, sendo modificado pelo homem, ao longo dos anos, por seleção massal (Kantety et al., 1995; Heiser Jr, 1997; Matteucci et al., 2009; Kistler et al., 2018).

Segundo o MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), entende-se por milho-pipoca os grãos provenientes da espécie *Zea mays* L., com capacidade de estourar, transformando-se em pipoca, quando submetido à temperatura superior a 180°C. Essa propriedade intrínseca do milho-pipoca é

caracterizada pelo aumento de pressão interna que promove o extravasamento dos grânulos de amido em detrimento do pericarpo dos grãos, formando a “flor” da pipoca (Silva et al., 1993; Sawazaki, 2001).

A CE é um índice que relaciona o volume de pipoca estourada e a massa de grãos utilizada, expressa em mL.g⁻¹. O milho-pipoca pode ser classificado em três tipos (Tipo I, II e III), de acordo com a capacidade de expansão dos grãos e o nível de contaminação aceito pela legislação, que considera a porcentagem de grãos danificados (carunchados, avariados, ardidos, chochos ou imaturos, fermentados, germinados, gessados, mofados, trincados), contaminantes micro e macroscópicos, substâncias nocivas à saúde e organismos geneticamente modificados (Brasil, 2014).

O MAPA considera o valor mínimo de 30 mL g⁻¹ para a CE de uma amostra-padrão para comercialização de milho-pipoca. Altos índices de CE em milho-pipoca estão correlacionados com a qualidade do grão. O conhecimento do potencial do germoplasma, em relação à capacidade de expansão, auxilia a seleção prévia das plantas ou progênes com melhor qualidade da pipoca (Sawazaki, 2001). Dentre as características que afetam a CE, destacam-se a quantidade e distribuição do amido farináceo no endosperma, tamanho e formato dos grãos, tamanho da ponta do grão e do germe (Fantin et al., 1991; Sawazaki, 1995; Sawazaki, 2001). Alguns fatores podem interferir de forma a comprometer essa propriedade do milho-pipoca, a saber: a umidade presente nos grãos e o tipo de secagem, assim como danos sofridos no pericarpo e endosperma.

3.1.2.2 Cultura do milho frente ao estresse hídrico

Em diversas espécies vegetais, quando ocorre estresse por deficiência hídrica, observa-se a redução ou a paralisação da expansão celular, além da diminuição do alongamento celular (Costa et al., 2008). A resposta do milho ao estresse hídrico é iniciada com a sinalização das raízes mediante a falta de água no solo, promovendo o incremento do conteúdo de ácido abscísico nas raízes e folhas e alterando o balanço osmótico que regula as trocas gasosas (Santos et al., 1998; Taiz e Zeiger, 2015).

Sob estresse hídrico, as plantas sofrem alterações morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares, dentre elas, redução de tamanho e área foliar, maturidade precoce e fechamento estomático prolongado, o que leva à redução da

transpiração e do potencial produtivo, afetando a assimilação de CO₂ e a produtividade das plantas (Durães et al., 2004; Bergamaschi et al., 2006; Araus et al., 2012; Zia et al., 2013; Farooq et al., 2014; Binott et al., 2017).

A seca é o principal evento meteorológico responsável pela queda de produção na cultura do milho, apresentando período crítico que se estende da pré-floração ao início do enchimento dos grãos (Edmeades et al., 1995; Hussain et al., 2019). Nesses estádios, a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico é observada nos processos fisiológicos relacionados à formação do zigoto e fecundação de óvulos (Edmeades et al., 1995). Esse fenômeno ocorre no início do enchimento de grãos, no qual há elevada transpiração e, assim, ressecamento dos estilo-estigmas, o que resulta em aborto de óvulos e, ou de grãos de pólen (Farooq et al., 2014).

O milho é cultivado em clima tropical, subtropical e até mesmo temperado, quando se têm verões quentes (Huffman et al., 2018). Em regiões tropicais, verifica-se que 95% dos cultivos estão localizados em áreas sujeitas ao estresse por déficit hídrico, que causa queda de 10 a 50% na produção, em 80% da área cultivada (Edmeades et al., 1995; Pimentel, 1999; Fathi et al., 2016; Korres et al., 2016; Huffman et al., 2018).

O milho é considerado uma das culturas com maior demanda de água na agricultura atual, por sua extensa área de cultivo. Pode ser cultivado em regiões cuja precipitação varia de 300 a 5.000 mm anuais. Todavia, a quantidade de água média consumida por uma lavoura de milho está em torno de 600 mm, durante o ciclo completo da cultura. Essa necessidade de exploração dos recursos hídricos preocupa as principais instituições de pesquisa do mundo, dada a importância desse cereal para a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola (Durães e Magalhães, 2006).

Experimentos foram realizados para determinar os efeitos da seca sobre o rendimento de grãos e os componentes de rendimento em milho (Golbashy et al., 2010). Esses autores relataram que a produção de grãos diminuiu significativamente em condições de seca, cerca de 71%. A redução de produção reportada foi ocasionada pela diminuição no número de grãos por espiga e no número de espigas por planta. A diminuição no número de grãos produzidos, por unidade de área, também foi a causa de perda no rendimento de linhagens e híbridos, avaliados em condição de déficit hídrico, conforme explicado por Masuka et al. (2012).

Em estudos realizados na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Kamphorst et al. (2018), Lima et al. (2019) e Santos et al. (2021) relataram reduções para PE, nas magnitudes de 8,76%; 9,08% e 3,50%, respectivamente, entre as condições WW e WS. Em valores absolutos, isto significou redução no rendimento de grãos e na capacidade de expansão, de 1.408,95 Kg.ha⁻¹ e de 8,62 mL.g⁻¹, respectivamente (Kamphorst et al., 2018b), em valores totais que foram da ordem de 2.548,08 kg.ha⁻¹ e de 29,53 mL.g⁻¹, respectivamente.

3.1.2.3 Características agronômicas do milho relacionadas à maior produção de grãos em condições de déficit hídrico

Para muitos trabalhos de melhoramento visando à tolerância ao déficit hídrico, e por muitos anos, a principal característica avaliada é o menor intervalo entre os florescimentos masculino e feminino (Durães et al., 1998; Câmara et al., 2007). O evento de seca durante o período de florescimento prejudica a produção de pólen, promovendo a decréscimos na polinização, quando ocorre imediatamente antes e, ou durante esta etapa fenológica, o que pode causar grande prejuízo no rendimento de grãos (Bergamaschi et al., 2004; Câmara et al., 2007; Teixeira et al., 2010). A sincronia de florescimento masculino e feminino é uma propriedade relativamente simples de se avaliar em nível de campo e tem-se mostrado altamente correlacionada com rendimento de grãos sob estresse hídrico (Fischer et al., 1989; Xavier et al., 2003; Durães et al., 2004). Segundo Xavier et al. (2003), para se explorar todo o potencial produtivo de cultivares híbridos sob déficit hídrico, as linhagens genitoras devem apresentar máxima sincronia entre o florescimento masculino e o feminino.

A senescência foliar tardia (*stay green*), costuma ser uma característica avaliada no melhoramento de plantas frente a limitações abióticas (Araus et al., 2018). O genótipo *stay green* distingue-se dos demais por apresentar senescência prolongada em relação à média dos genótipos-padrão da mesma espécie (Andrade, 2012). No período pós-florescimento, a senescência foliar tardia contribui para um maior desenvolvimento dos grãos, devido ao acúmulo de assimilados no final do estágio de enchimento. Como resultado, observa-se maior número de grãos na espiga, com maior peso médio (Zaidi et al., 2004). Conforme alguns autores, cultivares *stay green* são as melhores opções para ambientes com estresse hídrico

e altas temperaturas (Joshi et al., 2007; Costa et al., 2008). A característica *stay green* também está associada a outras vantagens agronômicas, como por exemplo, à maior tolerância a pragas e doenças, à redução do percentual de plantas acamadas, à possibilidade de maior adensamento da cultura; e, está relacionada ao aumento da produtividade de grãos (Câmara et al., 2007; Costa et al., 2008).

A prolificidade ou número de espigas por planta é uma característica secundária que apresenta alta correlação genética com rendimento médio de grãos, tanto em condições normais de cultivo (Lima Neto e Souza Jr, 2009), quanto sob condições de estresse (Li et al., 2003). Alguns estudos têm demonstrado que sob condições de limitação hídrica, a herdabilidade para essa característica tem se mantido constante ou, até mesmo aumentada, diferentemente do ocorrido para rendimento médio de grãos, como por exemplo, constatado por Edmeades et al. (1999). Dessa forma, comumente em programas de melhoramento para tolerância à deficiência hídrica, selecionam-se plantas com maior número de espigas, ou seja, as mais prolíficas.

Outras características secundárias utilizadas em programas de melhoramento visando à tolerância ao estresse hídrico são comprimento de pendão e números de ramificações dessa estrutura (Câmara et al., 2007). Essa característica morfológica, em dimensões elevadas, tende a reduzir o rendimento médio de grãos devido à diminuição na interceptação de luz solar pelas plantas e pelo aumento da competição por fotoassimilados pelas diferentes estruturas da planta (Edmeades et al., 1999). Além disso, essas estruturas tendem a apresentar correlação genética significativa e negativa para com produtividade de grãos, ou seja, o maior número de ramificações de pendão afeta negativamente a produtividade média de grãos (Sababin, 2008). A redução do tamanho do pendão pode ser empregada no processo de melhoramento da cultura, uma vez que a quantidade de pólen, levemente reduzida, não é um fator limitante para produção de grãos para a cultura (Câmara et al., 2006).

Na caracterização de genótipos sob déficit hídrico são mensurados outros importantes atributos, a saber: enrolamento e ângulo foliar (Edmeades et al., 1995). Em condições de déficit hídrico selecionam-se plantas que apresentam folhas pouco ou não enroladas e com menor ângulo em relação ao colmo (Durães et al., 2004). De acordo com os mesmos autores, esses caracteres foliares apresentam correlação média a baixa para com rendimento de grãos. Outros mecanismos,

como maior relação entre raiz e parte aérea, ajuste osmótico, dentre outros, conferem maiores níveis de tolerância ao déficit hídrico (Durães et al., 2004).

3.1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.3.1 Genótipos

Cinquenta linhagens de milho-pipoca do Banco de Germoplasma da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF foram utilizadas nesta pesquisa. A genealogia dessas linhagens deriva-se de genótipos oriundos de países da América Latina, com adaptação climática temperada ou tropical (Santos et al., 2021), conforme descrição na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição de genótipos de milho-pipoca e informações quanto à geração, país de origem, procedência e adaptação climática

Genótipos	Pedigree	Origem	Instituição doadora	Adaptação climática
L217	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L381	SAM	EUA	EUA	Temperada
L326	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L502	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L292	URUG 298	Uruguai	CIMMYT	Temperada
L503	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L76	Viçosa-Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L291	URUG 298	Uruguai	CIMMYT	Temperada
L273	PARA 172	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L328	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L61	BRS Angela	Brasil	EMBRAPA	Tropical
L625	PA 091	Brasil	UEM	Tropical
L688	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L213	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L322	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L481	SE 013	Brasil	UEM	Tropical
L477	SE 013	Brasil	UEM	Tropical
L684	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L509	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada

Tabela 1 – Cont.

Genótipos	Pedigree	Origem	Instituição doadora	Adaptação climática
L501	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L358	PR 023	Brasil	UEM	Tropical
L476	SE 013	Brasil	UEM	Tropical
L472	SE 013	Brasil	UEM	Tropical
L221	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L204	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L386	SAM	EUA	EUA	Temperada
L222	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L691	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L594	RS 20	Brasil	IPAGRO / AGROESTE	Temperada
L655	ARZM 13 050	Argentina	CIMMYT	Temperada
L391	SAM	EUA	EUA	Temperada
L332	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L325	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L507	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L263	PARA 172	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L219	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical
L366	PR 023	Brasil	UEM	Tropical
L394	SAM	EUA	EUA	Temperada
L383	SAM	EUA	EUA	Temperada
L382	SAM	EUA	EUA	Temperada
L330	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L652	ARZM 13 050	Argentina	CIMMYT	Temperada
L693	UENF 14	Brasil	UENF	Tropical
L510	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L321	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L324	UFV M-2 Barão de Viçosa	Brasil	UFV	Tropical
L513	PA 170 Roxo	Paraguai	CIMMYT	Temperada
L294	URUG 298	Uruguai	CIMMYT	Temperada
L384	SAM	EUA	EUA	Temperada
L220	IAC 125	Brasil	IAC	Tropical

USA – Estados Unidos da América; UFV – Universidade Federal de Viçosa; EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; IAC – Instituto Agrônomo de Campinas; CIMMYT – Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo; UEM – Universidade Estadual de Maringá; IPAGRO – Instituto de pesquisas Agrônomicas; e UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

3.1.3.2 Condições experimentais

Nas safras (CS) de 2020 e 2021, no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo (21° 34' 31" de latitude sul e 41° 54' 40" de longitude), em Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil, as linhagens foram cultivadas sob duas condições hídricas contrastantes, sendo a condição bem irrigada (WW, “*Well-Watered*”) contendo irrigação recomendada para a cultura, e a condição de estresse hídrico (WS, do inglês “*Water-Stressed*”) em que suspendeu-se a irrigação das plantas a partir de 15 dias antes da antese masculina, perdurando até a maturação fisiológica dos grãos (colheita). A data da antese masculina foi determinada com base em experimentos anteriores (Kamphorst et al., 2021; Leite et al., 2021).

O local possui uma estação meteorológica automática que registrou as variáveis micrometeorológicas, as quais estão mostradas na Figura 1. Durante o período de experimentação, a média de temperatura foi de 21,77°C e 21,26°C, a umidade relativa média foi de 76,85% e 77,27%, e a radiação fotossinteticamente ativa foi de 1240,07 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 1415,80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as CS de 2020 e 2021, respectivamente (Figura 1).

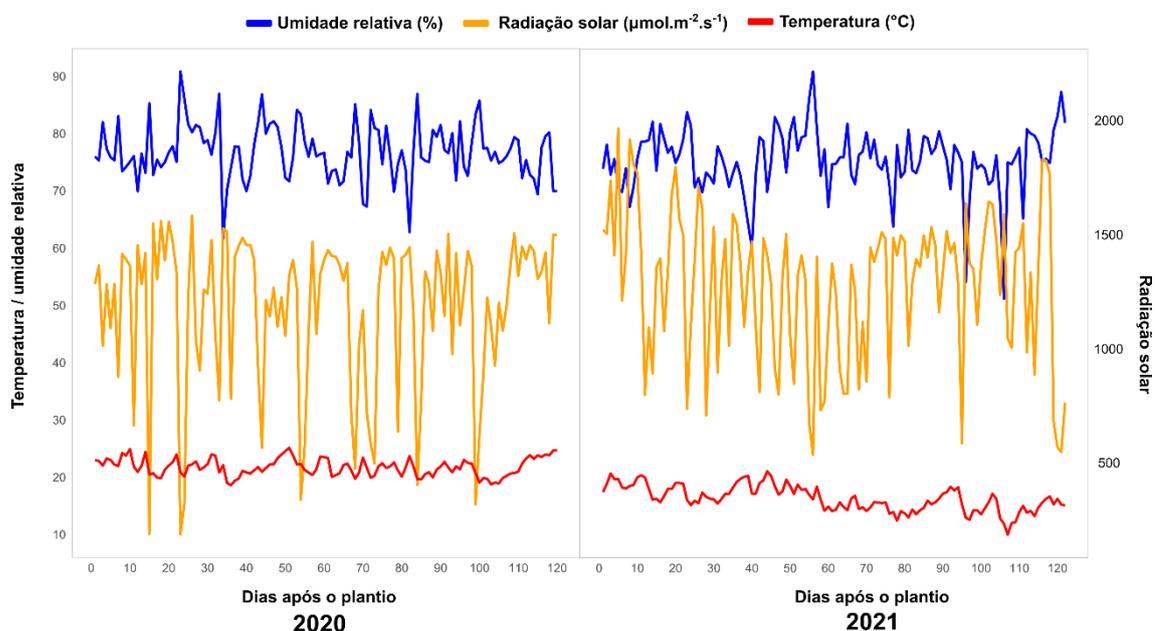


Figura 1. Condições ambientais (umidade relativa, radiação fotossinteticamente ativa e temperatura média) observadas em experimentos com 50 linhagens de milho-pipoca cultivadas nas safras de 2020 e 2021.

O delineamento experimental foi blocos casualizados com três repetições. Cada unidade experimental foi composta por uma fileira de 4,40 m de comprimento, espaçadas de 0,20 m entre plantas e 0,80 m entre linhas, totalizando 23 plantas por parcela. Na área experimental foi implantado um sistema de irrigação por gotejamento, dispondo um gotejador por planta, o que promoveu um maior controle da quantidade de água aplicada. Na CS de 2020, um total de 157,68 mm (WW) e 87,48 mm (WS) de água foram aplicados via irrigação, isto é, uma redução de 44,5% na comparação entre condições hídricas, e na CS de 2021 disponibilizou-se 132,93 mm (WW) e 78,92 mm (WS), uma redução de 50% na comparação entre WW e WS (Figura 2). A precipitação incidente foi monitorada, somando um total de 119,20 mm na CS 2020 e de 170,20 mm na CS 2021 (Figura 2).

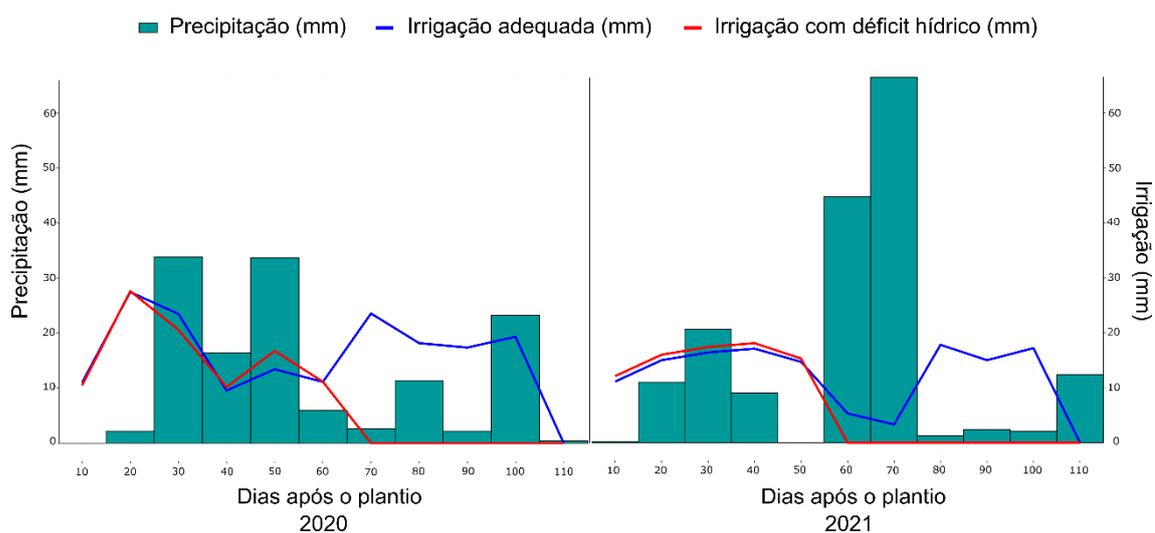


Figura 2. Quantidade de água aplicada (mm), nas safras de 2020 e 2021, em relação aos dias após a semeadura de linhagens de milho-pipoca. WW (condição de irrigação) e WS (condição de estresse hídrico). A linha vermelha se refere à condição WS e a linha azul se refere à condição WW.

Durante a execução dos experimentos, o potencial hídrico do solo foi monitorado por meio de sensores Decagon MPS-6 (Decagon, EUA), os quais foram instalados entre duas plantas localizadas na linha de plantio e a uma profundidade de 0,20 m. Na condição WW, as plantas receberam irrigação plena e o solo ficou próximo à capacidade de campo do solo (-0,01 MPa). Na condição WS, e na CS 2020, o solo atingiu o ponto de murcha permanente (-1,5 MPa) aos 63 dias após a semeadura (DAS) (estádio de formação dos grãos). Na CS 2021, o solo atingiu a

maior tensão de água (-1,5 MPa) aos 100 DAS (estádio de enchimento de grãos) (Figura 3).

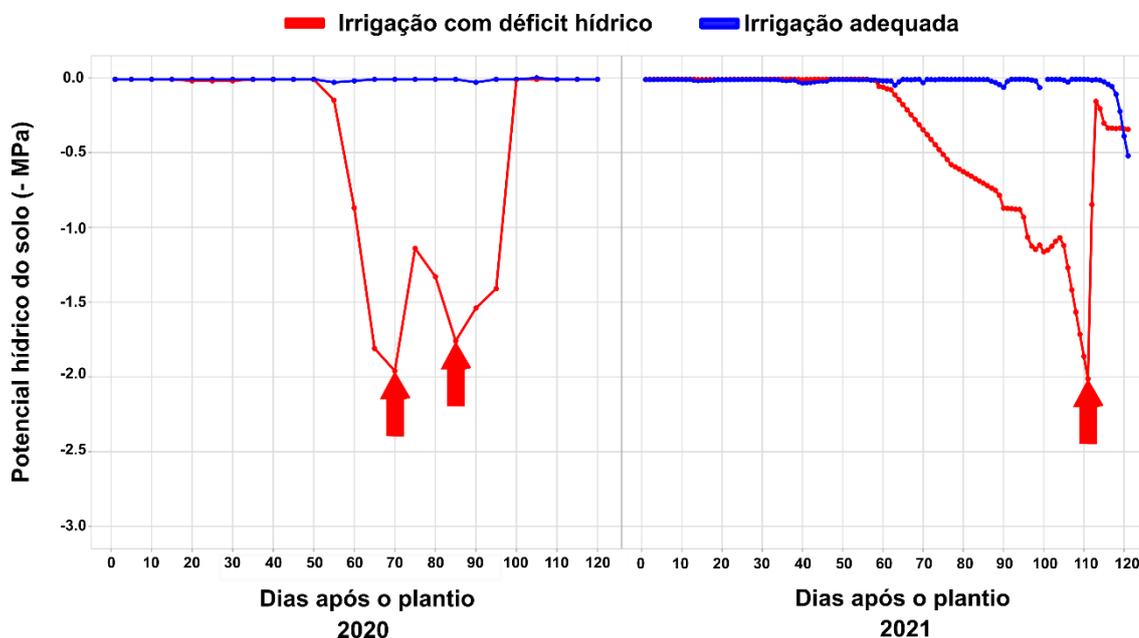


Figura 3. Potencial hídrico do solo durante o cultivo das linhagens de milho-pipoca, em condições hídricas contrastantes (WS e WW) nas safras de 2020 e 2021.

Independente de safra (CS) e condição hídrica (WC), as adubações de base e cobertura foram realizadas de acordo com o resultado das análises físico-químicas do solo (Apêndices 1 e 2), disponibilizando-se 30 kg ha⁻¹ N (ureia), 60 kg ha⁻¹ P₂O₅ (superfosfato triplo) e 60 kg ha⁻¹ K₂O (cloreto de potássio). Numa segunda adubação de cobertura, ocorrida 30 DAS, disponibilizaram-se 100 kg ha⁻¹ N (ureia). Em adição, houve o controle de plantas daninhas, pragas e doenças, conforme a necessidade da cultura.

