



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**MARCOS ADRIANO SANTOS SILVA**

**IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DISCRIMINATIVAS EM MILHO TROPICAL  
PARA ESTUDOS ENVOLVENDO CONDIÇÕES CONTRASTANTES DE  
SUPRIMENTO DE ÁGUA**

**FORTALEZA**

**2023**

MARCOS ADRIANO SANTOS SILVA

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DISCRIMINATIVAS EM MILHO TROPICAL PARA  
ESTUDOS ENVOLVENDO CONDIÇÕES CONTRASTANTES DE SUPRIMENTO DE  
ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharelado em Agronomia.

Orientador: Prof. D. Sc. Júlio César do Vale Silva

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S581i Silva, Marcos Adriano Santos.

Identificação de variáveis discriminativas em milho tropical para estudos envolvendo condições contrastantes de suprimento de água / Marcos Adriano Santos Silva. – 2023.  
32 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Júlio César do Vale Silva.

1. Componentes principais. 2. Herdabilidade. 3. Estresse abiótico. I. Título.

CDD 630

---

MARCOS ADRIANO SANTOS SILVA

IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DISCRIMINATIVAS EM MILHO TROPICAL PARA  
ESTUDOS ENVOLVENDO CONDIÇÕES CONTRASTANTES DE SUPRIMENTO DE  
ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao curso de graduação em  
Agronomia do Centro de Ciências Agrárias  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do grau de  
bacharelado em Agronomia.

Aprovada em 30/06/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. D. Sc. Júlio César do Vale Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

D. Sc. Ingrid Pinheiro Machado  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

M. Sc. Fernanda Carla Ferreira de Pontes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus avós, José e Margarida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao prof. Dr. Sc. Júlio César do Vale Silva, pela excelente orientação.

Aos integrantes da Banca examinadora, Ingrid Pinheiro e Fernanda Carla, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos outros membros do grupo de pesquisa, Maria Valnice, Lucas Lobo e Anderson Reinbold, por toda ajuda prestada.

A turma 2017.2 por todo apoio, amizade e incentivo.

## RESUMO

O déficit hídrico é o principal fator abiótico responsável por perdas no cultivo do milho. Estudos envolvendo tal estresse enfrentam muitos desafios, tendo em vista que as condições experimentais devem ser minuciosamente manejadas e as variáveis envolvidas apresentam alta complexidade. Com isso, surge a necessidade de estudar variáveis que apresentem maior poder discriminativo na cultura do milho sob déficit hídrico para subsidiar estudos futuros nestas condições. Assim, o objetivo deste trabalho foi identificar variáveis relevantes e discriminativas para estudos em condições contrastantes de suprimento de água. Para isso, foi utilizado um painel com 360 linhagens de milho tropical. Os experimentos foram conduzidos em 2020 e 2021 na área experimental da Universidade Federal do Ceará. Foram impostas duas condições experimentais: suprimento de água ideal (AI) e déficit hídrico (DH), quatro para cada condição, no delineamento experimental linha × coluna. As avaliações fenotípicas foram realizadas quando a maioria das plantas atingiram o estágio fenológico V6. As variáveis da parte aérea foram: altura de planta (AP), diâmetro do colmo (DC), número de folhas, teor de clorofila (SPAD) e massa seca (MSPA). E as variáveis de raiz foram: comprimentos de raízes laterais (CRL) e axiais (CRA), áreas superficiais de raízes laterais (ASRL) e axiais (ASRA), volume de raízes laterais (VRL) e axiais (VRA), área convexa do sistema radicular (ACR) e massa seca das raízes (MSR). Os resultados obtidos no estudo, permitiram observar os efeitos do DH às variáveis estudadas, tornando-se notório que as variáveis das classes de raízes axiais e laterais (comprimento, área superficial e volume) apresentaram maior poder discriminativo, apresentando alta correlação entre si, possibilitando descarte, ficando mantida a variável comprimento, em ambas as classes, por praticidade. Entretanto, ao analisar as herdabilidades das variáveis estudadas, percebeu-se que as maiores médias foram de AP, MSPA e DC em AI; e MSPA, CRA e DC em DH. Conclui-se que, as variáveis das classes de raízes axiais e laterais foram classificadas como discriminativas. E as variáveis indicadas para subsidiar futuros estudos foram: AP, MSPA e DC em AI; e MSPA, CRA e DC em DH.