3.1.3.3 Características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular avaliadas

As características avaliadas foram divididas em três grupos, respectivamente, as agronômicas, as fisiológicas e as morfológicas do sistema radicular. As características agronômicas avaliadas, foram: altura média de planta (PH), altura média de espiga (EH), diâmetro médio de colmo (SD), comprimento médio de espiga (EL), diâmetro médio de espiga (ED), número médio de grãos por

fileira (GNR), número médio de fileiras por espiga (RNE), número total de grãos por espiga (GNE), massa média de 100 grãos (100GW), rendimento de grãos (GY), capacidade de expansão (PE), e volume de pipoca expandida por ha (EPV). PH e EH foram mensuradas após o pendoamento, sendo que PH foi avaliada a partir do solo até a folha bandeira, e para a variável EH, a medida foi feita até a inserção da espiga principal. O diâmetro médio do colmo (SD) foi quantificado logo abaixo da espiga principal, com o auxílio de um paquímetro digital (Paquímetro Digital Aço Inox 150mm Mtx). RNE e GNR foram estimadas por meio de contagem. PH, EH, SD, RNE e GNR foram estimadas em uma amostra de dez plantas, e as espigas destas plantas foram colhidas aleatoriamente. A variável 100GW foi quantificada por meio de duas amostras de cem grãos da parcela, após as espigas serem debulhadas. A produtividade de grãos (GY) foi obtida após a debulha das espigas de cada parcela, as quais foram corrigidas para 13% de umidade (kg ha^{-1}). A capacidade de expansão (PE) foi estimada pela massa de 30 g de grãos irradiada em microondas (1.000 W) em um saco de papel tipo kraft por 2 min, sendo o volume de pipoca quantificado em uma proveta de 2.000 mL; a razão do volume estourado dividido por 30 g determinou a PE, a qual é expressa em mL g^{-1} . EPV foi obtida pela multiplicação de GY e PE ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

As características fisiológicas avaliadas foram: intensidade de cor verde das folhas (estimativa do teor relativo de clorofilas, índice SPAD), teor relativo de antocianinas (ANT) e flavonoides (FLA), índice de balanço de nitrogênio (NBI) e fluorescência da clorofila (F_v/F_m). As avaliações foram realizadas no período de enchimento dos grãos, 40 dias após o florescimento masculino, em dez plantas por parcela, no terço médio da folha imediatamente acima da espiga principal. Para avaliar ANT, FLA e NBI utilizou-se o equipamento DUALEX (DUALEX® SCIENTIFIC – USA). O SPAD-502-Plus (Konica Minolta® - USA) foi utilizado para estimar o leaf 'greenness' (SPAD index). A emissão da fluorescência da clorofila (F_v/F_m) foi mensurada com o auxílio de um fluorímetro não-modulado digital de mão Pocket PEA (Hansatech Instruments Ltd. USA). Essa última característica foi avaliada após a adaptação ao escuro da área a ser amostrada por 15 min.

As características radiculares foram mensuradas conforme metodologia proposta por Trachsel et al. (2011), com modificações (Kamphorst et al., 2018). Independente da WC, o sistema radicular de duas plantas por parcela foi removido em cilindros de solo de 25 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade. As

características radiculares mensuradas foram o número de raízes de suporte (NBR), o número de raízes da coroa (NCR), ambos estimados por meio de contagem; a densidade de raízes de suporte (DBR), a densidade das raízes da coroa (DCR), obtidas por meio de escala proposta por Trachsel et al. (2011); o ângulo de raízes de suporte (ABR) e o ângulo das raízes da coroa (ACR), os quais foram aferidos com o auxílio de transferidor de graus e expressos em graus (°) em relação à superfície do solo (Trachsel et al., 2011).

3.1.3.4 Análises estatísticas

3.1.3.4.1 Análise de variância

A análise conjunta das safras (C_S) foi fundamentada no modelo estatístico: $Y_{ijkp} = \mu + (B/W_C)/C_S)_{jkp} + G_i + (W_C)_k + (C_S)_p + (GW_C)_{ik} + (GC_S)_{ip} + (W_C C_S)_{kp} + (GW_C C_S)_{ikp} + \varepsilon_{ijkp}$, em que: Y_{ijkp} = valor observado para a variável em estudo referente à j-ésima repetição da combinação do i-ésimo nível do fator Genótipo com o k-ésimo nível do fator Condição hídrica, com o p-ésimo nível do fator Safra; μ = média geral; $(B/W_S)/C_S)_{jkp}$ = efeito de bloco; G_i = efeito do i-ésimo nível do fator Genótipo no valor observado Y_{ijkp} ; $(W_C)_k$ = efeito do k-ésimo nível do fator Condição hídrica no valor observado Y_{ijkp} ; $(C_S)_p$ = efeito do p-ésimo nível do fator Safra no valor observado Y_{ijkp} ; $(GW_C)_{ik}$ = efeito da interação do i-ésimo nível do fator Genótipo com o k-ésimo nível do fator do fator Condição hídrica; $(GC_S)_{ip}$ = efeito da interação do i-ésimo nível do fator Genótipo com o p-ésimo nível do fator Safra; $(W_C C_S)_{kp}$ = efeito da interação do k-ésimo nível do fator Condição hídrica com o p-ésimo nível do fator Safra; $(GW_C C_S)_{ikp}$ = efeito da interação do i-ésimo nível do fator Genótipo com o k-ésimo nível do fator Condição hídrica com o p-ésimo nível do fator Safra; e ε_{ijkp} = erro associado à observação Y_{ijkp} , assumindo NID $(0, \sigma^2)$.

A análise individual foi baseada no modelo estatístico: $Y_{ij} = \mu + B_j + G_i + \varepsilon_{ij}$, em que: Y_{ij} = valor observado para a variável em estudo referente à j-ésima repetição da combinação do i-ésimo nível do fator Genótipo; μ = média geral; B_j = efeito da j-ésima repetição; G_i = efeito do i-ésimo nível do fator Genótipo no valor observado; e ε_{ij} = erro experimental associado à observação Y_{ij} , assumindo NID $(0, \sigma^2)$.

3.1.3.4.2 Análises multivariadas

As análises multivariadas “which won where/what” (formação de grupos de características e genótipos em destaque para cada grupo), “means vs. stability”

(relação entre a média geral das características, genótipos acima e a baixo da média, estabilidade de cada genótipo em relação a todas as características), “discriminateness vs. representativeness” (capacidades de discriminar o potencial de um grupo de genótipos e a representatividade das características dentro do grupo de variáveis) e “ranking genotypes” (Indicação de melhores genótipos, considerando as médias das características) foram realizadas considerando o modelo *biplot* genótipo por característica (GT), utilizando os valores padronizados das variáveis estritamente associadas aos componentes de produção, isto é, 100GW, PE, GY, RNE, GNR, GNE, ED, e EL. Para gerar o gráfico *biplot* GT no software R foi usado o pacote *GGEbiplotGUI*.

3.1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.4.1 Análise de variância, estimativas de médias e impacto da limitação hídrica nas características morfoagronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular

Na análise conjunta, somente as características número de raízes de suporte (NBR) e densidade de raízes de suporte (DBR) não expressaram diferença significativa em 5% de probabilidade (Tabela 2). Para a fonte de variação condições hídricas (WC), excetuando-se ângulo de raízes de suporte (ABR) e densidade de raízes da coroa (DCR), todas as demais características apresentaram elevada significância ($p \leq 0,01$). Para a fonte de variação Genótipo (G) todas as características apresentaram diferença significativa ($p \leq 0,01$). Todas as interações duplas, quais sejam, CS*WC, CS*G e WC*G, apresentaram significância ($p \leq 0,01$), exceto para as características NBR e DBR com relação à interação CS*WC (Tabela 1). Todas as características avaliadas tiveram interação CS*WC*G significativa (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância conjunta e individual, das estimativas das médias e dos desvios-padrão associados a características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular de linhagens de milho-pipoca, sob diferentes condições hídricas (WS e WW) e safras (2020 e 2021)

Características	Anova conjunta							WS		WW	
	C	W	G	CS*W	CS*	WC*	CS*WC*G	2020	2021	2020	2021
Agronômicos	100GW (g)	***	***	***	***	***	***	9,22 ± 1,39	9,15 ± 1,25	10,91 ± 1,60	10,00 ± 1,56
	PE (g.ml ⁻¹)	***	***	***	***	***	***	17,44 ± 3,90	18,76 ± 3,18	22,20 ± 3,87	22,16 ± 3,47
	GY (kg.ha ⁻¹)	***	***	***	***	***	***	461,02 ±	812,08 ±	1519,64 ±	1285,05 ±
	EPV (m ³ .ha ⁻¹)	***	***	***	***	***	***	8,07 ± 3,91	15,34 ± 6,47	33,46 ± 11,63	28,25 ± 9,62
	RNE (unid.)	***	***	***	***	***	***	18,71 ± 2,86	22,54 ± 4,23	22,90 ± 3,21	22,79 ± 3,01
	GNR (unid.)	**	***	***	***	***	***	11,64 ± 1,34	11,79 ± 1,30	13,11 ± 1,07	12,61 ± 1,22
	GNE (unid.)	**	***	***	***	***	***	220,07 ± 40,78	270,77 ± 70,05	299,63 ± 45,02	288,98 ± 54,43
	ED (mm)	***	***	***	**	***	***	25,18 ± 2,07	26,07 ± 2,13	27,79 ± 1,79	27,85 ± 2,37
	EL (cm)	***	***	***	***	***	***	9,72 ± 1,51	12,08 ± 1,39	10,96 ± 1,34	12,63 ± 1,33
	EH (cm)	***	***	***	***	***	***	81,08 ± 12,24	90,31 ± 11,52	90,90 ± 13,55	93,84 ± 10,08
	PH (cm)	***	***	***	***	***	***	128,94 ± 14,80	155,00 ± 16,68	156,38 ± 14,05	160,07 ± 15,47
	SD (mm)	***	***	***	***	***	***	12,91 ± 0,96	12,80 ± 1,43	12,28 ± 0,89	14,37 ± 1,33
Fisiológicas	SPAD	***	***	***	***	***	***	15,14 ± 6,35	14,17 ± 4,06	29,75 ± 5,60	32,45 ± 5,54
	ANT	***	***	***	***	***	***	0,27 ± 0,03	0,16 ± 0,03	0,23 ± 0,03	0,07 ± 0,03
	FLA	***	***	***	***	***	***	1,23 ± 0,12	1,10 ± 0,15	1,22 ± 0,11	0,95 ± 0,14
	NBI	***	***	***	***	***	***	20,14 ± 3,79	31,37 ± 6,06	20,12 ± 4,00	42,75 ± 9,13
	F _v /F _m	***	***	***	*	***	***	0,73 ± 0,03	0,67 ± 0,05	0,76 ± 0,03	0,68 ± 0,04
Sistema radicular	ABR (°)	***	ns	***	***	***	***	35,80 ± 5,92	42,52 ± 7,16	33,53 ± 4,96	46,37 ± 7,53
	ACR (°)	***	**	***	***	***	***	41,91 ± 6,64	44,61 ± 8,29	41,36 ± 7,15	47,41 ± 6,59
	NBR (unid.)	ns	***	***	ns	***	***	10,84 ± 2,30	10,76 ± 1,76	11,83 ± 2,20	12,06 ± 2,24
	NCR (unid.)	***	***	***	*	***	***	16,24 ± 3,62	20,73 ± 3,56	16,82 ± 5,01	22,59 ± 4,57
	DBR	ns	***	***	ns	***	***	5,48 ± 0,89	5,31 ± 1,08	5,54 ± 0,90	5,81 ± 1,24
	DCR	***	ns	***	***	***	***	5,39 ± 0,73	4,72 ± 0,96	4,90 ± 0,90	4,99 ± 1,31

WS – Déficit hídrico; WW – Bem irrigado; CS – Safra; WC – Condição hídrica; G – Genótipo; EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; SPAD – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; F_v/F_m – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; e DCR – Densidade de raízes da coroa. ***, ** e * indica diferença significativa em nível de 0.01%, 1% e 5% pelo teste F, respectivamente; ns: ausência de diferença significativa pelo o teste F em 5% de probabilidade.

Observou-se variabilidade genética entre todas as linhagens para as características avaliadas, constatando ainda a eficiência da suspensão hídrica no período de pré-antese masculina para diferenciar as WCs. A suspensão da irrigação 10 a 15 dias antes do florescimento masculino é amplamente adotada por melhoristas de milho em todo o mundo (Araus et al., 2010; Romano et al., 2011; Cairns et al., 2012; Zia et al., 2013; Aldebayo et al., 2014; Kamphorst et al., 2019, 2020; Leite et al., 2021). O uso desse procedimento permite aferir de forma fidedigna a resposta adaptativa das plantas frente à condição de seca, que pode ser mensurada, sobretudo, por meio do potencial produtivo (Romano et al., 2011; Cairns et al., 2012).

Em decorrência do efeito significativo de CS e WC e de interações significativas para com genótipo (G), espera-se uma resposta diferencial das linhagens de milho-pipoca avaliadas. No processo de seleção de plantas, as interações dessa natureza interferem na recomendação de cultivares para ambientes específicos, bem como para os ganhos de seleção (Hallauer et al., 2010). Em relação à presença de significância para as interações G*CS, G*WC e G*CS*WC pode-se inferir que, para essas características, a seleção em condições irrigadas ou com déficit hídrico poderá ser efetiva na obtenção de ganhos genéticos simultâneos em ambas as CS e WCs. Por essa razão os experimentos foram analisados de forma individual, assim, o efeito de genótipo (G) foi efetivamente mensurado nas duas CSs e WCs.

Na CS 2020 (redução de 24,5% na disponibilidade de água por irrigação), diminuições expressivas (> 15%) foram observadas entre as WCs, dada a comparação entre as médias expressas em WS em relação à WW, com base nos valores das características 100GW (15,50%), PE (21,45%), GY (59,98%), EPV (65,89%), RNE (18,30%), PH (17,55%) e SPAD (49,11%) (Figura 4). Na CS 2021 as características PE (15,35%), GY (36,81%), EPV (45,70%), SPAD (56,34%) e NBI (26,62%) apresentaram maiores reduções (> 15%) (Figura 4). As características ANT e FLV apresentaram aumento na condição WS em relação à WW nas magnitudes de 16,60% e 0,50% na CS 2020; e de 37,57% e 15,79%, na CS 2021, respectivamente (Figura 4).

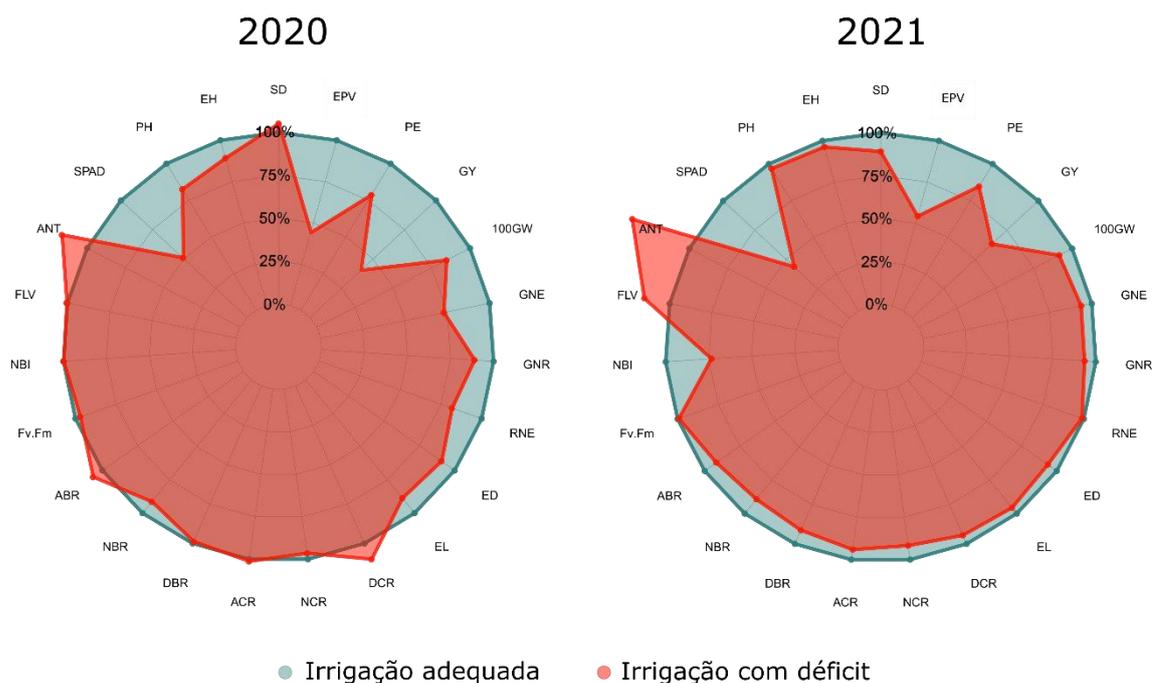


Figura 4. Redução percentual entre médias das características avaliadas nas diferentes condições hídricas – Irrigação adequada (azul) e Irrigação com déficit hídrico (vermelho) – nas safras (CS) de 2020 e 2021. EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; SPAD – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; F_v/F_m – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa.

Reduções em menores expressões (< 15%) foram observadas na CS 2020 para as características agrônômicas GNR (11,22%), ED (9,40%), EL (11,32%) e EH (10,81%); e em RNE (1,10%), GNR (6,51%), ED (6,40%), EL (4,36%), EH (3,77%), PH (3,17%); e em SD (10,93%) na CS 2021 (redução de 18% na disponibilidade de água no solo por irrigação) (Figura 4). Por outro lado, observou-se leve acréscimo nas percentagens das características SD (5,14%) e NBI (0,08%) na CS 2020, e em F_v/F_m (1,48%) na CS 2021 (Figura 4).

As características radiculares tiveram reduções pouco expressivas (< 15%) para NBR (8,37%), NCR (3,45%) e DBR (1,09%) na CS 2020; e para ABR (8,31%), ACR (5,91%), NBR (10,78%), NCR (8,24%), DBR (8,61%) e DCR (5,42%) na CS 2021 (Figura 4). Destaca-se o aumento no valor das características ABR (6,78%),

ACR (1,33%) e DCR (10,00%) na CS 2020, dada a comparação de WS em relação à WW (Figura 4).

Independente da CS, a característica EPV foi a mais afetada pela limitação hídrica. EPV trata-se de uma característica que contempla GY e PE, portanto, o somatório desses efeitos reduziu drasticamente a expressão de EPV. As reduções nos percentuais de GY de 59,98% em CS 2020 e de 36,81% em CS 2021 ocorreram, sobretudo, devido ao impacto do estresse hídrico nos componentes relacionados ao número de grãos por espigas (GNE) na primeira CS, e à massa dos grãos (GW100) na segunda CS, que são características relacionadas ao principal componente de rendimento de grãos, no caso, GY. Em CS 2020, o ponto de murcha permanente ocorreu mais cedo, isto é, próximo do estágio fenológico, impactando no número de grãos produzidos, ao passo que na CS 2021 o evento de ponto de murcha ocorreu mais tarde – na fase de enchimento de grãos – o que favorece compreender o impacto mais avantajado para essa época de cultivo na massa dos grãos, pois estes já haviam sido formados. A viabilidade polínica e a formação do zigoto são processos fisiológicos sensíveis à limitação hídrica do solo (Zinselmeier et al., 1995), o que diminui o número de grãos produzidos. Esse efeito pode ter ocorrido na CS 2020, em que a sequela do déficit hídrico adveio mais precocemente e mais intensamente do que na CS 2021, ou seja, em estágio anterior à antese e, por conseguinte provocando maior impacto sobre GY na CS 2020. Por sua vez, na CS 2021, cujo efeito de WS ocorreu mais tardiamente e de forma menos intensa, o principal efeito negativo do déficit hídrico foi percebido em 100GW, que impactou em menor grau GY, uma vez que os outros componentes de rendimento, que são formados mais precocemente, foram menos afetados.

A capacidade de expansão (PE), a principal característica de qualidade para o comércio de milho-pipoca (Parsons et al., 2020), apresentou-se expressivamente afetada pela imposição do déficit hídrico (decréscimo de 21,45% em 2020 e de 15,35% na CS de 2021). O processo de expansão está associado à presença da umidade contida nos grânulos de amido do grão, que quando aquecidos ($\approx 180^{\circ}\text{C}$), exercem pressão sobre o pericarpo, cujo rompimento expõe o endosperma (Virost et al., 2015; Ponomarenko, 2015; Coan et al., 2019; Freire et al., 2020). Neste sentido, a falta de água durante a formação do grão pode afetar as propriedades físico-químicas,

interferindo na capacidade de expansão dos grãos. Mesmo assim, ainda não foram registradas características morfológicas ou químicas que possam explicar esse fenômeno. Em pesquisas com milho-pipoca realizadas por Kamphorst et al. (2018), Lima et al. (2019) e Santos et al. (2021), é possível observar reduções inferiores para PE, nas magnitudes de 8,76%; 9,08% e 3,50%, respectivamente, entre as condições WW e WS, embora no penúltimo experimento tenham sido avaliados linhagens e híbridos, e no último, variedades de polinização aberta. No entanto, é necessário analisar isso com cautela, uma vez que Kamphorst et al. (2020) identificaram uma perda média de 29,19% para PE entre as condições WW e WS em linhagens de milho-pipoca, embora no presente trabalho, em que também se avaliaram linhagens, essa redução tenha sido menos proeminente, com magnitude de 21,45% em 2020 e de 15,35% em 2021.

O período de imposição do déficit hídrico, isto é, em pré-antese pode estar relacionado à baixa redução na PH (3,17%), EH (3,77%) e SD (10,93%). As plantas próximas ao estágio de pré-florescimento encontram-se no final do crescimento vegetativo, sendo que neste estágio as características relacionadas ao crescimento são menos afetadas pelas condições hídricas limitantes (Sah et al., 2020; Benchikh-Lehocine et al., 2021). Nesse sentido, o crescimento teria maiores decréscimos se aplicado em plantas nos estádios V6 a V8, como o apresentado por Ali et al. (2016b) e Rufino et al. (2018), em que as reduções para PH foram mais expressivas, com magnitudes de 20% e 30%, respectivamente.

As reduções expressivas observadas no SPAD index, em ambas as CS de cultivo, podem ser devido ao fechamento estomático, em associação com elevada radiação solar, o que, conseqüentemente, induz à formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), o que está associado à degradação das moléculas de clorofilas (Anjum et al., 2017; Li et al., 2021). Esse processo de formação de ROS pode promover a inibição da concentração e atividade das enzimas RUBISCO e PEPcase (Ali et al., 2014). Nesse sentido, em ambas as CSs, com a aplicação do déficit hídrico, observaram-se acréscimos expressivos nos teores estiados de FLV e ANT, o que pode estar associado à proteção da maquinaria fotossintética contra o excesso da radiação solar em condições de reduzidas condutâncias estomáticas (Qin et al., 2021). A síntese de FLV e ANT está associada à proteção do aparato

fotossintético dos danos causados por espécies reativas de oxigênio (ROS) (Saadallah et al., 2022), portanto, a produção desses pigmentos acessórios está associada à mitigação dos efeitos nocivos da seca em associação com a elevada radiação solar. Apesar do aumento na síntese destes pigmentos acessórios, o índice de balanço de nitrogênio (NBI), o qual relaciona o teor relativo de clorofila com o teor de flavonoides, foi menos afetado entre as WCs. No entanto, para NBI, as reduções mais expressivas foram observadas em 2021, o que pode estar associado à menor intensidade do estresse hídrico imposto na CS 2021. Nesta CS, para uma mesma redução na concentração de clorofilas estimada pelo SPAD index, quando comparada à CS 2020, a concentração de FLV foi maior, o que se explica pelo fato de que quando se divide o teor de clorofilas pelo teor de FLV a relação se torna reduzida, como mostrado na Figura 4.

As reduções pouco expressivas observadas na avaliação de fluorescência das clorofilas (F_v/F_m) mostram que mesmo sob severa limitação hídrica, isto é, em momentos em que o solo atingiu valores abaixo do ponto de murcha permanente (Figura 3), a maquinaria fotoquímica das plantas de milho-pipoca foi pouco comprometida. De fato, alguns autores relatam certa tolerância do PSII à limitação hídrica na planta (Havaux, 1992; Marler and Mickelbart, 1998; Ruas et al., 2022). Houve notórias diferenças entre as CS para o estimador F_v/F_m ; em 2020, os valores estimados se mantiveram próximos de 0,75, mesmo com uma maior intensidade de limitação hídrica do solo (25,4%), quando comparados à CS de 2021, em que a limitação hídrica do solo foi de 18%. Neste CS de 2021, mesmo com limitação hídrica menor, os valores da relação F_v/F_m foi maior, possivelmente possa ser devido a algum comprometimento na absorção de N, já que a limitação por N pode reduzir a fluorescência das clorofilas.

As características ângulo de raízes de suporte (ABR) e coroa (ACR) e densidade das raízes de suporte (DBR) e coroa (DCR) estão associadas com a formação da arquitetura radicular em extensão lateral e horizontal, citadas por autores como características-chave para o ideótipo radicular, isto é, fenótipos com sistemas radiculares mais íngremes e profundos (Trachsel et al., 2011; Hauck et al., 2015; Lynch, 2013, 2015). Os acréscimos observados em ABR e ACR, quando comparadas as condições WW e WS, são explicados pela baixa disponibilidade

hídrica na condição WS, situação na qual as plantas desenvolvem sistemas radiculares mais íngremes, isto é, os maiores ângulos de crescimento em relação à superfície do solo estão relacionados às raízes com maior capacidade de atingir as camadas subsuperficiais do solo, para tornar tais plantas mais tolerantes à redução da precipitação pluviométrica (Comas et al., 2013; Klein et al., 2020). Os autores Gao e Lynch, (2016) e Kamphorst et al. (2018), avaliando genótipos de milho e milho-pipoca, respectivamente, sob condição de seca, relataram acréscimos de 17,05% e de 23,71% para ACR, associando essa elevação da magnitude desta característica aos genótipos mais adaptados à condição de seca (Uga et al., 2013; Kamphorst et al., 2020).

O aumento de DRB e DCR para a condição WS em relação a WW, em 2020, pode estar associado a uma maior presença de raízes secundárias, o que garante maior superfície para absorção de água em situação de limitação hídrica do solo (Calleja-Cabrera et al., 2020). Os fenótipos radiculares com menor número e maior tamanho de células corticais reduzem o custo metabólico para a exploração de camadas mais profundas do solo (Gao e Lynch, 2016; Kamphorst et al., 2018). As raízes da coroa são responsáveis pela aquisição de boa parte da água e nutrientes minerais durante a fase vegetativa e são de grande importância durante a fase reprodutiva, momento em que o estresse hídrico é mais crítico (Liu et al., 2019). As reduções em NBR (10,78%), NCR (8,24%), sobretudo na CS 2021, sugere um menor gasto metabólico para a formação do sistema radicular (Leite et al., 2021). Tal redução pode estar associada à menor limitação hídrica do solo na CS 2021 (18%), quando comparada à maior limitação hídrica ocorrida no ano 2020 (25,40%). Esse fato denota uma adaptação radicular das linhagens à condição de seca, na qual observa-se a formação de um sistema mais profundo e com menores extensões laterais para os genótipos mais promissores (Liu et al., 2019).

3.1.4.2 Análise multivariada – GT *biplot*

Os dois componentes principais explicaram valores superiores a 60%, independente de CS e WC (Figura 5). Em WS, nas CSs 2020 e 2021, os valores foram de 63,73% e 60,98%, respectivamente; e em WW, nas CS 2020 e 2021, foram de 66,70% e 68,96%, nesta ordem (Figura 5).

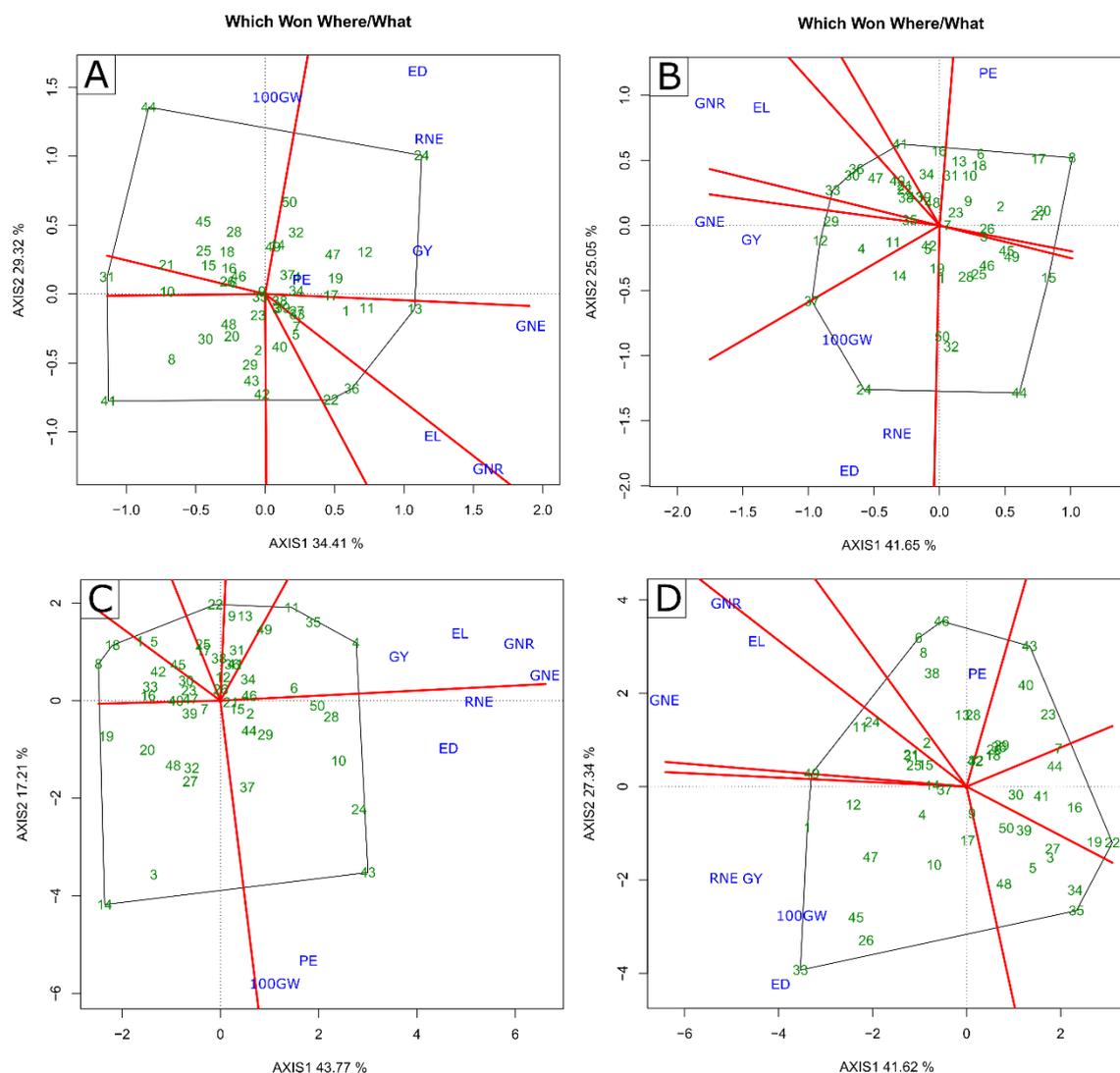


Figura 5. Gráfico *biplot* “which-won-what” para condição de déficit hídrico (WS) (A e C) e condição com irrigação adequada (WW) (B e D) nas safras de 2020 (A e B) e 2021 (C e D). GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; RNE – Número de fileiras por espiga; GNR – Número de grãos por fileira; ED – Diâmetro de espigas; EL – Comprimento de espigas; (-) sinal que indica valores negativos.

Independente de WC, na CS 2020, no espaço gráfico “which-won-what” foram formados quatro grupos diferentes (Figuras 5A e 5B). Na condição WS, o primeiro grupo incluiu apenas 100GW, formado entre as linhas vermelhas perpendiculares, em que se destacou a linhagem L652 (44), localizada no vértice do polígono entre as linhas vermelhas perpendiculares (Figura 5A); o segundo grupo foi formado por GY, PE, RNE e ED, no qual a linhagem L381 (24) foi o destaque; o terceiro grupo foi formado apenas por GNE, sobressaindo-se a linhagem L294 (13); finalmente, o quarto grupo foi formado por EL e GNR, no qual

destacaram-se as linhagens L358 (22) e L502 (36) (Figura 5A). Na condição WW, o primeiro grupo foi formado por PE, com destaque para L222 (8); o segundo foi constituído por 100GW, RNE e ED, com destaque para a linhagem L381 (24); o terceiro foi formado por GNE e GY, com destaque para as linhagens L292 (12) e L503 (37), que apresentaram altos valores; e o quarto e último grupo reuniu as características GNR e EL, com destaque para as linhagens L430 (33) e L502 (36) (Figura 5B).

Na CS 2021, foram formados dois grupos diferentes para a condição WS e três para a condição WW (Figuras 5C e 5D). Na condição WS, o primeiro grupo incluiu GY, EL, GNR e GNE e permitiu destacar as linhagens L291 (11) e L217 (4); já o segundo grupo foi formado por RNE, ED, PE e 100GW, com destaque para a linhagem L625 (43) (Figura 5C). Na condição WW, o primeiro grupo foi formado por PE, com destaque para as linhagens L684 (46) e L220 (6); o segundo grupo reuniu as características GY, 100GW, ED e RNE, com destaque para a linhagem L480 (33); por fim, o terceiro grupo constituiu-se por GNE, EL e GNR, com destaque para L510 (40) (Figura 5D).

Na análise do *biplot* "Mean vs. stability", na condição WS, 24 e 23 linhagens tiveram médias superiores à média geral; ao passo que 26 e 27 linhagens expressaram valores abaixo da média geral, respectivamente nas CS 2020 e 2021 (Figuras 6A e 6C). Na CS 2020, somente a linhagem L294 (13) foi considerada ideal, tendo alto desempenho em relação à média geral das características e maior estabilidade, com base na longa projeção da linha tracejada e localização do genótipo próximo à seta com círculo concêntrico no gráfico (Figura 6A). Porém, as linhagens L381 (24), L292 (12) e L291 (11), embora não tenham se destacado como as mais próximas do ideal, apresentaram considerável estabilidade na condição WS, dada a proximidade gráfica do genótipo para com o círculo concêntrico e a extensão da linha tracejada (Figura 6A). Na CS 2021 nenhuma linhagem foi considerada ideal, no entanto L381 (24) e L625 (43) sobressaíram-se como as mais próximas do ideótipo, com considerável estabilidade em condição WS (Figura 6-C).

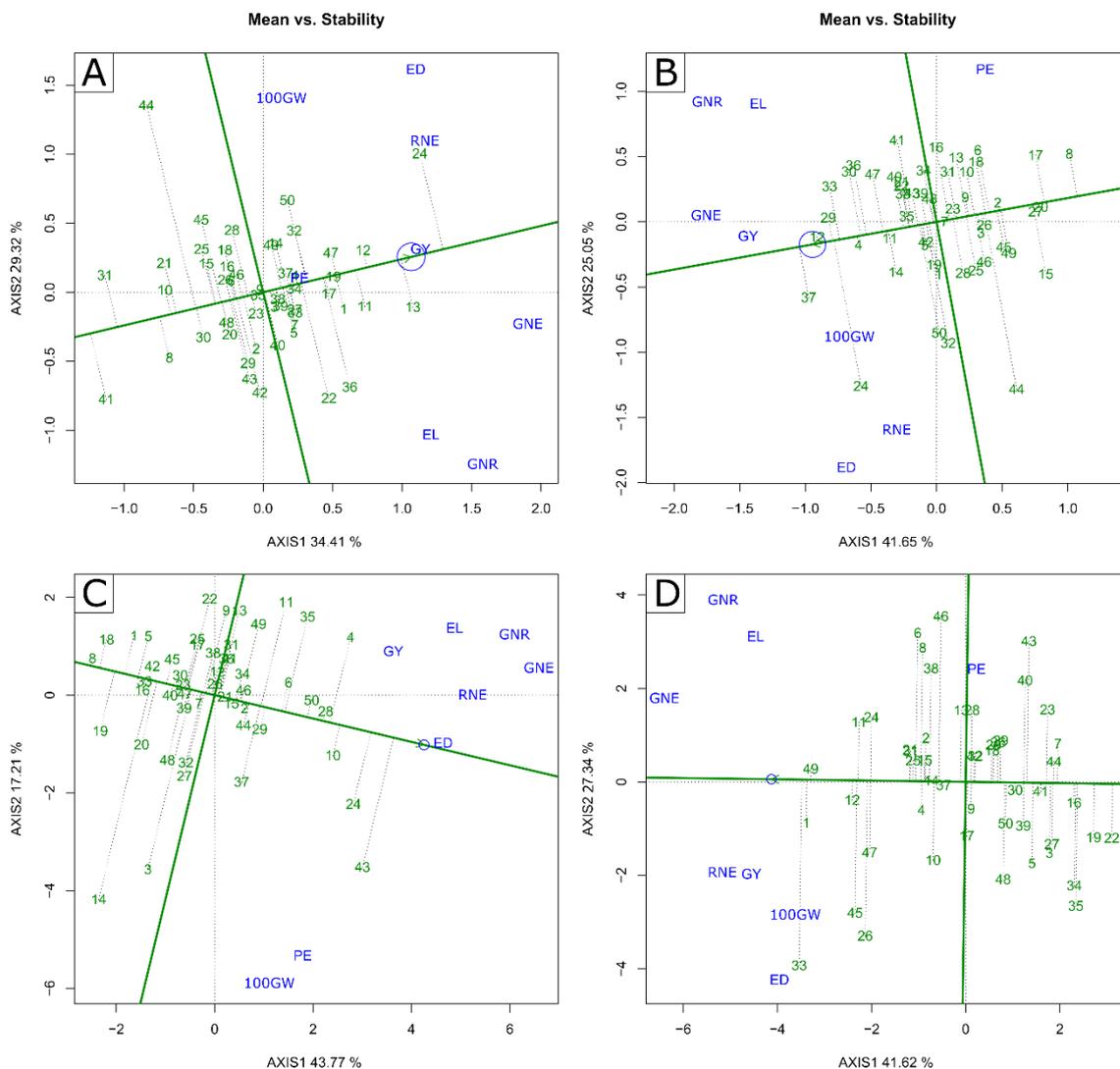


Figura 6. Gráfico *biplot* “Mean vs. Stability” para condição de déficit hídrico (WS) (A e C) e condição com irrigação adequada (WW) (B e D) nas safras de 2020 (A e B) e 2021 (C e D). GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; RNE – Número de fileiras por espiga; GNR – Número de grãos por fileira; ED – Diâmetro de espigas; EL – Comprimento de espigas; (-) sinal que indica valores negativos.

Na condição WW, em CS 2020, as linhagens L292 (12) e L503 (37) foram consideradas ideais, apresentando alto desempenho em relação à média geral das características e considerável estabilidade (Figura 6B). As linhagens L381 (24), L391 (29) e L480 (33), apesar de não apresentarem médias ideais, destacaram-se com boa estabilidade e elevadas médias para as características avaliadas (Figura 6B). Na CS 2021, nenhuma linhagem foi considerada ideal, entretanto L480 (33), L203 (1), L691 (49) e L292 (12) apresentaram-se com boa estabilidade e médias

com valores de magnitudes representativas para as características avaliadas (Figura 6D).

Na análise “Discriminateness vs. representativeness”, para a CS 2020 e na condição WS (Figura 7A), a característica PE apresentou baixa capacidade discriminatória. No entanto, deteve alta representatividade, tendo em vista seu menor ângulo em relação ao eixo com a seta e círculo concêntrico (Figura 7A). Destaca-se a variável GY, que expressou alta capacidade discriminatória e boa representatividade, decorrente da projeção extensa da linha tracejada e do reduzido ângulo em relação ao eixo que contém o círculo concêntrico (Figura 7A). As características 100GW, EL, GNR e ED tiveram alta capacidade discriminatória, no entanto, baixa capacidade representativa. As características RNE e GNE apresentaram alta capacidade discriminatória e mediana capacidade representativa (Figura 7A). Na CS 2021, as características PE e 100GW apresentaram as maiores capacidades discriminatórias, no entanto, baixa representatividade (Figura 7C). Destaca-se ED, que apresentou a maior capacidade representativa com elevada capacidade discriminatória. RNE apresentou capacidades discriminatórias e representativas medianas. As demais características – GY, EL, GNR e GNE – apresentaram altas capacidades discriminatórias e medianas capacidades representativas (Figura 7C).

Na condição WW e na CS 2020, as características GY e GNE apresentaram as maiores capacidades representativas e discriminatórias. As características ED, RNE, PE, EL e GNR apresentaram alta capacidade representativa, no entanto, baixa capacidade discriminatória. A característica 100GW apresentou medianas capacidades discriminatórias e representativas (Figura 7B). Na CS 2021, as características GY, GNE e RNE apresentaram as maiores capacidades representativas aliadas a altas capacidades representativas (Figura 7D). As demais características – ED, 100GW, PE, EL e GNR – apresentaram altas capacidades discriminatórias, no entanto, baixas capacidades representativas (Figura 7D).

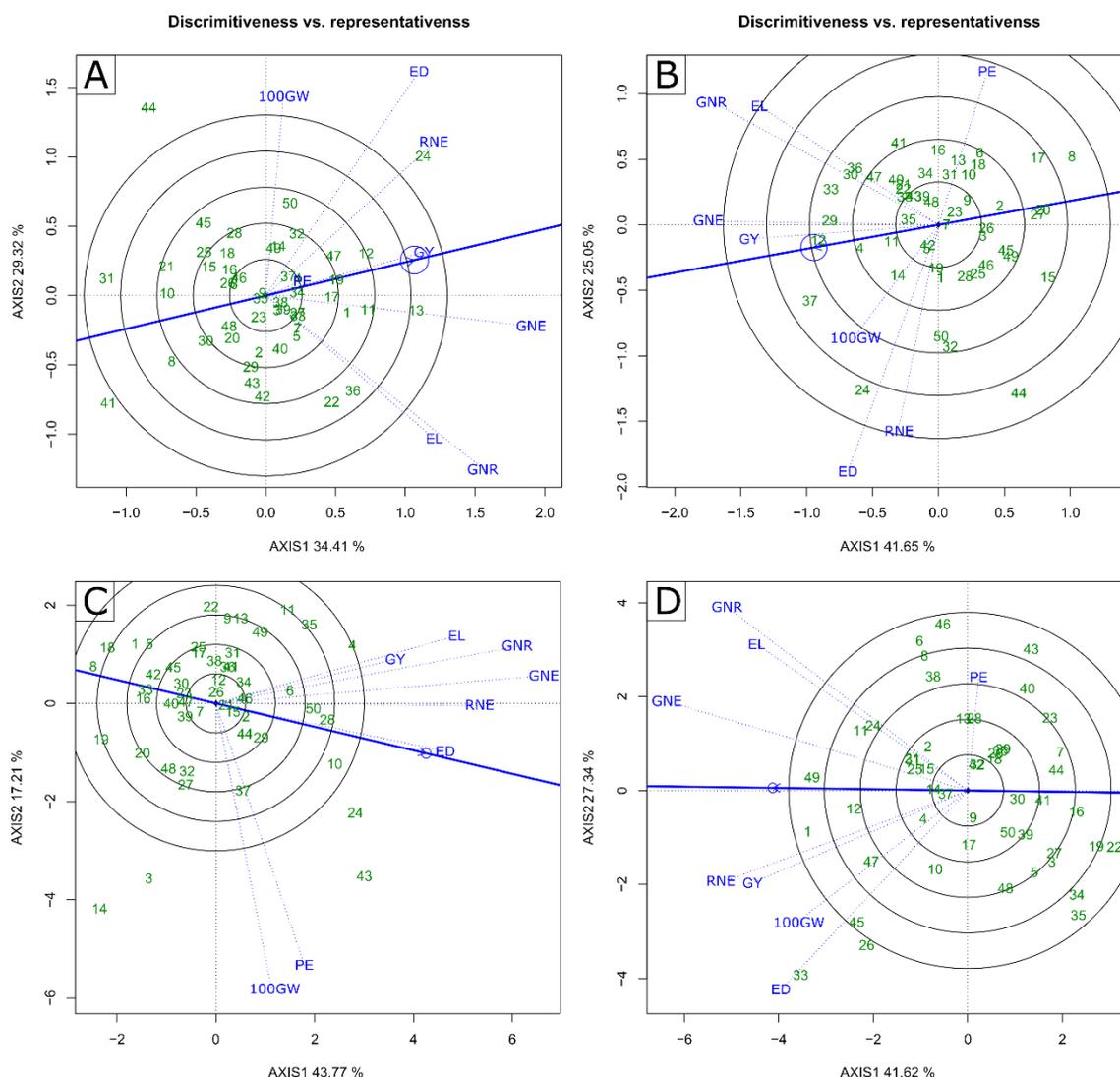


Figura 7. Gráfico *biplot* “Discrimitiveness vs. representativens” para condição de déficit hídrico (WS) (A e C) e condição com irrigação adequada (WW) (B e D) nas safras de 2020 (A e B) e 2021 (C e D). GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; RNE – Número de fileiras por espiga; GNR – Número de grãos por fileira; ED – Diâmetro de espigas; EL – Comprimento de espigas; (-) sinal que indica valores negativos.

Para a CS 2020, o gráfico “Ranking Genotypes” na condição WS discriminou as linhagens L294 (13), L292 (12), L291 (11), L381 (24), L328 (19) e L688 (47) (Figura 8A) como as ideais, isto é, aquelas com maior rendimento e estabilidade, por se localizarem mais próximas do círculo concêntrico no gráfico (Figura 8). Na condição WW, os destaques ocorreram para L292 (12), L391 (29) e L503 (37), respectivamente (Figura 8B). Em 2021, na condição WS, as linhagens consideradas ideais foram L273 (10), L386 (28), L381 (24), L693 (50) e L217 (4),

nessa ordem (Figura 8C); e na condição WW foram, hierarquicamente, L691 (49), L203 (1), L292 (12), L291 (11), L381 (24) e L688 (47) (Figura 8D).

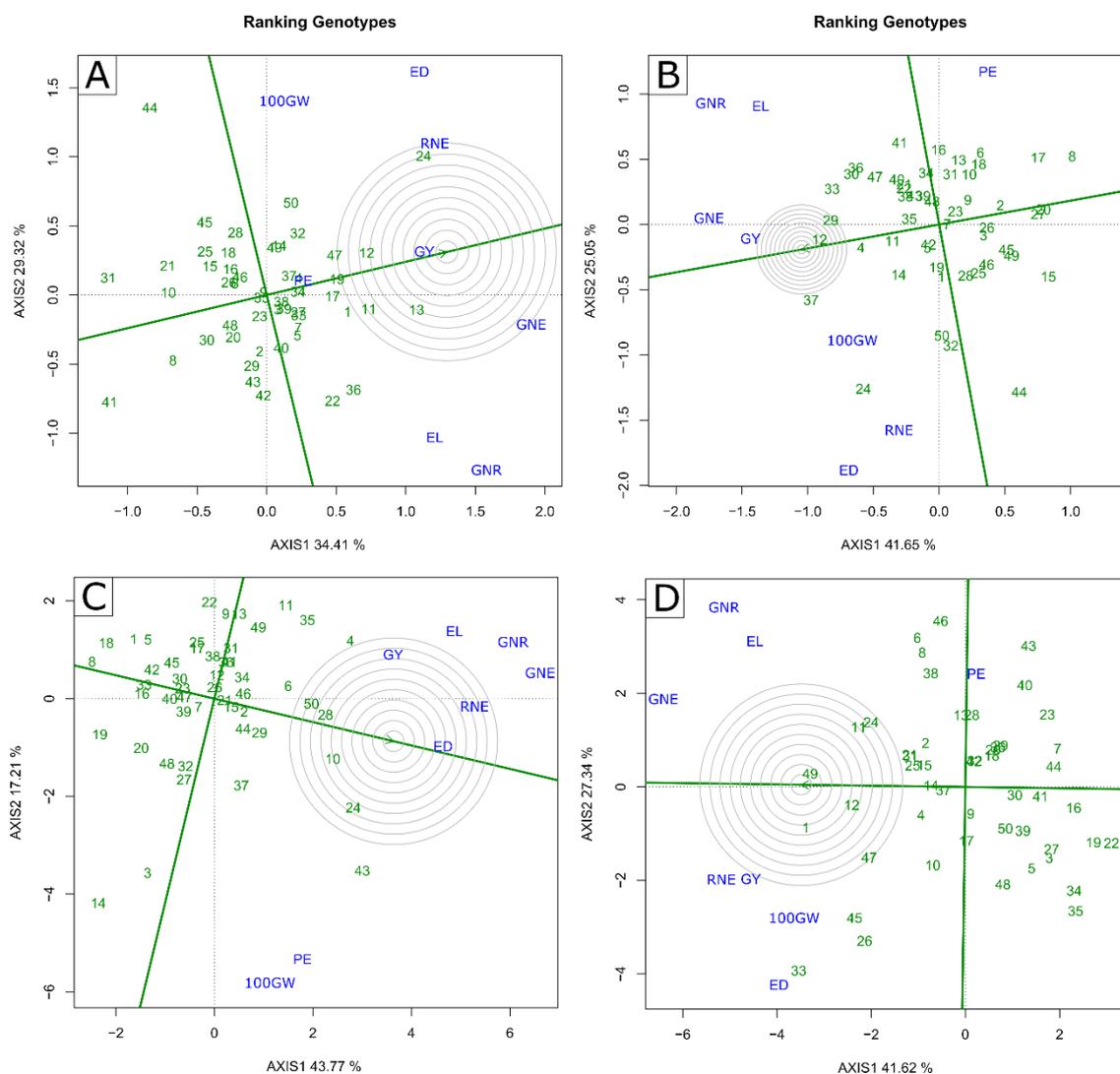


Figura 8. Gráfico *biplot* “Ranking Genotypes” para condição de déficit hídrico (WS) (A e C) e condição com irrigação adequada (WW) (B e D) nas safras de 2020 (A e B) e 2021 (C e D). GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; RNE – Número de fileiras por espiga; GNR – Número de grãos por fileira; ED – Diâmetro de espigas; EL – Comprimento de espigas; (-) sinal que indica valores negativos.

A análise multivariada (GT *biplot*) foi implementada apenas com os componentes de produção, estes, que por via de regra, estão correlacionados com GY (Kamphorst et al., 2020). As características selecionadas, além de serem

altamente correlacionadas com GY, mostram uma resposta efetiva para a caracterização de linhagens na condição de seca (Kamphorst et al., 2020).

A superioridade genotípica de L381, L292, L291, L688 e L321 em ambas as CS e WC, sobretudo para GY e PE, incentiva a implementação de programas de melhoramento visando à obtenção de genótipos superiores de milho-pipoca para adaptação a ambientes com baixa disponibilidade hídrica. Este grupo de linhagens pode ser utilizado como genitores, pois se destacaram para características de elevado interesse para a resiliência genotípica em condições de limitação hídrica, especificamente por suas maiores estimativas de médias para PE, GY, 100GW e GNE, simultaneamente. Os programas de melhoramento procuram trabalhar a seleção reunindo os genótipos mais estáveis com aqueles mais produtivos; assim L217 e L381 seriam ideais para serem utilizadas em combinação híbrida na condição WS, uma vez que, considerando o cenário de limitação hídrica já presente, o qual vem se incrementando, essas linhagens expressaram resposta mais estável para as características avaliadas. Tal resposta foi diferente da linhagem L292, que mesmo sendo considerada a de maior rendimento, não demonstrou expressiva estabilidade. Independente da CS, comparando as duas WC, nota-se que a linhagem L291 manteve boa estabilidade fenotípica sob WS.

Para a capacidade de expansão (PE), a utilização das linhagens L294, L688, L204 e L220 para a formação de híbridos é de fundamental importância, pois L294 e L688 possuem as maiores expressões fenotípicas para essa característica. Em adição, a linhagem L688 foi considerada ideal para a condição de irrigação plena para características relacionadas ao rendimento de grãos. Oportuno destacar que poder-se-ia haver uma discriminação negativa de L294, devido ao seu expressivo nível de instabilidade, tanto na condição WS quanto em WW; todavia, este fato não produziu maiores adversidades, uma vez que a expansão dos grãos é a característica a ser mais explorada de L294, a qual não foi tão afetada pelas mudanças ambientais, quando comparada às características relacionadas ao rendimento de grãos.

Em programas de melhoramento, a capacidade discriminatória e representativa de uma característica é extremamente importante, uma vez que é possível eleger características-chave para realizar uma seleção mais rápida, além da possibilidade de obter ganhos em outras características por seleção indireta (Dao et al., 2017; Mason et al., 2019). Nesse sentido, para ambas as WC e CS, as características PH, GNE e GY demonstraram ter um potencial para maior discriminação e representatividade, o que favorece a seleção de linhagens com

características de alto interesse para adaptação à condição de déficit hídrico do solo. O rendimento de grãos é altamente influenciado pela altura de plantas (PH), pelo teor relativo de clorofila (SPAD index) e pelo número de grãos por espiga (GNE) e, com base nesses resultados, a alta capacidade de discriminação dessas características indica que a seleção de genótipos com base nestas características resultará em aumentos em GY (Gazal et al., 2018; Fadhli et al., 2020). Como contribuições para o melhoramento visando à seleção de linhagens de milho-pipoca, destacam-se os caracteres GY, PE, 100GW e GNE, os quais podem ser utilizados em cruzamentos híbridos tanto para a formação de cultivares produtivas e adaptadas à condição de seca, quanto para compor grupos heteróticos para implementação de seleção recorrente intra ou interpopulacional, bem como para a reciclagem de linhagens visando à constituição de populações ainda mais superiores quanto a adaptação à seca.

3.1.5 CONCLUSÕES

A alta plasticidade fenotípica das linhagens, dada as interações significativas, fez com que os experimentos fossem analisados de forma individual, o que representa um desafio adicional para o melhorista de milho-pipoca, pois os programas de melhoramento devem ser individualizados para cada condição hídrica.

As características SPAD index, 100GW, GY, PE e GNE tiveram maior impacto para a seleção dos genótipos. Independente da WC e da CS, de forma conjunta, as linhagens ideais foram L294 e L688 para PE; L691 e L480 para GY; e L291 e L292 para ambas as características. Os caracteres SPAD index, 100GW e GNE poderão auxiliar na seleção indireta, independente de WC e da CS.

Como contribuições para o melhoramento de milho-pipoca, recomendam-se as linhagens L294, L691, L291 e L292 para a obtenção de híbridos ou formação de grupos heteróticos visando à implementação de seleção recorrente intra ou interpopulacional para a geração de genótipos superiores com adaptação à limitação hídrica do solo.

3.2 Análise de trilha como método para a discriminação de características-suporte na seleção indireta de genótipos de milho-pipoca tolerantes à seca

3.2.1 INTRODUÇÃO

Os extremos de temperatura e concentração de gases do efeito estufa revelam o potencial nocivo das mudanças climáticas sobre o desenvolvimento dos vegetais (Wang et al., 2019). Além disso, a irregularidade e escassez de chuvas, causadas, sobretudo, pelos fatores climáticos citados, promovem diversos danos à agricultura (Chávez-Arias et al., 2021). Na cultura do milho, as perdas causadas pela seca, em níveis ostensivos, podem comprometer mais de 50% da produção de grãos (Leite et al., 2021; Kamphorst et al., 2021a).

O milho-pipoca é uma cultura de grande importância econômica, dado seu alto valor agregado, sendo comercializado com preço até três vezes maior do que o milho comum (Leite et al., 2021; Viana et al., 2022). A pipoca é um alimento bastante nutritivo, apresentando elevados teores de antioxidantes, além de proteínas, fibras, vitaminas, açúcares e gorduras (Steve e Babatunde, 2013; Oliveira et al., 2019). O consumo da pipoca é crescente no país, sendo comercializada em diversos estabelecimentos, destinada exclusivamente ao consumo humano.

A principal forma de encontrar características associadas à adaptação a estresses bióticos e abióticos é por meio da imersão no germoplasma da cultura-

alvo (Wang et al., 2013; Álvarez-Iglesias et al., 2018; Barbosa et al., 2021). A exploração dos recursos genéticos vegetais mostra-se uma alternativa para além da adaptação climática, demonstrando enorme potencial para aclimação de plantas a eventos como a seca (Chen et al., 2012; Liu et al., 2019; Hussain et al., 2019). Nesse contexto, a busca por uma base genética mais ampla, composta por genótipos de diferentes localidades e adaptações climáticas possibilita o desenvolvimento de cultivares com respostas sobrelevantes à restrição hídrica (Santos et al., 2021). Além disso, para a cultura do milho-pipoca, a integração dessas características adaptativas à produtividade de grãos e à capacidade de expansão, gera novos horizontes de possibilidades para o trabalho com a cultura (Kamphorst et al., 2020b, 2021a; Santos et al., 2021; Leite et al., 2021, 2022).

No que tange às características secundárias, análises para correlação entre traços e seleção indireta são amplamente utilizadas por melhoristas de plantas na busca por genótipos tolerantes a estresses abióticos (Zhuang et al., 2020; Benchikh-Lehocine et al., 2021). A acurácia dessas associações é mensurada por alguns fatores, dentre eles estão a precisão das avaliações, bem como a redução da atuação de fatores externos e a consolidação do método utilizado (Lao et al., 2021). Nesse sentido, o uso de novas ferramentas de avaliação e análise, integrando características de categorias diferentes, isto é, traços fisiológicos e morfológicos do sistema radicular, pode ajudar na acurácia de seleção de genótipos superiores, visando a maior produção de grãos em condição de seca (Kamphorst et al., 2021b; Leite et al., 2022).

Nesse cenário, a alta correlação entre dois caracteres pode ser o resultado do efeito de um terceiro sobre aqueles ou, mesmo, de um grupo de caracteres (Cruz et al., 2012; Santana et al., 2022). Não é possível observar se a estimativa de correlação é estabelecida por relações reais e diretas de causa e efeito (Peixoto et al., 2021). A esse respeito, a análise de trilha, proposta por Wright (1921), permite inferir sobre os efeitos diretos e indiretos por meio do desdobramento das correlações de um grupo de caracteres (explicativas), em relação a um determinado caractere que é considerado mais importante (principal) (Cruz et al., 2012).

Por conseguinte, o objetivo deste estudo foi estimar os efeitos da influência direta e indireta de caracteres agronômicos, morfológicos, fisiológicos e de arquitetura radicular de genótipos de milho-pipoca sob duas condições hídricas, sobre as variáveis básicas: rendimento de grãos e capacidade de expansão. Além

disso, objetivou-se elucidar as correlações entre as principais características avaliadas no melhoramento de milho-pipoca para tolerância à seca.

3.2.2 REVISÃO

3.2.2.1 Melhoramento genético para tolerância ao déficit hídrico em milho

Características morfológicas e fisiológicas têm sido estudadas em genótipos de milho comum sob condição de déficit hídrico. Embora com pesquisas esparsas, atributos como área foliar, controle osmótico, atividade dos cloroplastos, conteúdo relativo de água foliar e produção de matéria seca revelam-se importantes nesses estudos (Bray, 1993; Smirnov, 1993; Bray, 1997; Zadehbagheri et al., 2014; Kozlowski, 2015; Zhang et al., 2018).

Uma parte desses trabalhos de melhoramento nessa linha de pesquisa têm buscado identificar características secundárias de fácil mensuração, em condições de campo, que se correlacionam fortemente com a produtividade de grãos (Durães et al., 2004; Câmara et al., 2007; Zia et al., 2013; Adebayo et al., 2014). O uso dessas características, juntamente com o alto valor adaptativo pode aumentar a eficiência da seleção em condição de estresse hídrico (Ali et al., 2014).

Esforços consideráveis são direcionados para a análise genética de características secundárias, como a arquitetura do sistema radicular, o potencial de água foliar, o ajuste osmótico e o teor relativo de água (Jongdee et al., 2002). Conforme Edmeades et al. (2000) uma característica secundária adequada é aquela que apresenta alta herdabilidade, fácil mensuração, baixo custo para sua aferição e, sobretudo, que seja geneticamente correlacionada com rendimento de grãos, sob condição de déficit hídrico.

Outra vantagem da avaliação de características secundárias é que, sob condições normais de cultivo, é possível o uso dessas características para aumentar a eficiência da seleção para tolerância ao estresse hídrico, em termos de produção de grãos (Durães et al., 2004). No entanto, tais características raramente possuem herdabilidades elevadas em condição de seca e, muitas vezes, não são altamente correlacionadas com produção de grãos (Farooq et al., 2009). Nesta

serra científica de condição de seca, existem raros estudos com a cultura do milho-pipoca, sendo mais comuns com trigo, arroz e milho comum.

As técnicas de fenotipagem, auxiliadas por dispositivos de baixo custo, portáteis e de fácil utilização, têm sido integradas no melhoramento de plantas para caracterização de genótipos tolerantes à escassez hídrica (Durães et al., 2004; Lynch, 2015; Gao e Lynch, 2016; Leite et al., 2021; Kamphorst et al., 2021b). De todo modo, Araus et al. (2018) destacam os desafios no uso de técnicas de fenotipagem, como: (i) identificação rigorosa das prioridades, (ii) montagem de perfis de marcadores genéticos, e (iii) objetivos a curto e longo prazo das pesquisas relacionadas aos fatores climáticos que atuam sobre a produção de alimentos.

3.2.2.2 Características morfofisiológicas em resposta ao estresse hídrico

Existem diversas estratégias morfofisiológicas adaptativas observadas em vegetais expostos ao estresse por déficit hídrico, que envolvem, sobretudo, os processos de absorção de água e nutrientes, bem como o processo fotossintético (Qi et al., 2012). Durante o desenvolvimento do vegetal em condição de déficit hídrico, o topo do perfil do solo seco, inicialmente, afeta a parte superior do sistema radicular, enquanto as raízes mais profundas acessam a água do subsolo para o crescimento da planta. O enraizamento mais profundo é uma competência adaptativa importante para acessar a água armazenada em camadas subsuperficiais do solo (Gao e Lynch, 2016).

A exposição de plantas a estresses abióticos causa danos oxidativos às células, por meio da acumulação de espécies reativas de oxigênio, tais como radicais hidroxila, íons superóxido ou peróxidos de hidrogênio, gerados por células vivas como subprodutos do metabolismo celular (Gechev et al., 2006). A produção excessiva desses compostos em células de vegetais é prejudicial aos ácidos nucleicos, proteínas e lipídios, e podem levar à morte celular (Gill e Tuteja, 2010). Segundo Taiz e Zeiger (2015), existem quatro enzimas que desempenham papel fundamental nos principais processos fisiológicos nos vegetais; são elas: sacarose sintase, adenosinadifosfato-glicose-pirofosforilase, amido sintase e enzima de ramificação de amido. O crescimento vegetal é o principal processo fisiológico afetado na condição de déficit hídrico, controlado pela atuação da enzima sacarose sintase, seguido do enchimento de grãos, regulado pela enzima adenosina difosfato-glicose-pirofosforilase (Farooq et al., 2009; Taiz e Zeiger, 2015).

As plantas expostas à seca sofrem alterações fisiológicas e bioquímicas, nas quais a atividade de diversas enzimas é comprometida (Obata et al., 2015). A ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco), enzima responsável pela fixação de carbono no processo fotossintético, em condição severa de seca, tem sua atividade catalítica atenuada, limitando a fotossíntese (Taiz e Zeiger, 2015). Outro ponto importante é a diminuição da disponibilidade de CO₂, que além de promover a atividade oxigenase da Rubisco e declínio no volume celular, causa alteração no transporte de elétrons do processo fotoquímico, com transformações nos aparelhos fotossintéticos (Parry et al., 2002).

A senescência foliar tardia, estimada por meio de assinatura espectral (NDVI), tem sido utilizada para identificar genótipos mais tolerantes ao estresse hídrico (Lu et al., 2011), sendo obtida por um procedimento não-destrutivo, utilizando o espectro-radiômetro portátil (Adebayo et al., 2014). Por esse procedimento, obtém-se o índice de vegetação normalizado por diferença (NDVI), que é traduzido por um indicador numérico, o qual varia de 0,0 a 1,0. Para valores próximos de 1,0, há a plenitude das folhas quanto às suas funções metabólicas e fisiológicas, enquanto valores próximos a 0,0 expressam vegetação com funções metabólicas e fisiológicas debilitadas ou cessadas.

A correlação significativa e positiva entre os caracteres rendimento médio de grãos e elevados índices de NDVI, estimados na fase de enchimento de grãos, tem sido observada em alguns trabalhos (Araus et al., 2010; Lu et al., 2011; Adebayo et al., 2014). Segundo citações, a fase adequada de avaliação dos índices médios de NDVI para se identificar as diferenças entre os genótipos, é o estágio fenológico de enchimento de grãos (Cairns et al., 2012; Romano et al., 2013; Adebayo et al., 2014).

Em alguns casos, a temperatura do dossel das lavouras apresenta correlação com a senescência foliar (Cairns et al., 2012). Adebayo et al. (2014) propalam que os genótipos que apresentam elevada temperatura de dossel de plantas, são os mesmos que exibem os menores índices de NDVI, ou seja, maior senescência foliar. Todavia, os mesmos autores comentam que quando se trabalha com grande número de genótipos, torna-se uma tarefa árdua a obtenção simultânea de precisas estimativas de valores de NDVI e de captura de imagens térmicas.

Gao e Lynch (2016) propuseram um ideótipo radicular para plantas de milho comum, composto por três características principais: “Steep, Cheap and Deep” (íngreme, barato e profundo). Nesse sentido, os autores descrevem “barato” como a redução do custo metabólico da exploração do solo; “profundo”, que se refere à capacidade de alcançar regiões mais profundas do solo; e “íngreme”, que significa possuir ângulos de crescimento da raiz próximos de 90° em relação ao solo.

A cultura do milho-pipoca carece de trabalhos abordando a caracterização radicular das plantas sob condição de estresse hídrico. Nesse intento, em uma das poucas pesquisas, realizou-se um experimento com linhagens eficientes e ineficientes no uso da água para correlacionar características produtivas, estimadas em campo; e atributos radiculares, estimados em casa de vegetação (Leite et al., 2021). Constatou-se que as linhagens eficientes apresentaram maior desenvolvimento radicular no ambiente sob déficit hídrico, além de demonstrar correlação significativa e de valor positivo com características fisiológicas relacionadas com maior desempenho do sistema fotossintético (Leite et al., 2021).

O teor relativo de clorofila é outro atributo importante para a caracterização de plantas sob déficit hídrico (Goulas et al., 2004). Essa avaliação, além de estimar a eficiência do processo fotossintético pela associação com o conteúdo de clorofila, pode ser utilizada para gerar uma escala de senescência foliar, mediante mensurações durante o ciclo produtivo da cultura (Simova-Stoilova et al., 2016). Os aparelhos mais modernos, além de estimarem o conteúdo interno de clorofila, quantificam teores de pigmentos acessórios (flavonoides e antocianinas) e índices relacionados ao conteúdo de nitrogênio presente nas folhas (Tremblay et al., 2007; Yu et al., 2010).

3.2.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.3.1 Material vegetal, desenho experimental e tratos culturais

Por meio dos mesmos experimentos descritos no Capítulo 1, obtiveram-se os dados e resultados do Capítulo 2. Por isso, o material vegetal utilizado, as técnicas experimentais e tratos culturais aplicados são idênticos àqueles descritos do Capítulo anterior, seção 3.1.3.1.

3.2.3.2 Características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular avaliadas

As características avaliadas foram divididas em três grupos, respectivamente, as agronômicas, as fisiológicas e as morfológicas do sistema radicular. As características agronômicas avaliadas, foram: altura média de planta (PH), altura média de espiga (EH), diâmetro médio de colmo (SD), comprimento médio de espiga (EL), diâmetro médio de espiga (ED), número médio de grãos por fileira (GNR), número médio de fileiras por espiga (RNE), número total de grãos por espiga (GNE), massa média de 100 grãos (GW), rendimento de grãos (GY), capacidade de expansão (PE), e volume de pipoca expandida por ha (EPV). PH e EH foram mensuradas após o pendoamento, sendo que PH foi avaliada a partir do solo até a folha bandeira, e para a variável EH, a medida foi feita até a inserção da espiga principal. O diâmetro médio do colmo (SD) foi quantificado logo abaixo da espiga principal, com o auxílio de um paquímetro digital (Paquímetro Digital Aço Inox 150 mm Mtx). RNE e GNR foram estimadas por meio de contagem. PH, EH, SD, RNE e GNR foram estimadas em uma amostra de dez plantas, e as espigas destas plantas foram colhidas aleatoriamente. A característica GW foi quantificada por meio de duas amostras de cem grãos da parcela, após as espigas serem debulhadas. A rendimento de grãos (GY) foi obtida após a debulha das espigas de cada parcela, as quais foram corrigidas para 13% de umidade (kg ha^{-1}). A capacidade de expansão (PE) foi estimada pela massa de 30 g de grãos irradiada em micro-ondas (1.000 W) em um saco de papel tipo kraft por 2 min, sendo o volume de pipoca quantificado em uma proveta de 2.000 mL; a razão do volume estourado dividido por 30 g determinou a PE, a qual é expressa em mL g^{-1} . EPV foi obtida pela multiplicação de GY e PE ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

As características fisiológicas avaliadas, foram: intensidade de cor verde das folhas, estimativa do teor relativo de clorofilas (CC), antocianinas (ANT), flavonoides (FLA), índice de balanço de nitrogênio (NBI), fluorescência das clorofilas (F_v/F_m). As avaliações foram realizadas no período de enchimento dos grãos, 40 dias após o florescimento masculino, em dez plantas por parcela, no terço médio da folha imediatamente acima da espiga principal. Para avaliar CC, ANT, FLV e NBI utilizou-se o equipamento DUALEX (DUALEX® SCIENTIFIC – USA). A emissão da fluorescência da clorofila (F_v/F_m) foi mensurada com o auxílio de um fluorímetro não-modulado digital de mão Pocket PEA (Hansatech Instruments Ltd.

USA). Essa última característica foi avaliada após a adaptação ao escuro da área a ser amostrada por 15 min.

As características radiculares foram mensuradas conforme metodologia proposta por Trachsel et al. (2011), com modificações (Kamphorst et al., 2018). Independente da WC, o sistema radicular de duas plantas por parcela foi removido em cilindros de solo de 25 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade. As características radiculares mensuradas foram o número de raízes de suporte (NBR), o número de raízes da coroa (NCR), ambos estimados por meio de contagem; o ângulo de raízes de suporte (ABR) e o ângulo das raízes da coroa (ACR), os quais foram aferidos com o auxílio de transferidor e expressos em graus (°) em relação à superfície do solo (Trachsel et al., 2011).

3.2.3.3 Análises estatísticas

3.2.3.3.1 Análise de variância

A análise de variância foi baseada no modelo estatístico: $Y_{ij} = \mu + B_j + G_i + \varepsilon_{ij}$, em que: Y_{ij} = valor observado para a variável em estudo referente a j-ésima repetição da combinação do i-ésimo nível do fator Genótipo; μ = média geral; B_j = efeito da j-ésima repetição; G_i = efeito do i-ésimo nível do fator Genótipo no valor observado; ε_{ij} = erro experimental associado à observação Y_{ijk} , assumindo NID (0, σ^2).

3.2.3.3.2 Correlações genotípicas

As correlações genotípicas foram estimadas e testadas nos níveis de 5 e 1% de probabilidade, segundo o teste t. O *software* R (versão 4.2.2) foi utilizado para as análises.

3.2.3.3.3 Análise de trilha pelo modelo *Structural Equation Modeling* (SEM)

Para a análise de trilha, foi feita a análise de variância para obtenção das variâncias e covariâncias genotípicas, a fim de gerar a matriz de correlações genotípicas entre os caracteres avaliados. A matriz de correlação genotípica foi submetida ao teste de colinearidade de acordo com Montgomery e Peck (1981). Inicialmente, foi feita a análise de trilha com a formação de dois grupos de características (cadeia dupla), representados pela ação de 17 variáveis explicativas, sendo que na primeira cadeia foram utilizadas as características agrônômicas – EL (P01), ED (P02), NGR (P03), GNR (P04), RNE (P05), NGE

(P06), GW (P07); – e, na segunda cadeia – características morfológicas e fisiológicas – ANT (P01), CC (P02), FLA (P03), Fv/Fm (P04), SD (P05), EH (P06), PH (P07), ABR (P08), NBR (P09), ACR (P10), NCR (P11), sobre as características principais GY e PE. A resolução em forma de matriz foi obtida pelo sistema de equações normais $X'X\beta = X'Y$, em que $X'X$ é uma matriz não singular de correlações entre variáveis explicativas, β é um vetor-coluna de coeficientes de trilha e $X'Y$ é um vetor-coluna de correlações entre a variável principal e as variáveis explicativas (Cruz et al., 2012). Para a cultura em estudo, GY e PE, para as duas condições hídricas e safras estudadas e consideradas como principais.

Todas as análises foram realizadas por meio do *software* R (R Core Team, 2018), utilizando-se os pacotes: stats 3.6.0 (R Team, 2018), biotools 3.1 (Silva et al., 2016), semPlot 1.1 (Epskamp 2015), elavaan 0.6 (Rosseel, 2012). O diagrama causal do modelo pode ser observado na Figura 9.

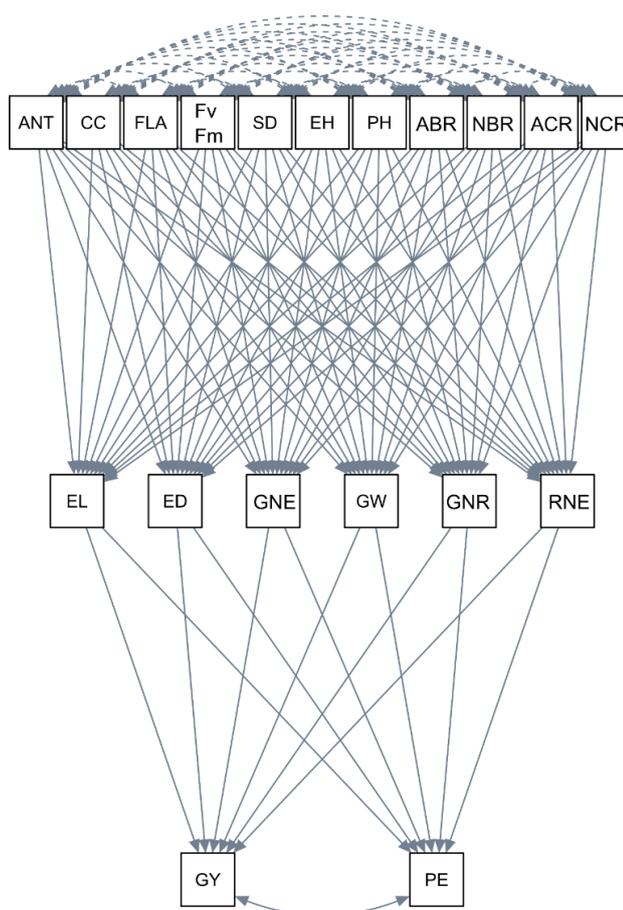


Figura 9 – Diagrama causal com efeitos diretos (linhas contínuas unidirecionais) das variáveis explicativas sobre as variáveis dependentes GY e PE e correlações entre características (linhas bidirecionais tracejadas).

3.2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2.4.1 Análise de variância e estimativas de médias das características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular.

Na análise da safra 2020, todas as características expressaram diferença significativa em 5% de probabilidade (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância, estimativas de médias, quadrados médios, coeficiente de variação e desvio-padrão associados a características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular de linhagens de milho-pipoca avaliadas sob diferentes condições hídricas (WS e WW) em 2020

Características	Condição hídrica (WC)	Quadrados médios		Médias e DP	CVe (%)
		Genótipo (G) GL = 49	GxWC GL = 49		
100GW (g)	WW	11,54**	6,05**	10,91 ± 1,60	6,30%
	WS	8,51**		9,22 ± 1,39	
PE (g.ml ⁻¹)	WW	69,53**	42,93**	22,20 ± 3,87	6,70%
	WS	66,83**		17,44 ± 3,90	
GY (kg.ha ⁻¹)	WW	1118030,00*	556780,08*	1519,64 ± 504,04	14,46%
	WS	195448,00**		461,02 ± 200,62	
EPV (m ³ .ha ⁻¹)	WW	647,68**	307,20**	33,46 ± 11,63	18,10%
	WS	70,56**		8,07 ± 3,91	
RNE (unid.)	WW	9687,30**	4874,22**	299,63 ± 45,02	11%
	WS	8470,60**		220,07 ± 40,78	
GNR (unid.)	WW	6,25**	3,56**	22,90 ± 3,21	5,90%
	WS	9,37**		18,71 ± 2,86	
GNE (unid.)	WW	48,01**	24,66**	13,11 ± 1,07	8,19%
	WS	34,83**		11,64 ± 1,34	
ED (mm)	WW	15,43**	6,59**	27,79 ± 1,79	5,57%
	WS	23,16**		25,18 ± 2,07	
EL (cm)	WW	7,40**	5,08**	10,96 ± 1,34	6,93%
	WS	10,78**		9,72 ± 1,51	
EH (cm)	WW	780,62**	116,24**	90,90 ± 13,55	5,49%
	WS	660,40**		81,08 ± 12,24	
PH (cm)	WW	952,61**	238,25**	156,38 ± 14,05	2,49%
	WS	1076,54**		128,94 ± 14,80	
SD (mm)	WW	3,67**	1,97**	12,28 ± 0,89	7,65%
	WS	4,74**		12,91 ± 0,96	

Tabela 3 – Cont.

Características	Condição hídrica (WC)	Quadrados médios		Médias e DP	CVe (%)	
		Genótipo (G) GL = 49	GxWC GL = 49			
Fisiológicas	CC	WW	145,62**	105,84**	29,75 ± 5,60	8,12%
		WS	163,28**		15,14 ± 6,35	
	ANT	WW	0,01**	0,01**	0,23 ± 0,03	7,72%
		WS	0,01**		0,27 ± 0,03	
	FLA	WW	0,06**	0,01**	1,22 ± 0,11	3,34%
		WS	0,06**		1,23 ± 0,12	
	NBI	WW	73,02**	2,69**	20,12 ± 4,00	9,63%
		WS	70,38**		20,14 ± 3,79	
	Fv/Fm	WW	0,01**	0,01**	0,73 ± 0,03	4,17%
		WS	0,01**		0,71 ± 0,03	
Sistema radicular	ABR (°)	WW	113,87**	160,20**	33,53 ± 4,96	13,05%
		WS	181,69**		35,80 ± 5,92	
	ACR (°)	WW	256,16**	20,40**	41,36 ± 7,15	14,21%
		WS	205,86**		41,91 ± 6,64	
	NBR (unid.)	WW	26,22**	232,78**	11,83 ± 2,20	8,53%
		WS	25,50**		10,84 ± 2,30	
	DCR (unid.)	WW	119,92**	94,06**	16,82 ± 5,01	14,34%
		WS	64,41**		16,24 ± 3,62	

WS – Condição com déficit hídrico; WW – Irrigação adequada; CVe – Coeficiente de variação; EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; Fv/Fm – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. ***, ** e * indica diferença significativa em nível de 0.01%, 1% e 5% pelo teste F, respectivamente; ns: ausência de diferença significativa pelo o teste F em 5% de probabilidade.

Na análise da safra 2021, todas as características expressaram diferença significativa em 5% de probabilidade (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise individual de variância, estimativas de médias, médias quadradas, coeficiente de variação e desvio-padrão associados a características agrônômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular de linhagens de milho-pipoca cultivadas sob diferentes condições hídricas (WS e WW) em 2021

Características	Condição hídrica (WC)	Quadrados médios		Médias e DP	CVe (%)	
		Genótipo (G) GL = 49	GxWC GL = 49			
Agrônômicas	100GW (g)	WW	11,38**	10,25**	10,00 ± 1,56	13,02%
		WS	7,99**		9,15 ± 1,25	
	PE (g.ml ⁻¹)	WW	58,62**	52,61**	22,16 ± 3,47	6,98%
		WS	48,61**		18,76 ± 3,18	
	GY (kg.ha ⁻¹)	WW	803262,00**	549979,57*	1285,05 ± 419,59	14,98%
		WS	439000,00**		812,08 ± 303,25	
	EPV (m ³ .ha ⁻¹)	WW	457,25**	317,14**	28,25 ± 9,62	18,69%
		WS	218,59**		15,34 ± 6,47	
	RNE (unid.)	WW	12742,50**	14774,37**	288,98 ± 54,43	15,43%
		WS	24329,90**		270,77 ± 70,05	
	GNR (unid.)	WW	6,35**	7,14**	22,79 ± 3,01	8,67%
		WS	8,72**		22,54 ± 4,23	
	GNE (unid.)	WW	43,48**	52,97**	12,61 ± 1,22	10,92%
		WS	89,64**		11,79 ± 1,30	
	ED (mm)	WW	29,43**	40,06**	27,85 ± 2,37	6,85%
		WS	25,88**		26,07 ± 2,13	
	EL (cm)	WW	8,18**	8,30**	12,63 ± 1,33	5,52%
		WS	10,57**		12,08 ± 1,39	
EH (cm)	WW	485,28**	179,82**	93,84 ± 10,08	3,31%	
	WS	583,18**		90,31 ± 11,52		
PH (cm)	WW	1116,81**	469,12**	160,07 ± 15,47	3,05%	
	WS	1348,96**		155,00 ± 16,68		
SD (mm)	WW	9,42**	4,05**	14,37 ± 1,33	5,35%	
	WS	9,69**		12,80 ± 1,43		
Fisiológicas	CC	WW	150,75**	118,65**	32,45 ± 5,54	7,61%
		WS	99,33**		14,17 ± 4,06	
	ANT	WW	0,01**	0,01**	0,07 ± 0,03	15,50%
		WS	0,00**		0,16 ± 0,03	
	FLA	WW	0,09**	0,05**	0,95 ± 0,14	6,40%
		WS	0,08**		1,10 ± 0,15	
	NBI	WW	400,37**	203,78**	42,75 ± 9,13	7,68%
		WS	189,95**		31,37 ± 6,06	
	F _v /F _m	WW	0,01**	0,01**	0,68 ± 0,04	7,87%
		WS	0,01**		0,67 ± 0,05	

Tabela 4 – Cont.

Características	Condição hídrica (WC)	Quadrados médios		Médias e DP	CVe (%)	
		Genótipo (G) GL = 49	GxWC GL = 49			
Sistema radicular	ABR (°)	WW	251,42**	135,45**	46,37 ± 7,53	12,15%
		WS	251,23**		42,52 ± 7,16	
	ACR (°)	WW	208,79**	173,83**	47,41 ± 6,59	9,43%
		WS	302,04**		44,61 ± 8,29	
	NBR (unid.)	WW	33,96**	20,87**	12,06 ± 2,24	15,07%
		WS	15,83**		10,76 ± 1,76	
	DCR (unid.)	WW	141,77**	64,03**	22,59 ± 4,57	13,02%
		WS	67,09**		20,73 ± 3,56	

WS – Condição com déficit hídrico; WW – Irrigação adequada; CVe – Coeficiente de variação EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; Fv/Fm – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. ***, ** e * indica diferença significativa em nível de 0.01%, 1% e 5% pelo teste F, respectivamente; ns: ausência de diferença significativa pelo o teste F em 5% de probabilidade.

Em ambas as safras, os coeficientes de variação (CVe) ficaram abaixo de 20%, o que demonstra a ocorrência de boa precisão experimental para o estudo das diferenças entre genótipos, condições hídricas e interação G x WC (Tabela 4). A significância da interação genótipo x ambientes (G x WC) ocorre quando há respostas diferenciadas dos genótipos avaliados nos distintos ambientes, o que foi constatado para os caracteres avaliados nas diferentes condições hídricas e safras (Tabelas 3 e 4). A interação G x WC interfere nos ganhos por seleção e na recomendação de cultivares (Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2012), inferindo-se que, nesta situação para esses caracteres, a seleção deve ser realizada dentro de cada ambiente e não extrapolada para todos.

A aplicação do estresse hídrico afetou negativamente a maioria das características morfológicas associadas à parte aérea e radicular, bem como as fisiológicas, exceto ANT e FLA; e, como esperado, resultou em médias mais elevadas em condição bem irrigada (WW) quando comparada à condição de

estresse hídrico (WS). Isso ocorreu devido a maior diferenciação dos genótipos sob WS, o que também pode representar maiores expressões de correlações genotípicas entre as características.

3.2.4.1.1 Estudo das correlações fenotípicas entre características agronômicas, fisiológicas e morfológicas de raíz

Analisando os coeficientes de correlação fenotípicas na condição WS (Figura 5) para CS 2020, dentre o grupo de características avaliadas, observaram-se associações significativas de sentido positivo entre os pares EH x PH (0,72), EH x ANT (0,38), PH x ANT (0,38), SD x EPV (0,33), CC x GY (0,33), Fv/Fm x RNE (0,30), Fv/Fm x PE (0,30), EL x GNR (0,64), EL x GNE (0,40), ED x RNE (0,48), ED x GNE (0,37), ED x GW (0,41), GNR x GNE (0,78), GNR x EPV (0,30), RNE x GNE (0,69), GNE x GY (0,35), GNE x EPV (0,33), GY x EPV (0,89), e PE x EPV (0,42) (Figura 10); e de sentido negativo entre os pares EH x ED (-0,47), CC x ANT (-0,36), FLA x RNE (-0,31), FLA x PE (-0,30), e NCR x GNE (-0,31).

Na CS 2021, para a mesma condição WS (Figura 10), constataram-se associações significativas de sentido positivo entre os pares SD x EH (0,28), EH x PH (0,74), EH x Fv/Fm (0,34), EH x NCR (0,31), EH x GNR (0,40), EH x GNE (0,37), PH x NCR (0,40), ACR x ABR (0,46), EL x ED (0,44), EL x GNR (0,62), EL x GNE (0,57), EL x GY (0,34), EL x EPV (0,30), ED x GNR (0,42), ED x RNE (0,41), ED x GNE (0,49), ED x GY (0,28), ED x EPV (0,28), GNR x RNE (0,54), GNR x GNE (0,94), RNE x GNE (0,77), RNE x GY (0,39), RNE x EPV (0,36), GNE x GY (0,34), GNE x EPV (0,33), GW x PE (0,39), GY x EPV (0,90), e PE x EPV (0,47); e de sentido negativo entre os pares SD x ANT (-0,32), PH x ABR (-0,30), Fv/Fm x ED (-0,33), ABR x NBR (-0,37), e NBR x ACR (-0,30) (Figura 10).

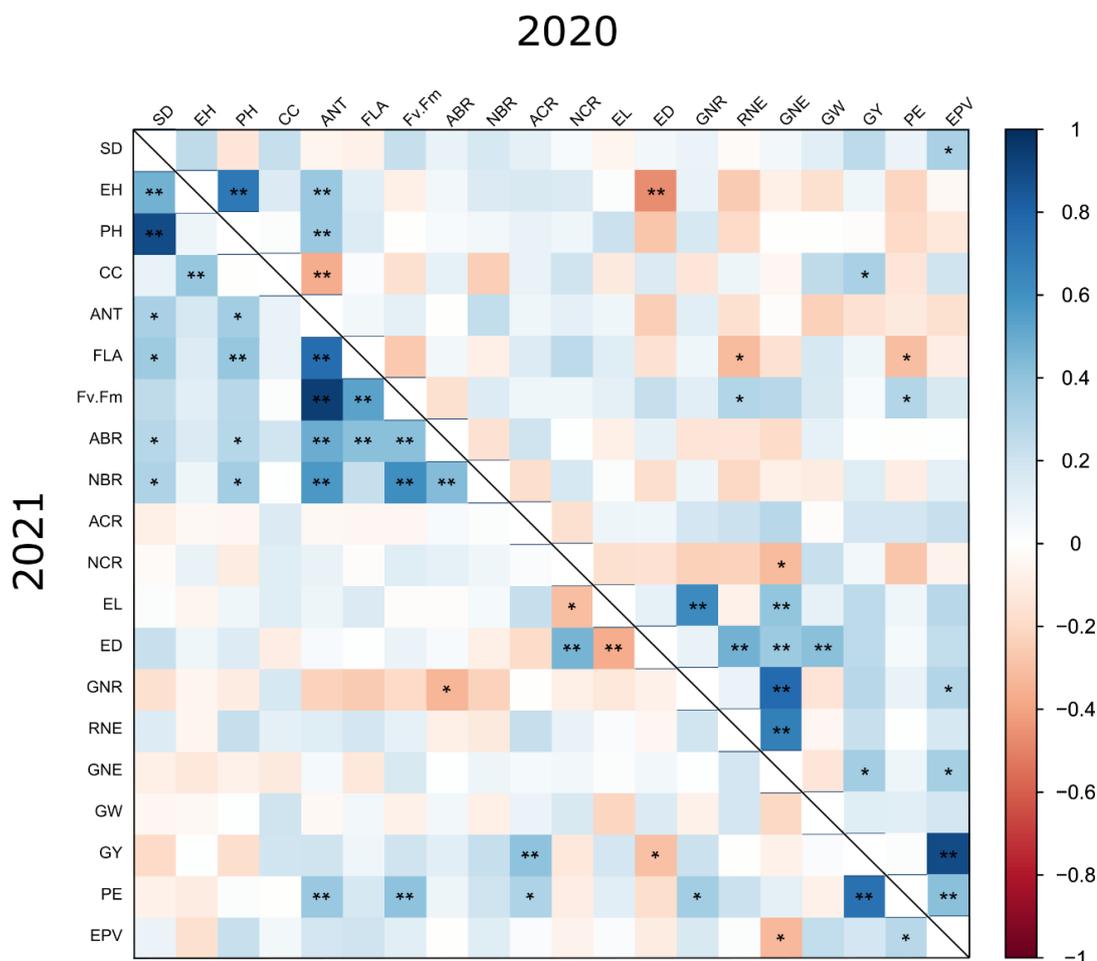


Figura 10. Estimativas de correlações genotípicas entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), nas safras de 2020 (diagonal superior) e 2021 (diagonal inferior). EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; F_v/F_m – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. * e **, representam diferenças significativas em nível de 5 e 1%, pelo teste de Pearson.

Na CS 2020, para a condição WW (Figura 11), observaram-se associações significativas de sentido positivo entre os pares SD x CC (0,37), SD x GW (0,31), SD x GY (0,38), SD x EPV (0,35), EH x PH (0,74), EH x EL (0,28), CC x EL (0,30), CC x GW (0,40), ANT x NBR (0,32), FLA x GNR (0,29), ABR x ACR (0,44), NBR x

Na CS 2021, para a condição WW (Figura 6), detectaram-se associações significativas de sentido positivo entre os pares SD x EH (0,29), EH x PH (0,70), CC x Fv/Fm (0,34), ANT x ACR (0,36), ABR x ACR (0,49), NBR x NCR (0,47), EL x GNR (0,59), EL x GNE (0,55), ED x RNE (0,49), ED x GNE (0,32), ED x GY (0,46), ED x GY (0,38), ED x EPV (0,30), GNR x GNE (0,86), GNR x GY (0,31), RNE x GNE (0,70), RNE x GY (0,49), RNE x EPV (0,42), GNE x GW (0,28), GNE x GY (0,47), GNE x EPV (0,40), GY x EPV (0,87), e PE x EPV (0,37); e de sentido negativo entre os pares SD x ANT (-0,46), CC x ANT (-0,29), e Fv/Fm x GW (-0,31). As tabelas com as correlações entre todas as características em ambas as condições hídricas e ambas as safras estão dispostas nos Anexos 1, 2, 3 e 4.

Em ambas as condições hídricas, as características fisiológicas e morfológicas de parte aérea apresentaram maiores expressões de correlações genóticas entre as linhagens. Segundo Tollenaar et al. (2004) e Kamphorst et al. (2021b) o acúmulo de matéria seca antes do florescimento e o consequente aumento da área superficial para interceptação da radiação solar, podem explicar as vantagens agronômicas em termos de produção em condições de seca. Além disso, uma maior biomassa da parte aérea está associada a sistemas radiculares mais profundos e a um maior ângulo do suporte radicular em relação à superfície do solo (Ali et al., 2016b; Leite et al., 2021), o que pode permitir uma melhor exploração do solo sob condição de seca.

3.2.4.1.2 Efeitos diretos e indiretos de características agronômicas, fisiológicas e morfológicas do sistema radicular sobre rendimento de grãos e capacidade de expansão

Os coeficientes de trilha (R^2), em ambos os ambientes, foram significativos pelo teste t, o que indica uma confiável configuração do modelo para explicar os efeitos genéticos, refletindo em alta contribuição dos caracteres explicativos utilizados no modelo relacionado. Para a análise de trilha das variáveis morfofisiológicas, procedeu-se ao diagnóstico de colinearidade entre as características, com o objetivo de determinar a relação linear entre as variáveis básicas (GY e PE) e as demais características. O diagnóstico de multicolinearidade indicou colinearidade, na condição WS, moderada para a safra 2020 (236,56) e fraca para 2021 (68,07). Para 2020, na condição hídrica WS, as características

GNE, GNR e RNE possuíram os maiores efeitos diretos sobre a característica, GY (0,75, 0,40 e -0,37, respectivamente) e GNE sobre a variável PE (0,33) (Figura 7). Para 2021, em WS, as características GNE, GNR e RNE expressaram os maiores efeitos diretos sobre GY (-0,56, 0,34 e 0,46, respectivamente) e GNE, GW e GNR sobre a variável PE (0,48, 0,27 e -0,28, respectivamente) (Figura 12).

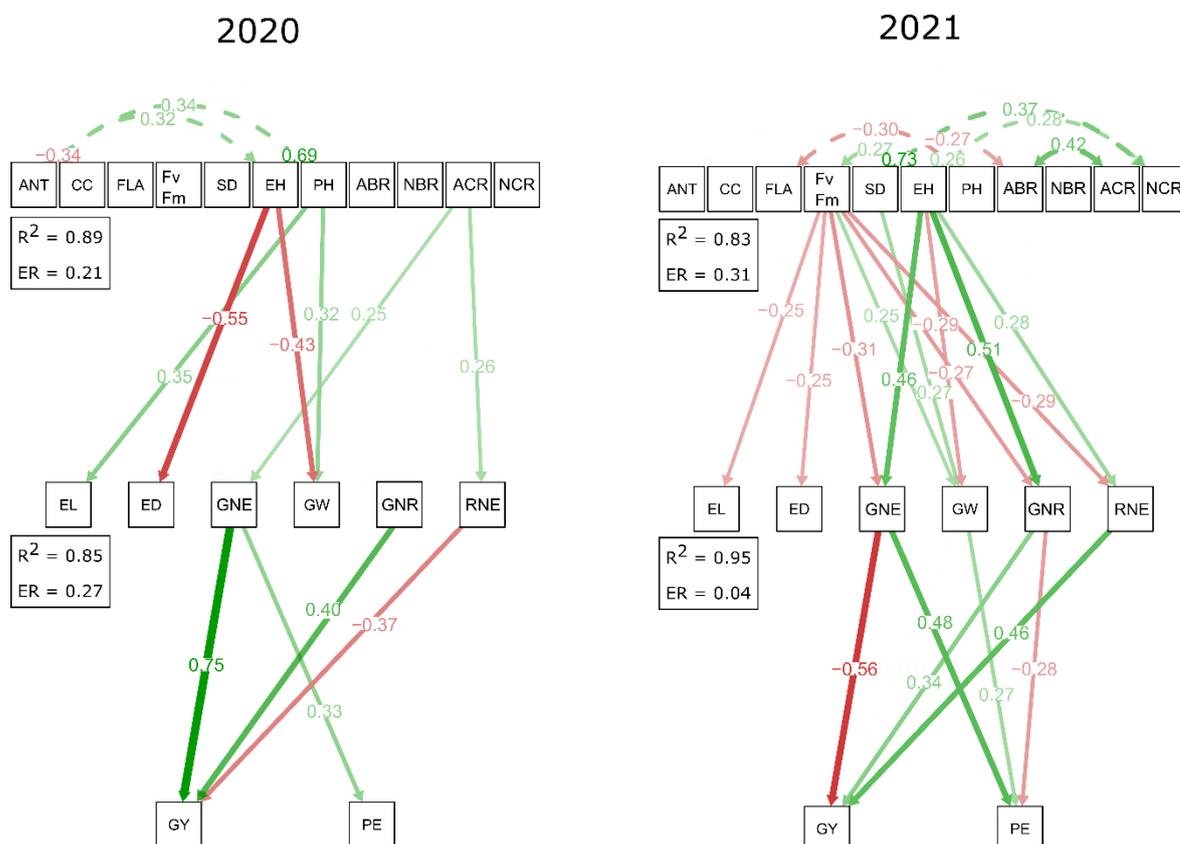


Figura 12. Diagrama causal da análise de trilha de 17 variáveis explicativas sobre as variáveis explicativas GY e PE, para o ambiente WS, nos anos de 2020 e 2021. As linhas unidirecionais referenciam os efeitos diretos de uma característica sobre outra indicada pela seta e as linhas bidirecionais referem-se às correlações entre as variáveis. A cor verde indica efeito e correlação positiva; e a cor vermelha, efeito e correlação negativa, a intensidade das cores e espessura da linha indicam o grau do efeito de uma característica sobre as demais. EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; SPAD – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; F_v/F_m – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa; R^2 - coeficiente de trilha e EF – efeito residual.

Em 2020, analisando os efeitos das características secundárias sobre GNE, os maiores efeitos positivos recaíram para a característica ACR (0,25). Sobre RNE, houve maior expressão dos efeitos de ACR (0,26) e FLA (-0,30). Destacam-se as correlações positivas entre os pares EH x PH (0,69), PH x ANT (0,34) e EH x ANT (0,32), e a negativa entre o par ANT x CC (-0,34).

Em 2021, investigando os efeitos das características secundárias sobre GNE, o maior efeito positivo ocorreu para com a variável EH (0,46) e negativo para com Fv/Fm (-0,31). Sobre GW, os maiores efeitos foram promovidos por Fv/Fm (0,25), SD (0,27) e EH (-0,29). Sobre GNR, os maiores efeitos incidentes foram de EH (0,51) e Fv/Fm (-0,27). Sobre RNE, incidiram com maior expressão os efeitos de EH (0,28) e Fv/Fm (-0,29). Destacam-se as correlações positivas entre os pares SD x EH (0,73), ABR x ACR (0,42), e SD x NCR (0,37); e negativa entre o par FLA x EH (-0,30).

Na condição WS, para a safra de 2020, os caracteres de primeira cadeia GNE (0,75) e GNR (0,40) mostraram os efeitos totais mais expressivos para com GY, caracterizando-se, assim, como promissores para a seleção indireta. Para PE, a caracter GNE (0,33) mostrou o maior efeito direto sobre aquela característica. O caracter RNE (-0,37) apresentou efeito direto negativo sobre GY, indicando que não é essencial para incrementar GY. Percorrendo a trilha da primeira para a segunda cadeia de variáveis, considerando apenas o caractere GNE, destaca-se ACR (0,25), por revelar efeito total significativo sobre GNE. Isso revela que, para WS em 2020, a trilha mais promissora para ambas as características básicas perpassa por ACR > GNE > GY e PE.

Para a safra de 2021, os caracteres de primeira cadeia GNR (0,34) e RNE (0,46) mostraram os efeitos totais mais expressivos para com GY, caracterizando-se, assim, como promissores para a seleção indireta. Para PE, os caracteres GNE (0,48) e GW (0,27) apresentaram os maiores efeitos diretos sobre aquela variável. O caracter GNE (-0,56) expressou efeito direto negativo sobre GY, indicando que não se trata de variável essencial para incrementar GY. Para PE, o caracter GNR (-0,28) apresentou efeitos negativos para a seleção direta. Percorrendo a trilha da primeira para a segunda cadeia de variáveis, para GY e considerando-se apenas o caracter GNR, destaca-se EH (0,51), por revelar efeito total significativo sobre GNR. Isso revela que, para WS em 2021, a trilha mais promissora para GY, perpassa por

EH > GNR > GY. Para PE, considerando apenas o caracter GNE, destaca-se EH (0,46) de primeira cadeia, indicando a trilha EH > GNE > PE, como a mais promissora para selecionar genótipos superiores.

Para a análise de trilha na condição WW, o diagnóstico de multicolinearidade indicou colinearidade moderada para a safra 2020 (203,26) e fraca para 2021 (64,39). Para 2020, na condição hídrica WW, as variáveis GNE e GNR expressaram os maiores efeitos diretos sobre GY (-0,32 e 0,57, respectivamente) e também sobre PE (0,41 e -0,34, respectivamente) (Figura 13). Para 2021, em WW, as características GNE, GNR e RNE detiveram os maiores efeitos diretos sobre GY (-0,58, 0,50 e 0,48, respectivamente) e, também, sobre PE (0,62, -0,48, e -0,30) para GNE, GNR e RNE, respectivamente (Figura 13).

Em 2020, analisando os efeitos das características secundárias sobre GNE, o maior *quantum* positivo adveio de EH (0,32); e o negativo, de PH (-0,22). Sobre GNR, incidiram com maior expressão os efeitos de EH (0,54) e PH (-0,34) (Figura 6). Sobre RNE, ocorreram com maior expressão os efeitos de EH (-0,28) e ABR (-0,28). Destacam-se as correlações positivas entre os pares EH x PH (0,72), ABR x ACR (0,42), NBR e NCR (0,30), e CC x SD (0,31).

Em 2021, com fundamento nas estimativas das características secundárias sobre GNE, o maior efeito positivo foi de ANT (0,21); e negativo de EH (-0,23). Sobre GNR, os maiores efeitos incidentes foram de EH (-0,22) e PH (0,20). Sobre RNE, incidiram com maior expressão os efeitos de CC (0,21) e NBR (-0,22). Destacam-se as correlações positivas entre os pares SD x EH (0,68), ABR x ACR (0,45), NBR x NCR (0,43), e FLA x ACR (0,29); e negativa entre o par FLA x PH (-0,38).

Na condição WW, para a safra de 2020, o caracter de primeira cadeia GNR (0,57) revelou efeito total mais expressivo para GY, caracterizando-se, assim, como promissor para a seleção indireta. Para PE, o caracter GNE (0,41) mostrou o maior efeito direto sobre aquela variável. O caracter GNE (-0,32) apresentou efeito direto negativo sobre GY, indicando que não é essencial para incrementar GY. Para PE, o caracter GNR (-0,34) apresentou efeitos negativos para a seleção direta. Percorrendo a trilha da primeira para a segunda cadeia de variáveis, constata-se que para GY, considerando-se apenas o caractere GNR, destacou-se o caracter EH (0,54), por revelar efeito total significativo sobre GNR. Isso revela que, para WW em 2020, a trilha mais promissora para GY, passa por EH > GNR > GY. Para PE,

considerando apenas o caracter GNE, destaca-se EH (0,32) como caracter de primeira cadeia, indicando a trilha EH > GNE > PE, como a mais promissora para selecionar genótipos superiores.

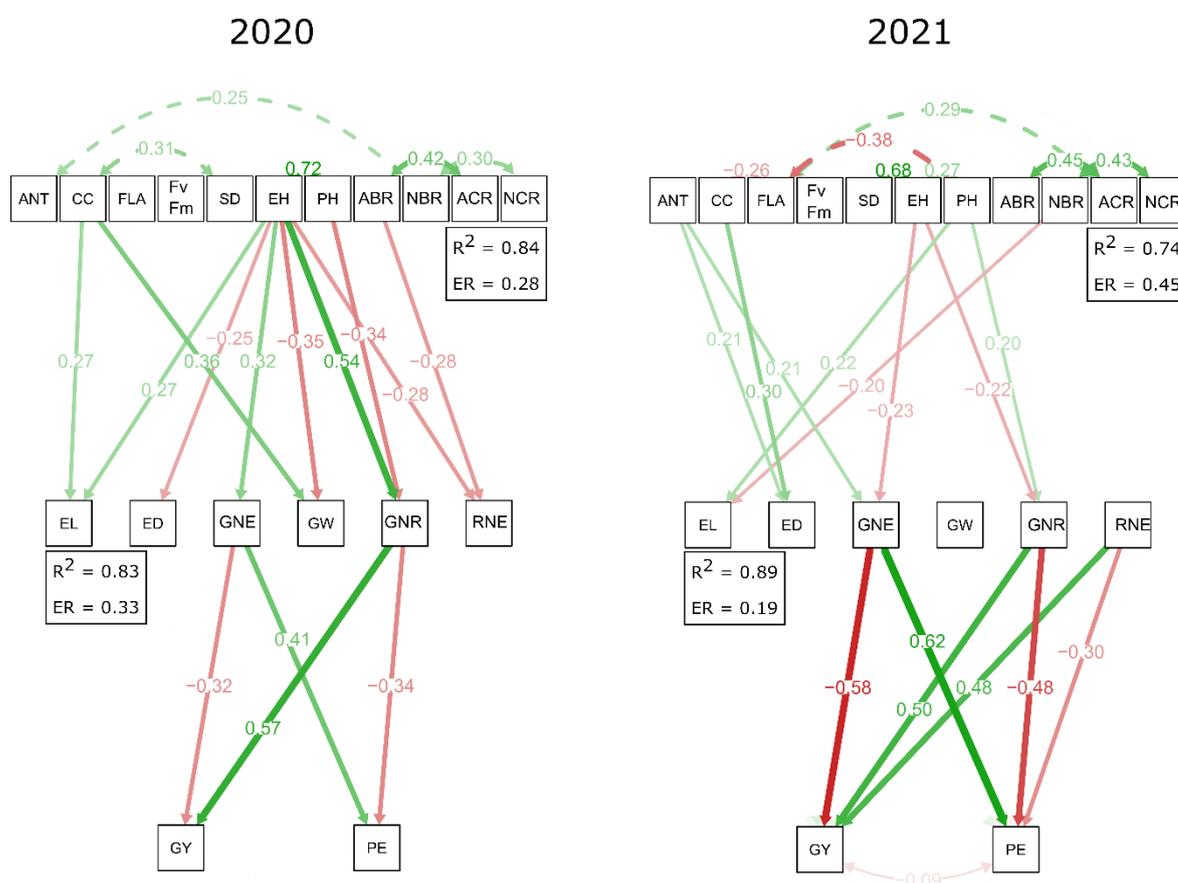


Figura 13. Diagrama causal da análise de trilha de 17 variáveis explicativas sobre as variáveis explicativas GY e PE, para o ambiente WW, nos anos de 2020 e 2021. As linhas unidirecionais referenciam os efeitos diretos de uma característica sobre outra indicada pela seta e as linhas bidirecionais referem-se às correlações entre as variáveis. A cor verde indica efeito e correlação positiva; e a cor vermelha, efeito e correlação negativa, a intensidade das cores e espessura da linha indicam o grau do efeito de uma característica sobre as demais. EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; SPAD – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; F_v/F_m – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa; R² - coeficiente de trilha e EF – efeito residual.

Para a safra de 2021, os caracteres de primeira cadeia GNR (0,50) e RNE (0,38) mostraram os efeitos totais mais expressivos para com GY, caracterizando-se, assim, como promissores para a seleção indireta. Para PE, o caracter GNE (0,62) apresentou o maior efeito direto sobre aquela variável. O caracter GNE (-0,58) apresentou efeito direto negativo sobre GY e PE, e os caracteres GNR (-0,48) e RNE (-0,30) revelaram-se como variáveis não essenciais para incrementar GY e PE. Percorrendo a trilha da primeira para a segunda cadeia de variáveis, tem-se que para GY, considerando apenas o caractere GNR, destacou-se o caracter PH (0,20), por apresentar efeito total significativo sobre GNR. Isso revela que, para WW em 2020, a trilha mais promissora para GY, segue o caminhamento perpassando por PH > GNR > GY. Para PE, considerando apenas o caracter GNE, destacou-se o caracter ANT (0,21), de primeira cadeia, indicando a trilha ANT > GNE > PE, como a mais promissora para selecionar genótipos superiores.

A análise de trilha é uma importante ferramenta para estimar os efeitos diretos e indiretos de características morfofisiológicas sobre características agrônomicas. Os efeitos de intercorrelações gerados sobre as variáveis básicas, mostram a possibilidade de caminhos para a seleção indireta de características desejáveis que, para o presente trabalho, são GY e PE. Nesse contexto, o uso dessa metodologia mostra-se uma alternativa eficiente e viável para a seleção destes caracteres principais, utilizando características intercorrelacionadas para com essas, levando a ganhos recíprocos em ambas as características, permitindo, assim, a seleção de genótipos superiores de milho-pipoca por via indireta.

3.2.5 CONCLUSÕES

Os caracteres agrônômicos, morfológicos, fisiológicos e de arquitetura de raízes utilizados na análise de trilha foram suficientes para explicar as variações observadas em rendimento de grãos e capacidade de expansão, nos ambientes WW e WS, em ambas as safras de cultivo. Para a seleção indireta, na condição WS em 2020, a trilha mais promissora foi ACR > GNE > GY e PE; já para 2021, considerando GY, a trilha indicada perpassa por EH > GNR > GY. Para PE, a trilha com maiores possibilidades de ganhos caminha por EH > GNE > PE. Para WW,

em 2020, a trilha mais promissora para GY, passa por $EH > GNR > GY$. Para PE, a trilha mais promissora ocorreu via $EH > GNE > PE$. Para 2020, a trilha mais promissora para seleção indireta GY passa por $PH > GNR > GY$; já para PE, isso ocorre pela ordenação $ANT > GNE > PE$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adebayo, M.A., Menkir, A., Blay, E., Gracen, V., Danquah, E., Hearne, S. (2014) Genetic analysis of drought tolerance in adapted × exotic crosses of maize inbred lines under managed stress conditions. *Euphytica* 196: 261–270.
- Ali, F., Ahsan, M., Ali, Q., Kanwal, N. (2017) Phenotypic Stability of *Zea mays* Grain Yield and Its Attributing Traits under Drought Stress. *Front Plant Sci* 8: 1–11.
- Ali, M.L., Luetchens, J., Singh, A., Shaver, T.M., Kruger, G.R., Lorenz, A.J. (2016a) Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their association with grain yield under water-deficit conditions in the field. *Euphytica* 207: 79–94.
- Ali, M.L., Luetchens, J., Singh, A., Shaver, T.M., Kruger, G.R., Lorenz, A.J. (2016b) Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their association with grain yield under water-deficit conditions in the field. *Euphytica* 207: 79–94.
- Ali, Q., Ali, A., Waseem, M., Muzaffar, A., Ahmed, S., Ali, S., Bajwa, K.S., Awan, M.F., Samiullah, T.R., Nasir, I.A., Husnain, T. (2014) Correlation analysis for morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.). *Life Sci J* 11: 9–13.
- Álvarez-Iglesias, L., Djemel, A., Malvar, R.A., Gutiérrez, J., Reyes, R., Pedrol, N., Revilla, P. (2018) Variability and mechanisms of drought tolerance in maize populations from Honduras.

- Anjum, S.A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., Zohaib, A., Abbas, F., Saleem, M.F., Ali, I., Wang, L.C. (2017) Drought Induced Changes in Growth, Osmolyte Accumulation and Antioxidant Metabolism of Three Maize Hybrids. *Front Plant Sci.* doi: 10.3389/fpls.2017.00069
- Araus, J.L., Kefauver, S.C., Zaman-Allah, M., Olsen, M.S., Cairns, J.E. (2018) Translating High-Throughput Phenotyping into Genetic Gain. *Trends Plant Sci* 23: 451–466.
- Araus, J.L., Sánchez, C., Cabrera-Bosquet, L. (2010) Is heterosis in maize mediated through better water use?. *New Phytol* 187: 392–406.
- Avramova, V., AbdElgawad, H., Vasileva, I., Petrova, A.S., Holek, A., Mariën, J., Asard, H., Beemster, G.T.S. (2017) High Antioxidant Activity Facilitates Maintenance of Cell Division in Leaves of Drought Tolerant Maize Hybrids. *Front Plant Sci.* doi: 10.3389/fpls.2017.00084
- Barbosa, P.A.M., Fritsche-Neto, R., Andrade, M.C., Petrolí, C.D., Burgueño, J., Galli, G., Willcox, M.C., Sonder, K., Vidal-Martínez, V.A., Sifuentes-Ibarra, E., Molnar, T.L. (2021) Introgression of Maize Diversity for Drought Tolerance: Subtropical Maize Landraces as Source of New Positive Variants. *Front Plant Sci.* doi: 10.3389/fpls.2021.691211
- Benchikh-Lehocine, M., Revilla, P., Malvar, R.A., Djemel, A. (2021) Response to Selection for Reduced Anthesis-Silking Interval in Four Algerian Maize Populations. *Agronomy* 11: 382.
- Bergamaschi, H.; Dalmago, G. A.; Comiran, F., Bergonci, J. I.; Müller, A. G., França, S.; Santos, A.O; Radin, B; Bianchi, C.A.E; Pereira, P.G. (2006) Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesqui Agropecuária Bras* 41: 243–249.
- Bergamaschi, H., Dalmago, G.A., Bergonci, J.I., Bianchi, C.A.M., Müller, A.G., Comiran, F., Heckler, B.M.M. (2004) Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. *Pesqui Agropecuária Bras* 39: 831–839.
- Binott, J.J., Owuoché, J.O., Bartels, D. (2017) Physiological and molecular characterization of Kenyan barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings for salinity and drought tolerance. *Euphytica* 213: 1–23.

- Blake, M. (2015) *Maize for the Gods: Unearthing the 9,000-year History of Corn*. 17–53p.
- Brasil. Ministério da Agricultura, P. e A. (2014) Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Vegetal. Instrução normativa MAPA nº 61, de 22.12.2011 com as alterações da Instrução Normativa MAPA nº 04, de 26.02.2014.
- Brasil. Ministério da Agricultura, P. e A. (2016) Capacidade de expansão do milho-pipoca.
- Bray, E.A. (1993) Molecular responses to water deficit. *Plant Physiol* 103: 1035.
- Bray, E.A. (1997) Plant responses to water deficit. *Trends Plant Sci* 2: 48–54.
- Burnham Larish, L. L., Brewbaker, J.L. (1999) Diallel analyses of temperate and tropical popcorns. *Maydica* 44: 279–284.
- Cairns, J.E., Sanchez, C., Vargas, M., Ordoñez, R., Araus, J.L. (2012) Dissecting Maize Productivity: Ideotypes Associated with Grain Yield under Drought Stress and Well-watered Conditions. *J Integr Plant Biol* 54: 1007–1020.
- Calleja-Cabrera, J., Boter, M., Oñate-Sánchez, L., Pernas, M. (2020) Root Growth Adaptation to Climate Change in Crops. *Front Plant Sci*. doi: 10.3389/fpls.2020.00544
- Câmara, T.M.M., Bento, D.A.V., Alves, G.F., Santos, M.F., Moreira, J.U.V., De Souza Jr., C.L. (2007) Genetic parameters of drought tolerance related traits in tropical maize. *Bragantia* 66: 595–603.
- Chávez-Arias, C.C., Ligarreto-Moreno, G.A., Ramírez-Godoy, A., Restrepo-Díaz, H. (2021) Maize Responses Challenged by Drought, Elevated Daytime Temperature and Arthropod Herbivory Stresses: A Physiological, Biochemical and Molecular View. *Front Plant Sci*. doi: 10.3389/fpls.2021.702841
- Chen, J., Xu, W., Velten, J., Xin, Z., Stout, J. (2012) Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. *J Soil Water Conserv* 67: 354–364.
- Coan, M.M.D., Pinto, R.J.B., Kuki, M.C., Amaral Júnior, A.T., Figueiredo, A.S.T., Scapim, C.A., Warburton, M. (2019) Inheritance Study for Popping Expansion in Popcorn vs. Flint Corn Genotypes. *Agron J* 111: 2174–2183.

- Comas, L.H., Becker, S.R., Cruz, V.M. V., Byrne, P.F., Dierig, D.A. (2013) Root traits contributing to plant productivity under drought. *Front Plant Sci* 4: 1–16.
- Cruz, C.D., Carneiro, P.C.S., Regazzi, A.J. (2014) *Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético* -. 668p.
- Cruz, C.D., Regazzi, A.J. Carneiro, P.C.S. (2012) *Métodos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético*. 181–209p.
- da Costa, J. R., de Pinho, J. L., & Parry, M.M. (2008) Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. *R Bras Eng Agríc Ambient* 12: 443–450.
- Dao, A., Sanou, J., V.S. Traor, E., Gracen, V., Danquah, E.Y. (2017) Selection of Drought Tolerant Maize Hybrids Using Path Coefficient Analysis and Selection Index. *Pakistan J Biol Sci* 20: 132–139.
- De Lima, V.J., Do Amaral Júnior, A.T., Kamphorst, S.H., Bispo, R.B., Leite, J.T., De Oliveira Santos, T., Medeiros Schmitt, K.F., Chaves, M.M., De Oliveira, U.A., Araújo Diniz Santos, P.H., Bernardo Gonçalves, G.M., Khan, S., Moreira Guimarães, L.J. (2019) Combined dominance and additive gene effects in trait inheritance of drought-stressed and full irrigated popcorn. *Agronomy*. doi: 10.3390/agronomy9120782
- Doebley, J.F., Iltis, H.H. (2006) Taxonomy of *Zea* (Gramineae). I. A Subgeneric Classification with Key to Taxa. *Am J Bot* 67: 982.
- Durães, F.O., Magalhães, P.. (2006) Fisiologia da Produção de Milho. *Circ Tec* 76: 1–10.
- Durães, F.O.M., Santos, M.X. dos., Gama, E.E.G. e., Magalhães, P.C., Albuquerque, P.E.P., Guimarães, C.T. (2004) Fenotipagem Associada a Tolerância a Seca em Milho. 1–15.
- Durães, M., Magalhães, P.C., Santos, M.X. dos S., Lopes, M.A., Paiva, E. (1998) Intervalo entre florescimentos masculino e feminino como parâmetro fenotípico útil ao melhoramento da tolerância à seca em milho tropical para tolerância à seca. *Congr Nac Milho e Sorgo* 22: 123.

- Edmeades, G. O., Bolaños, J., Lafitte, H. R., Listman, G.M. (1995) Progress in breeding for drought tolerance in maize.
- Edmeades, G. O., Cooper, M., Lafitte, R., Zinselmeier, C., Ribaut, J. M., Habben, J. E., Banziger, M. (2000) Abiotic stresses and staple crops. *Crop Sci Prog Prospect* 33: 1029–1035.
- Elazab, A., Molero, G., Serret, M.D., Araus, J.L. (2012) Root traits and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of durum wheat under different water regimes. *Funct Plant Biol* 39: 379–393.
- Fadhli, N., Farid, M., Rafiuddin., Efendi, R., Azrai, M., Anshori, M.F. (2020) Multivariate analysis to determine secondary characters in selecting adaptive hybrid corn lines under drought stress. *Biodiversitas* 21: 3617–3624.
- Fantin, G. M., Sawazaki, E., & Barros, B.C. (1991) Avaliação de genótipos de milho-pipoca quanto a resistência a doenças e qualidade da pipoca. *Summa Phytopathol* 17: 90–99.
- Farooq, M., Hussain, M., Siddique, K.H.M. (2014) Drought Stress in Wheat during Flowering and Grain-filling Periods. *CRC Crit Rev Plant Sci* 33: 331–349.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A. (2009) Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. *In: Sustainable Agriculture*. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 153–188
- Fischer, K.S., Edmeades, G.O., Johnson, E.C. (1989) Selection for the improvement of maize yield under moisture-deficits. *F Crop Res* 22: 227–243.
- Flint-Garcia, S.A. (2017) *Kernel Evolution: From Teosinte to Maize*. 1–18p.
- Freire, A.I., Castro, E. de M., Pereira, A.M., Cruz, R.R.P., Souza, F.B.M. de., Chagas, W.F.T., Souza, J.C. de. (2020) Amylose content and micromorphology of popcorn progenies with different popping expansion volumes. *Ciência Rural*. doi: 10.1590/0103-8478cr20180962
- Gao, Y., Lynch, J.P. (2016) Reduced crown root number improves water acquisition under water deficit stress in maize (*Zea mays* L.). *J Exp Bot* 67: 4545–4557.

- Gazal, A., Ahmed Dar, Z., Ahmad Lone, A., Yousuf, N., Gulzar, S. (2018) Studies on Maize Yield under Drought Using Correlation and Path Coefficient Analysis. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 7: 516–521.
- Gechev, T.S., Van Breusegem, F., Stone, J.M., Denev, I., Laloi, C. (2006) Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death. *BioEssays* 28: 1091–1101.
- Gill, S.S., Tuteja, N. (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol Biochem* 48: 909–930.
- Golbashy, M., Ebrahimi, M., Khorasani, S. K., Choukan, R. (2010) Evaluation of drought tolerance of some corn (*Zea mays* L.) hybrids in Iran. *African J Agric Res* 5: 2714–2719.
- Goulas, Y., Cerovic, Z.G., Cartelat, A., Moya, I. (2004) Dualox: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. *Appl Opt* 43: 4488.
- Gupta, T., Crooks, N., Mulhern, W., Setty, S. T., Alvisi, L., & Walfish, M. (2016) Scalable and Private Media Consumption with Popcorn. *NSDI* 16: 91–107.
- Hallauer, A.R., Carena, M.J., Miranda Filho, J.B. (2010) *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Springer,
- Hauck, A.L., Novais, J., Griff, T.E., Bohn, M.O. (2015) Characterization of mature maize (*Zea mays* L.) root system architecture and complexity in a diverse set of Ex-PVP inbreds and hybrids. *Springerplus*. doi: 10.1186/s40064-015-1187-0
- Havaux, M. (1992) Stress Tolerance of Photosystem II in Vivo. *Plant Physiol* 100: 424–432.
- Heiser Jr, C.B. (1997) *Sementes para a civilização: a história da alimentação humana*. São Paulo: EDUSP, 253 p.
- Huffman, W.E., Jin, Y., Xu, Z. (2018) The economic impacts of technology and climate change: New evidence from U.S. corn yields. *Agric Econ* 49: 463–479.
- Hussain, H.A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., Zhang, K., Li, Y., Xu, Q., Liao, C., Wang, L. (2019) Interactive effects of drought and heat

- stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Sci Rep* 9: 3890.
- Jongdee, B., Fukai, S., Cooper, M. (2002) Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice. *F Crop Res* 76: 153–163.
- Kamphorst, S.H., Amaral Júnior, A.T. do., de Lima, V.J., Santos, P.H.A.D., Rodrigues, W.P., Vivas, J.M.S., Gonçalves, G.M.B., Schmitt, K.F.M., Leite, J.T., Vivas, M., Mora-Poblete, F., Vergara-Díaz, O., Araus Ortega, J.L., Ramalho, J.C., Campostrini, E. (2020a) Comparison of Selection Traits for Effective Popcorn (*Zea mays* L. var. Everta) Breeding Under Water Limiting Conditions. *Front Plant Sci.* doi: 10.3389/fpls.2020.01289
- Kamphorst, S.H., de Lima, V.J., Schmitt, K.F.M., Leite, J.T., Azeredo, V.C., Pena, G.F., Santos, P.H.A.D., Júnior, D.R.S., Júnior, S.B. da S., Bispo, R.B., Santos, T.O., Khan, S., Júnior, A.T. do A. (2018a) Water stress adaptation of popcorn roots and association with agronomic traits. *Genet Mol Res* 17: 1–14.
- Kamphorst, S.H., do Amaral, A.T., de Lima, V.J., Moreira Guimarães, L.J., Medeiros Schmitt, K.F., Leite, J.T., Diniz Santos, P.H.A., Chaves, M.M., Mafra, G.S., dos Santos, D.R., Cruz, C.D., Campostrini, E. (2019) Can genetic progress for drought tolerance in popcorn be achieved by indirect selection?. *Agronomy* 9: 5–10.
- Kamphorst, S.H., do Amaral Junior, A.T., de Lima, V.J., Carena, M.J., Azeredo, V.C., Mafra, G.S., Santos, P.H.A.D., Leite, J.T., Schmitt, K.F.M., dos Santos Junior, D.R., Bispo, R.B., Santos, T. de O., Oliveira, U.A. de., Pereira, J.L., Lamêgo, D.L., Carvalho, C.M., Gomes, L.P., Silva, J.G. de S., Campostrini, E. (2021a) Driving Sustainable Popcorn Breeding for Drought Tolerance in Brazil. *Front Plant Sci.* doi: 10.3389/fpls.2021.732285
- Kamphorst, S.H., Gonçalves, G.M.B., Amaral Júnior, A.T. do., Lima, V.J. de., Schmitt, K.F.M., Leite, J.T., Azeredo, V.C., Gomes, L.P., Silva, J.G. de S., Carvalho, C.M., Mafra, G.S., Daher, R.F., Campostrini, E. (2021b) Supporting Physiological Trait for Indirect Selection for Grain Yield in Drought-Stressed Popcorn. *Plants* 10: 1510.

- Kamphorst, S.H., Gonçalves, G.M.B., Do Amaral, A.T., De Lima, V.J., Leite, J.T., Schmitt, K.F.M., Dos Santos, D.R., Santos, J.S., De Oliveira, F.T., Corrêa, C.C.G., Rodrigues, W.P., Campostrini, E. (2020b) Screening of popcorn genotypes for drought tolerance using canonical correlations. *Agronomy*. doi: 10.3390/agronomy10101519
- Kamphorst, S.H., Lima, V.J. De., Leite, J.T., Carvalho, C.M., Xavier, K.B., Campostrini, E. (2018b) Popcorn breeding for water-stress tolerance or for agronomic water-use efficiency ?. *17*: 1–18.
- Kantety, R. V., Zeng, X., Bennetzen, J.L., Zehr, B.E. (1995) Assessment of genetic diversity in dent and popcorn (*Zea mays* L.) inbred lines using inter-simple sequence repeat (ISSR) amplification. *Mol Breed* 1: 365–373.
- Kistler, L., Maezumi, S.Y., Gregorio de Souza, J., Przelomska, N.A.S., Malaquias Costa, F., Smith, O., Loisel, H., Ramos-Madrugal, J., Wales, N., Ribeiro, E.R., Morrison, R.R., Grimaldo, C., Prous, A.P., Arriaza, B., Gilbert, M.T.P., de Oliveira Freitas, F., Allaby, R.G. (2018) Multiproxy evidence highlights a complex evolutionary legacy of maize in South America. *Science* (80-) 362: 1309–1313.
- Klein, S.P., Schneider, H.M., Perkins, A.C., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2020) Multiple Integrated Root Phenotypes Are Associated with Improved Drought Tolerance. *Plant Physiol* 183: 1011–1025.
- Kozłowski, T.T. (2015) *Plant Water Consumption and Response*. 135–325p.
- Lao, Y., Dong, Y., Shi, Y., Wang, Y., Xu, S., Xue, J., Zhang, X. (2021) Evaluation of Drought Tolerance in Maize Inbred Lines Selected from the Shaan A Group and Shaan B Group. *Agriculture* 12: 11.
- Leite, J.T., Amaral Junior, A.T. do., Kamphorst, S.H., Lima, V.J. de., Santos Junior, D.R. dos., Schmitt, K.F.M., Souza, Y.P. de., Santos, T. de O., Bispo, R.B., Mafra, G.S., Campostrini, E., Rodrigues, W.P. (2021) Water Use Efficiency in Popcorn (*Zea mays* L. var. everta): Which Physiological Traits Would Be Useful for Breeding?. *Plants* 10: 1450.
- Leite, J.T., Amaral Junior, A.T. do., Kamphorst, S.H., Lima, V.J. de., Santos Junior, D.R. dos., Alves, U.O., Azeredo, V.C., Pereira, J.L., Bispo, R.B., Schmidt,

- K.F.M., Viana, F.N., Viana, A.P., Vieira, H.D., Ramos, H.C.C., Ribeiro, R.M., Campostrini, E. (2022) All Are in a Drought, but Some Stand Out: Multivariate Analysis in the Selection of Agronomic Efficient Popcorn Genotypes. *Plants* 11: 2275.
- Li, B., Fan, R., Sun, G., Sun, T., Fan, Y., Bai, S., Guo, S., Huang, S., Liu, J., Zhang, H., Wang, P., Zhu, X., Song, C. (2021a) Flavonoids improve drought tolerance of maize seedlings by regulating the homeostasis of reactive oxygen species. *Plant Soil* 461: 389–405.
- Li, H., Yang, M., Zhao, C., Wang, Y., Zhang, R. (2021b) Physiological and proteomic analyses revealed the response mechanisms of two different drought-resistant maize varieties. *BMC Plant Biol* 21: 513.
- Linares, E. (1987) Seleção recorrente recíproca em famílias de meios-irmãos em milho-pipoca (*Zea mays* L). Tese Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas. Piracicaba, SP., Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 78 p.
- Liu, Z., Zhao, Y., Guo, S., Cheng, S., Guan, Y., Cai, H., Mi, G., Yuan, L., Chen, F. (2019) Enhanced crown root number and length confers potential for yield improvement and fertilizer reduction in nitrogen-efficient maize cultivars. *F Crop Res* 241: 107562.
- Lynch, J.P. (2013) Steep, cheap and deep: An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Ann Bot* 112: 347–357.
- Lynch, J.P. (2015) Root phenes that reduce the metabolic costs of soil exploration: Opportunities for 21st century agriculture. *Plant, Cell Environ* 38: 1775–1784.
- Marinho Câmara, T. M., Vieira Bento, D. A., Ferreira Alves, G., Figueiredo Santos, M., Vieira Moreira, J. U., Lopes de Souza, C. (2007) Parâmetros genéticos de caracteres relacionados à tolerância à deficiência hídrica em milho tropical. *Bragantia* 66: 595–603.
- Marler, T.E., Mickelbart, M. V. (1998) Drought, Leaf Gas Exchange, and Chlorophyll Fluorescence of Field-grown Papaya. *J Am Soc Hortic Sci* 123: 714–718.
- Mason, S., Kmail, Z., Galusha, T., Jukić, Ž. (2019) Path analysis of drought tolerant maize hybrid yield and yield components across planting dates. *J Cent Eur Agric* 20: 194–207.

- Masuka, B., Araus, J.L., Das, B., Sonder, K., Cairns, J.E. (2012) Phenotyping for Abiotic Stress Tolerance in Maize. *J Integr Plant Biol* 54: 238–249.
- Matteucci, M. B. A; Leandro, W. M; Ferreira, J. P; Melo Neto, A.J. (2009) Seleção massal para cor de tegumento de uma variedade crioula de milho-pipoca (*Zea mays* L.). *Revista Brasileira De Agroecologia*, 4(2).
- Noor, J.J., Vinayan, M.T., Umar, S., Devi, P., Iqbal, M., Seetharam, K., Zaidi, P.H. (2019) Morpho-physiological traits associated with heat stress tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.) at the reproductive stage. *Aust J Crop Sci* 13: 536–545.
- Obata, T., Witt, S., Lisek, J., Palacios-Rojas, N., Florez-Sarasa, I., Araus, J.L., Cairns, J.E., Yousfi, S., Fernie, A.R. (2015) Metabolite profiles of maize leaves in drought, heat and combined stress field trials reveal the relationship between metabolism and grain yield. *Plant Physiol* pp.01164.2015.
- Ogliari, J.B., Kist, V., Canci, A. (2007) 5 . 7 The participatory genetic enhancement of a local maize variety in Brazil. 265–271.
- Oliveira, G.H.F., Amaral, C.B., Revolti, L.T.M., Buzinaro, R., Moro, G.V. (2019) Genetic variability in popcorn synthetic population. *Acta Sci - Agron* 41: 1–9.
- PARRY, M.A.J. (2002) Rubisco Activity: Effects of Drought Stress. *Ann Bot* 89: 833–839.
- Parsons, L., Ren, Y., Yobi, A., Hurst, P., Angelovici, R., Rodriguez, O., Holding, D.R. (2020) Production and Selection of Quality Protein Popcorn Hybrids Using a Novel Ranking System and Combining Ability Estimates. *Front Plant Sci*. doi: 10.3389/fpls.2020.00698
- Peixoto, M.A., Coelho, I.F., Evangelista, J.S.P.C., Santos, S.S. de O., Alves, R.S., Pinto, J.F.N., Reis, E.F. dos., Bhering, L.L. (2021) Selection of maize hybrids: an approach with multi-trait, multi-environment, and ideotype-design. *Crop Breed Appl Biotechnol*. doi: 10.1590/1984-70332021v21n2a31
- Pimentel, C. (1999) Relações hídricas em dois híbridos de milho sob dois ciclos de deficiência hídrica. *Pesqui Agropecuária Bras* 34: 2021–2027.

- Qi, W. Z., Liu, H. H., Liu, P., Dong, S. T., Zhao, B. Q., So, H. B., Zhao, B. (2012) Morphological and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) roots from cultivars with different yield potentials. *Eur J Agron* 38: 54–63.
- Qin, L., Sun, L., Wei, L., Yuan, J., Kong, F., Zhang, Y., Miao, X., Xia, G., Liu, S. (2021) Maize SRO1e represses anthocyanin synthesis through regulating the MBW complex in response to abiotic stress. *Plant J* 105: 1010–1025.
- Romano, G., Zia, S., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Luis, J., Müller, J. (2011) Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Comput Electron Agric* 79: 67–74.
- Ruas, K.F., Baroni, D.F., de Souza, G.A.R., Bernado, W. de P., Paixão, J.S., dos Santos, G.M., Filho, J.A.M., de Abreu, D.P., de Sousa, E.F., Rakocevic, M., Rodrigues, W.P., Campostrini, E. (2022) A *Carica papaya* L. genotype with low leaf chlorophyll concentration copes successfully with soil water stress in the field. *Sci Hortic (Amsterdam)* 293: 110722.
- Rufino, C. de A., Fernandes-Vieira, J., Martín-Gil, J., de Souza Abreu Júnior, J., Tavares, L.C., Fernandes-Correa, M., Martín-Ramos, P. (2018) Water stress influence on the vegetative period yield components of different maize genotypes. *Agronomy* 8: 1–9.
- Saad-allah, K.M., Nessem, A.A., Ebrahim, M.K.H., Gad, D. (2022) Evaluation of Drought Tolerance of Five Maize Genotypes by Virtue of Physiological and Molecular Responses. *Agronomy* 12: 1–19.
- Sah, R.P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V.K., Chakravarty, M.K., Narayan, S.C., Rana, M., Moharana, D. (2020) Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Sci Rep* 10: 1–15.
- Santana, D.C., dos Santos, R.G., Teodoro, L.P.R., da Silva Junior, C.A., Baio, F.H.R., Coradi, P.C., Teodoro, P.E. (2022) Structural equation modelling and factor analysis of the relationship between agronomic traits and vegetation indices in corn. *Euphytica* 218: 44.
- Santiago Luz, M. D. L.; Dalpasquale, A.; Scapim, C. A.; Lucca e Braccini, A. D.; Royer, M. R.; Mora, F. (2005) Influência da umidade das sementes na capacidade de expansão de três genótipos de milho-pipoca (*Zea mays* L.).

- Santos, R. F., Carlesso, R. (1998) Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 2: 287–294.
- Santos, T. de O., Amaral Junior, A.T. do., Bispo, R.B., Lima, V.J. de., Kamphorst, S.H., Leite, J.T., Santos Júnior, D.R. dos., Santos, P.H.A.D., Oliveira, U.A. de., Schmitt, K.F.M., Campostrini, E., Moulin, M.M., Viana, A.P., Gravina, G. de A., Corrêa, C.C.G., Gonçalves, G.M.B. (2021) Phenotyping Latin American Open-Pollinated Varieties of Popcorn for Environments with Low Water Availability. *Plants* 10: 1211.
- Sawazaki, E. (2001) A cultura do milho-pipoca no Brasil. *O agrônomo* 53: 11–13.
- Sawazaki, E. (1995) Melhoramento do milho-pipoca. *Inst Agrônomo* 53: 18–21.
- SILVA, W. J. ; VIDAL, B. C. ; MARTINS, M. L. L. ; VARGAS, H. ; PEREIRA, A. C. ; ZERBETTO, M. ; MIRANDA, L.C.M. (1993) What Makes Popcorn Pop?. *Nat* 362: 417.
- Simova-Stoilova, L., Vassileva, V., Feller, U. (2016) Selection and Breeding of Suitable Crop Genotypes for Drought and Heat Periods in a Changing Climate: Which Morphological and Physiological Properties Should Be Considered?. *Agriculture* 6: 26.
- Smirnoff, N. (1993) The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytol* 125: 27–58.
- Steve, I.O., Babatunde, O.I. (2013) Chemical Compositions and Nutritional Properties of Popcorn-Based Complementary Foods Supplemented With Moringa oleifera Leaves Flour. *J Food Res* 2: 117.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015) *Plant physiology and development*. 747–759p.
- Teixeira, F.F., Andrade, R. V., Oliveira, A.C., Ferreira, A.D.S., Santos, M.X. (2010) Diversidade no germoplasma de milho coletado na região Nordeste do Brasil. *Rev Bras Milho e Sorgo* 1: 59–67.
- Tollenaar, M., Ahmadzadeh, A., Lee, E.A. (2004) Physiological Basis of Heterosis for Grain Yield in Maize. *Crop Sci* 44: 2086–2094.

- Trachsel, S., Kaeppler, S.M., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2011) Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant Soil* 341: 75–87.
- Tremblay, N., Wang, Z., Bélec, C. (2007) Evaluation of the dualex for the assessment of corn nitrogen status. *J Plant Nutr* 30: 1355–1369.
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., Yano, M. (2013) Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nat Genet* 45: 1097–1102.
- Viana, F.N., Chaves, M.M., Kamphorst, S.H., do Amaral Junior, A.T., Lima, V.J. de., Leite, J.T., Schmidt, K.F.M., Oliveira, U.A. de., Lamego, D.L., Pereira, J.L., Pena, G.F., Vieira, H.D., Oliveira, J.G. de., Daher, R.F., Campostrini, E., Bressan-Smith, R. (2022) Heritability of Morphophysiological Traits in Popcorn for Drought Tolerance and Their Use as Breeding Indicators of Superior Genotypes. *Agronomy* 12: 1517.
- Virost, E., Ponomarenko, A. (2015) Popcorn: critical temperature, jump and sound. *J R Soc Interface* 12: 20141247.
- Wang, B., Liu, C., Zhang, D., He, C., Zhang, J., Li, Z. (2019) Effects of maize organ-specific drought stress response on yields from transcriptome analysis. *BMC Plant Biol* 19: 335.
- Wang, J., Guan, Y., Wang, Y., Zhu, L., Wang, Q., Hu, Q., Hu, J. (2013) Establishing an Efficient Way to Utilize the Drought Resistance Germplasm Population in Wheat. *Sci World J* 2013: 1–8.
- Xavier, M., Santos, D.O.S., Leis, C.D.E., Andrade, T.D.E., Oliveira, C.D.E., Eduardo, C., Leite, P., Parentoni, S.N. (2003) Seleccionados Para Asi Sob Estresse De Água No Florescimento E Selected and Non-Selected Maize Hybrids Behavior for Asi Under Water Stress in Flowering and Grain Filling. *Rev Bras Milho e Sorgo* 2: 71–81.
- Yang, L., Fountain, J., Wang, H., Ni, X., Ji, P., Lee, R., Kemerait, R., Scully, B., Guo, B. (2015) Stress Sensitivity Is Associated with Differential Accumulation of

- Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Maize Genotypes with Contrasting Levels of Drought Tolerance. *Int J Mol Sci* 16: 24791–24819.
- Yu, H., Wu, H.S., Wang, Z.J. (2010) Evaluation of SPAD and Dualex for In-Season Corn Nitrogen Status Estimation. *Acta Agron Sin* 36: 840–847.
- Zadehbagheri, M., Azarpanah, A., & Javanmardi, S. (2014) Proline metabolite transport an efficient approach in corn yield improvement as response to drought conditions. *Nature* 566: 454–461.
- Zhang, X., Lei, L., Lai, J., Zhao, H., Song, W. (2018) Effects of drought stress and water recovery on physiological responses and gene expression in maize seedlings. *BMC Plant Biol* 18: 68.
- Zhuang, J., Wang, Y., Chi, Y., Zhou, L., Chen, J., Zhou, W., Song, J., Zhao, N., Ding, J. (2020) Drought stress strengthens the link between chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic traits. *PeerJ* 8: e10046.
- Zia, S., Romano, G., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J.L., Müller, J. (2013) Infrared Thermal Imaging as a Rapid Tool for Identifying Water-Stress Tolerant Maize Genotypes of Different Phenology. *J Agron Crop Sci* 199: 75–84.
- Zinselmeier, S.A., Lauer, M.J., Boyer, J.S. (1995) Reversing Drought-Induced Losses in Grain Yield: Sucrose Maintains Embryo Growth in Maize. *Crop Sci* 35: 1390.

APÊNDICES

Anexo 1: Correlação fenotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), em 2020.

	SD	EH	PH	CC	ANT	FLA	Fv,Fm	ABR	NBR	ACR	NCR	EL	ED	GNR	RNE	GNE	GW	GY	PE	EPV
SD	1,00	0,26	-0,14	0,24	-0,05	-0,08	0,23	0,10	0,18	0,12	0,04	-0,06	0,06	0,09	-0,02	0,06	0,13	0,27	0,09	0,33
EH	0,26	1,00	0,71	0,15	0,38	0,13	-0,08	0,06	0,16	0,16	0,16	0,02	-0,47	0,09	-0,26	-0,09	-0,16	0,07	-0,22	-0,04
PH	-0,14	0,71	1,00	0,01	0,38	0,14	-0,01	0,03	0,06	0,10	0,06	0,22	-0,27	0,17	-0,20	0,00	-0,01	-0,02	-0,20	-0,13
CC	0,24	0,15	0,01	1,00	-0,36	0,03	-0,17	0,11	-0,24	0,10	0,20	-0,11	0,16	-0,13	0,08	-0,04	0,25	0,33	-0,14	0,20
ANT	-0,05	0,38	0,38	-0,36	1,00	0,06	0,11	0,00	0,25	0,07	0,11	0,07	-0,25	0,13	-0,17	-0,01	-0,24	-0,15	-0,12	-0,17
FLA	-0,08	0,13	0,14	0,03	0,06	1,00	-0,26	0,05	-0,08	0,14	0,27	0,13	-0,16	0,07	-0,31	-0,15	0,17	0,07	-0,30	-0,09
Fv,Fm	0,23	-0,08	-0,01	-0,17	0,11	-0,26	1,00	-0,17	0,14	0,06	0,06	0,12	0,23	0,13	0,30	0,27	0,17	0,03	0,29	0,17
ABR	0,10	0,06	0,03	0,11	0,00	0,05	-0,17	1,00	-0,15	0,20	0,01	-0,09	0,10	-0,14	-0,13	-0,19	0,11	0,01	0,00	0,01
NBR	0,18	0,16	0,06	-0,24	0,25	-0,08	0,14	-0,15	1,00	-0,17	0,18	0,02	-0,18	0,07	-0,20	-0,08	-0,10	0,14	-0,10	0,12
ACR	0,12	0,16	0,10	0,10	0,07	0,14	0,06	0,20	-0,17	1,00	-0,17	0,07	0,06	0,18	0,21	0,27	-0,01	0,18	0,19	0,23
NCR	0,04	0,16	0,06	0,20	0,11	0,27	0,06	0,01	0,18	-0,17	1,00	-0,17	-0,16	-0,23	-0,23	-0,31	0,23	0,05	-0,28	-0,06
EL	-0,06	0,02	0,22	-0,11	0,07	0,13	0,12	-0,09	0,02	0,07	-0,17	1,00	0,11	0,64	-0,08	0,40	0,10	0,26	0,07	0,28
ED	0,06	-0,47	-0,27	0,16	-0,25	-0,16	0,23	0,10	-0,18	0,06	-0,16	0,11	1,00	0,10	0,48	0,37	0,41	0,26	0,04	0,24
GNR	0,09	0,09	0,17	-0,13	0,13	0,07	0,13	-0,14	0,07	0,18	-0,23	0,64	0,10	1,00	0,08	0,78	-0,15	0,27	0,09	0,30
RNE	-0,02	-0,26	-0,20	0,08	-0,17	-0,31	0,30	-0,13	-0,20	0,21	-0,23	-0,08	0,48	0,08	1,00	0,68	-0,04	0,22	0,01	0,17
GNE	0,06	-0,09	0,00	-0,04	-0,01	-0,15	0,27	-0,19	-0,08	0,27	-0,31	0,40	0,37	0,78	0,68	1,00	-0,14	0,35	0,08	0,34
GW	0,13	-0,16	-0,01	0,25	-0,24	0,17	0,17	0,11	-0,10	-0,01	0,23	0,10	0,41	-0,15	-0,04	-0,14	1,00	0,14	0,13	0,18
GY	0,27	0,07	-0,02	0,33	-0,15	0,07	0,03	0,01	0,14	0,18	0,05	0,26	0,26	0,27	0,22	0,35	0,14	1,00	0,01	0,90
PE	0,09	-0,22	-0,20	-0,14	-0,12	-0,30	0,29	0,00	-0,10	0,19	-0,28	0,07	0,04	0,09	0,01	0,08	0,13	0,01	1,00	0,42
EPV	0,33	-0,04	-0,13	0,20	-0,17	-0,09	0,17	0,01	0,12	0,23	-0,06	0,28	0,24	0,30	0,17	0,34	0,18	0,90	0,42	1,00

Correlação genotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), nas safras de 2020 (diagonal superior) e 2021 (diagonal inferior). EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; Fv/Fm – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. * e **, representam diferenças significativas em nível de 5 e 1%, pelo teste de Pearson.

Anexo 2: Correlação fenotípica entre as características estudadas na condição bem irrigada (WW), em 2020.

	SD	EH	PH	CC	ANT	FLA	Fv,Fm	ABR	NBR	ACR	NCR	EL	ED	GNR	RNE	GNE	GW	GY	PE	EPV
SD	1,00	0,26	0,09	0,37	-0,26	-0,12	-0,11	0,02	-0,05	0,01	0,04	0,28	0,27	0,07	-0,13	-0,01	0,32	0,38	-0,08	0,35
EH	0,26	1,00	0,74	0,11	-0,17	-0,03	0,01	-0,02	0,11	0,20	-0,11	0,28	-0,06	0,27	-0,17	0,16	-0,08	0,20	-0,21	0,12
PH	0,09	0,74	1,00	0,18	-0,18	-0,02	-0,03	0,14	0,16	0,09	-0,02	0,17	-0,01	0,06	-0,09	0,00	0,04	0,02	-0,16	-0,06
CC	0,37	0,11	0,18	1,00	-0,16	0,07	-0,17	0,00	-0,14	-0,03	0,08	0,30	0,27	0,14	-0,11	0,06	0,40	0,13	-0,06	0,09
ANT	-0,26	-0,17	-0,18	-0,16	1,00	-0,11	-0,14	0,09	0,32	-0,04	0,25	-0,07	-0,21	-0,19	0,16	-0,08	-0,20	-0,20	0,23	-0,09
FLA	-0,12	-0,03	-0,02	0,07	-0,11	1,00	-0,09	-0,07	-0,02	0,11	0,23	0,16	-0,11	0,29	-0,10	0,18	0,01	0,21	0,06	0,20
Fv,Fm	-0,11	0,01	-0,03	-0,17	-0,14	-0,09	1,00	-0,17	-0,10	0,16	-0,10	0,15	0,16	0,05	-0,02	0,06	0,16	0,01	0,00	0,03
ABR	0,02	-0,02	0,14	0,00	0,09	-0,07	-0,17	1,00	0,00	0,45	0,07	-0,03	-0,07	-0,10	-0,22	-0,22	0,13	-0,04	-0,01	-0,10
NBR	-0,05	0,11	0,16	-0,14	0,32	-0,02	-0,10	0,00	1,00	-0,14	0,32	0,13	-0,22	-0,06	-0,10	-0,10	-0,07	-0,16	-0,28	-0,26
ACR	0,01	0,20	0,09	-0,03	-0,04	0,11	0,16	0,45	-0,14	1,00	-0,20	0,06	0,16	-0,06	-0,01	-0,06	0,13	0,14	-0,01	0,09
NCR	0,04	-0,11	-0,02	0,08	0,25	0,23	-0,10	0,07	0,32	-0,20	1,00	0,14	-0,06	0,18	-0,11	0,10	-0,10	-0,01	-0,03	-0,04
EL	0,28	0,28	0,17	0,30	-0,07	0,16	0,15	-0,03	0,13	0,06	0,14	1,00	-0,07	0,56	-0,34	0,33	0,29	0,34	0,00	0,33
ED	0,27	-0,06	-0,01	0,27	-0,21	-0,11	0,16	-0,07	-0,22	0,16	-0,06	-0,07	1,00	-0,09	0,55	0,20	0,49	0,23	-0,38	0,03
GNR	0,07	0,27	0,06	0,14	-0,19	0,29	0,05	-0,10	-0,06	-0,06	0,18	0,56	-0,09	1,00	-0,13	0,84	-0,03	0,41	0,05	0,38
RNE	-0,13	-0,17	-0,09	-0,11	0,16	-0,10	-0,02	-0,22	-0,10	-0,01	-0,11	-0,34	0,55	-0,13	1,00	0,42	-0,05	0,02	-0,15	-0,06
GNE	-0,01	0,16	0,00	0,06	-0,08	0,18	0,06	-0,22	-0,10	-0,06	0,10	0,33	0,20	0,84	0,42	1,00	-0,05	0,38	-0,03	0,31
GW	0,32	-0,08	0,04	0,40	-0,20	0,01	0,16	0,13	-0,07	0,13	-0,10	0,29	0,49	-0,03	-0,05	-0,05	1,00	0,25	-0,21	0,15
GY	0,38	0,20	0,02	0,13	-0,20	0,21	0,01	-0,04	-0,16	0,14	-0,01	0,34	0,23	0,41	0,02	0,38	0,25	1,00	-0,11	0,89
PE	-0,08	-0,21	-0,16	-0,06	0,23	0,06	0,00	-0,01	-0,28	-0,01	-0,03	0,00	-0,38	0,05	-0,15	-0,03	-0,21	-0,11	1,00	0,31
EPV	0,35	0,12	-0,06	0,09	-0,09	0,20	0,03	-0,10	-0,26	0,09	-0,04	0,33	0,03	0,38	-0,06	0,31	0,15	0,89	0,31	1,00

Correlação genotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), nas safras de 2020 (diagonal superior) e 2021 (diagonal inferior). EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; Fv/Fm – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. * e **, representam diferenças significativas em nível de 5 e 1%, pelo teste de Pearson.

Anexo 3: Correlação fenotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), em 2021.

	SD	EH	PH	CC	ANT	FLA	Fv,Fm	ABR	NBR	ACR	NCR	EL	ED	GNR	RNE	GNE	GW	GY	PE	EPV
SD	1,00	0,28	0,18	0,24	-0,32	0,02	0,16	-0,11	0,02	-0,07	0,02	0,14	-0,01	0,12	0,20	0,18	0,05	0,23	-0,16	0,09
EH	0,28	1,00	0,74	-0,08	0,12	0,22	0,34	-0,18	0,12	-0,10	0,31	0,21	0,08	0,40	0,18	0,37	0,00	0,01	-0,11	-0,08
PH	0,18	0,74	1,00	0,02	-0,07	-0,01	0,21	-0,30	0,19	-0,13	0,40	0,23	0,13	0,20	0,06	0,21	0,20	-0,18	0,01	-0,19
CC	0,24	-0,08	0,02	1,00	-0,21	0,18	-0,07	0,16	-0,22	0,16	0,08	-0,08	0,06	-0,08	0,06	-0,04	0,21	0,01	-0,03	-0,04
ANT	-0,32	0,12	-0,07	-0,21	1,00	0,18	0,01	0,06	0,02	0,05	0,05	0,08	0,00	0,16	-0,13	0,04	-0,12	-0,08	-0,12	-0,08
FLA	0,02	0,22	-0,01	0,18	0,18	1,00	0,20	-0,05	0,03	0,09	0,24	-0,12	-0,09	0,11	0,18	0,14	0,11	0,23	-0,05	0,15
Fv,Fm	0,16	0,34	0,21	-0,07	0,01	0,20	1,00	-0,07	-0,12	-0,09	0,00	-0,23	-0,33	-0,20	-0,25	-0,23	0,18	-0,10	-0,06	-0,16
ABR	-0,11	-0,18	-0,30	0,16	0,06	-0,05	-0,07	1,00	-0,37	0,46	-0,18	-0,08	0,04	0,08	0,00	0,03	-0,10	0,15	0,07	0,23
NBR	0,02	0,12	0,19	-0,22	0,02	0,03	-0,12	-0,37	1,00	-0,30	0,24	0,05	-0,02	-0,01	0,16	0,07	0,14	0,06	-0,06	0,02
ACR	-0,07	-0,10	-0,13	0,16	0,05	0,09	-0,09	0,46	-0,30	1,00	0,03	0,06	0,10	0,14	-0,02	0,10	0,13	-0,10	0,10	-0,03
NCR	0,02	0,31	0,40	0,08	0,05	0,24	0,00	-0,18	0,24	0,03	1,00	0,01	0,03	-0,05	-0,04	-0,03	0,16	-0,04	-0,04	-0,09
EL	0,14	0,21	0,23	-0,08	0,08	-0,12	-0,23	-0,08	0,05	0,06	0,01	1,00	0,44	0,62	0,23	0,58	0,00	0,35	0,07	0,31
ED	-0,01	0,08	0,13	0,06	0,00	-0,09	-0,33	0,04	-0,02	0,10	0,03	0,44	1,00	0,42	0,41	0,49	0,19	0,28	0,16	0,28
GNR	0,12	0,40	0,20	-0,08	0,16	0,11	-0,20	0,08	-0,01	0,14	-0,05	0,62	0,42	1,00	0,54	0,94	0,02	0,27	0,12	0,26
RNE	0,20	0,18	0,06	0,06	-0,13	0,18	-0,25	0,00	0,16	-0,02	-0,04	0,23	0,41	0,54	1,00	0,77	0,10	0,39	0,15	0,36
GNE	0,18	0,37	0,21	-0,04	0,04	0,14	-0,23	0,03	0,07	0,10	-0,03	0,58	0,49	0,94	0,77	1,00	0,09	0,34	0,17	0,33
GW	0,05	0,00	0,20	0,21	-0,12	0,11	0,18	-0,10	0,14	0,13	0,16	0,00	0,19	0,02	0,10	0,09	1,00	-0,01	0,39	0,10
GY	0,23	0,01	-0,18	0,01	-0,08	0,23	-0,10	0,15	0,06	-0,10	-0,04	0,35	0,28	0,27	0,39	0,34	-0,01	1,00	0,07	0,90
PE	-0,16	-0,11	0,01	-0,03	-0,12	-0,05	-0,06	0,07	-0,06	0,10	-0,04	0,07	0,16	0,12	0,15	0,17	0,39	0,07	1,00	0,47
EPV	0,09	-0,08	-0,19	-0,04	-0,08	0,15	-0,16	0,23	0,02	-0,03	-0,09	0,31	0,28	0,26	0,36	0,33	0,10	0,90	0,47	1,00

Correlação genotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), nas safras de 2020 (diagonal superior) e 2021 (diagonal inferior). EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; F_v/F_m – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. * e **, representam diferenças significativas em nível de 5 e 1%, pelo teste de Pearson.

Anexo 4: Correlação fenotípica entre as características estudadas na condição bem irrigada (WW), em 2021.

	SD	EH	PH	CC	ANT	FLA	Fv,Fm	ABR	NBR	ACR	NCR	EL	ED	GNR	RNE	GNE	GW	GY	PE	EPV
SD	1,00	0,29	0,20	0,10	-0,46	-0,03	-0,14	0,19	0,17	-0,07	0,16	0,26	-0,03	0,11	-0,04	0,06	0,14	0,05	0,21	0,16
EH	0,29	1,00	0,70	-0,01	-0,05	0,13	0,19	0,08	0,00	0,06	-0,06	0,12	0,04	-0,21	-0,06	-0,19	-0,04	0,08	0,03	0,08
PH	0,20	0,70	1,00	0,02	-0,05	-0,02	0,26	0,08	-0,16	-0,04	-0,27	0,07	-0,03	-0,18	0,02	-0,12	-0,17	-0,14	0,05	-0,08
CC	0,10	-0,01	0,02	1,00	-0,29	0,02	0,34	0,08	-0,07	-0,01	-0,10	0,03	0,23	-0,16	0,12	-0,06	-0,05	-0,17	0,21	-0,07
ANT	-0,46	-0,05	-0,05	-0,29	1,00	0,03	0,07	0,05	-0,07	0,36	-0,01	0,00	0,07	-0,04	0,08	-0,01	-0,08	0,05	-0,14	-0,05
FLA	-0,03	0,13	-0,02	0,02	0,03	1,00	0,01	0,21	-0,02	-0,05	0,15	0,07	0,26	0,14	0,18	0,20	0,26	0,14	0,04	0,13
Fv,Fm	-0,14	0,19	0,26	0,34	0,07	0,01	1,00	0,03	-0,13	0,01	-0,11	-0,09	-0,08	-0,20	-0,05	-0,18	-0,31	-0,12	0,02	-0,10
ABR	0,19	0,08	0,08	0,08	0,05	0,21	0,03	1,00	-0,07	0,49	-0,04	0,26	0,05	0,23	0,13	0,26	0,24	-0,07	-0,02	-0,09
NBR	0,17	0,00	-0,16	-0,07	-0,07	-0,02	-0,13	-0,07	1,00	-0,10	0,47	-0,12	0,06	-0,12	-0,21	-0,20	-0,04	-0,05	0,10	-0,01
ACR	-0,07	0,06	-0,04	-0,01	0,36	-0,05	0,01	0,49	-0,10	1,00	-0,21	0,14	-0,05	0,07	0,04	0,07	0,12	0,08	-0,13	0,00
NCR	0,16	-0,06	-0,27	-0,10	-0,01	0,15	-0,11	-0,04	0,47	-0,21	1,00	0,06	-0,07	-0,07	-0,12	-0,11	0,16	-0,05	-0,20	-0,15
EL	0,26	0,12	0,07	0,03	0,00	0,07	-0,09	0,26	-0,12	0,14	0,06	1,00	0,17	0,59	0,23	0,55	0,26	0,23	0,07	0,22
ED	-0,03	0,04	-0,03	0,23	0,07	0,26	-0,08	0,05	0,06	-0,05	-0,07	0,17	1,00	0,09	0,49	0,32	0,46	0,38	-0,06	0,30
GNR	0,11	-0,21	-0,18	-0,16	-0,04	0,14	-0,20	0,23	-0,12	0,07	-0,07	0,59	0,09	1,00	0,26	0,87	0,19	0,31	0,01	0,26
RNE	-0,04	-0,06	0,02	0,12	0,08	0,18	-0,05	0,13	-0,21	0,04	-0,12	0,23	0,49	0,26	1,00	0,70	0,27	0,49	0,00	0,42
GNE	0,06	-0,19	-0,12	-0,06	-0,01	0,20	-0,18	0,26	-0,20	0,07	-0,11	0,55	0,32	0,87	0,70	1,00	0,28	0,47	0,02	0,40
GW	0,14	-0,04	-0,17	-0,05	-0,08	0,26	-0,31	0,24	-0,04	0,12	0,16	0,26	0,46	0,19	0,27	0,28	1,00	0,27	-0,07	0,23
GY	0,05	0,08	-0,14	-0,17	0,05	0,14	-0,12	-0,07	-0,05	0,08	-0,05	0,23	0,38	0,31	0,49	0,47	0,27	1,00	-0,10	0,87
PE	0,21	0,03	0,05	0,21	-0,14	0,04	0,02	-0,02	0,10	-0,13	-0,20	0,07	-0,06	0,01	0,00	0,02	-0,07	-0,10	1,00	0,37
EPV	0,16	0,08	-0,08	-0,07	-0,05	0,13	-0,10	-0,09	-0,01	0,00	-0,15	0,22	0,30	0,26	0,42	0,40	0,23	0,87	0,37	1,00

Correlação genotípica entre as características estudadas na condição com déficit hídrico (WS), nas safras de 2020 (diagonal superior) e 2021 (diagonal inferior). EH – Altura de espigas; PH – Altura de plantas; SD – Diâmetro de colmo; EL – Comprimento de espigas; ED – Diâmetro de espigas; RNE – Número de fileiras por espigas; GNR – Número de grãos por fileira; GNE – Número de grãos por espiga; 100GW – Massa de 100 grãos; GY – Rendimento de grãos; PE – Capacidade de expansão; EPV – Volume de pipoca expandida por ha; CC – Teor relativo de clorofilas; ANT – Teor relativo de antocianinas; FLA – Teor relativo de flavonoides; NBI – Índice de balanço de nitrogênio; Fv/Fm – Fluorescência de clorofilas; ABR – Ângulo de raízes de suporte; ACR – Ângulo de raízes da coroa; NBR – Número de raízes de suporte; NCR – Número de raízes da coroa; DBR – Densidade de raízes de suporte; and DCR – Densidade de raízes da coroa. * e **, representam diferenças significativas em nível de 5 e 1%, pelo teste de Pearson.