**Palavras-chave:** componentes principais; herdabilidade; estresse abiótico.

## ABSTRACT

Hydric deficit is the main abiotic factor responsible for losses in maize cultivation. Studies involving such stress face many challenges, considering that the experimental conditions must be meticulously managed and the variables involved are highly complex. With this, the need arises to study variables that present greater discriminative power in the maize crop under hydric deficit to subsidize future studies in these conditions. Thus, the objective of this work was to identify relevant and discriminative variables for studies in contrasting conditions of water supply. For this, a panel with 360 tropical maize lineages was used. The experiments were conducted in 2020 and 2021 in the experimental area of the Federal University of Ceará. Two experimental conditions were imposed: ideal water supply (AI) and hydric deficit (DH), four for each condition, in the row × column experimental design. Phenotypic evaluations were performed when most of the plants reached the phenological stage V6. The aerial part variables were: plant height (AP), stem diameter (DC), number of leaves, chlorophyll content (SPAD) and dry mass (MSPA). And the root variables were: lengths of lateral (CRL) and axial roots (CRA), superficial area of lateral (ASRL) and axial roots (ASRA), volume of lateral (VRL) and axial roots (VRA), convex area of root system (ACR) and root dry mass (MSR). Allowed to observe the effects of DH to the variables studied, becoming it notorious that the variables of the classes of axial and lateral roots (length, superficial area and volume) showed greater discriminative power, presenting high correlation each other, enabling discard, keeping the variable length, in both classes, for practicality. However, when analyzing the heritabilities of the variables studied, it was noticed that the highest averages were for AP, MSPA and DC in AI; and MSPA, CRA and DC in HD. It is concluded that the variables of the axial and lateral root classes were classified as discriminative. And the variables indicated to subsidize future studies were: AP, MSPA and DC in AI; and MSPA, CRA and DC in DH.

**Keywords:** main components; heritability; abiotic stress.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Dispersão dos caracteres considerando os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) nos oito experimentos conduzidos. A) AI\_1; B) AI\_2; C) AI\_3; D) AI\_4; E) DH\_1; F) DH\_2; G) DH\_3; H) DH\_4. Fortaleza, CE, 2023..... 22
- Figura 2 – Correlações fenotípicas entre os caracteres. A) ambientes com suprimento de água ideal (AI) e B) ambientes com déficit hídrico (DH). Fortaleza, CE, 2023..... 24

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Descrição do *layout* experimental dos oito experimentos. Fortaleza, CE, 2023..... 14
- Tabela 2 – Valores médios para os caracteres altura de planta (AP – em cm), diâmetro do colmo (DC – em mm), índice SPAD, massa seca de parte aérea (MSPA – em g), massa seca das raízes (MSR – em g), comprimentos de raízes laterais (CRL – em cm) e axiais (CRA – em cm), áreas superficiais de raízes laterais (ASRL – em cm<sup>2</sup>) e axiais (ASRA – em cm<sup>2</sup>), volume de raízes laterais (VRL – em cm<sup>3</sup>) e axiais (VRA – em cm<sup>3</sup>) e área convexa do sistema radicular (ACR – em cm<sup>2</sup>). Fortaleza, CE, 2023..... 18
- Tabela 3 – Herdabilidades médias dos caracteres altura de planta (AP – em cm), diâmetro do colmo (DC – em mm), índice SPAD, massa seca de parte aérea (MSPA – em g), massa seca das raízes (MSR – em g), comprimento de raízes laterais (CRL – em cm) e axiais (CRA – em cm) e área convexa do sistema radicular (ACR – em cm<sup>2</sup>) ao longo dos oito ambientes estudados. Fortaleza, CE, 2023..... 26

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Material genético e condução experimental</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Obtenção de dados fenotípicos das variáveis</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Análises genético-estatísticas</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Médias das variáveis nas condições AI e DH</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Importância relativa e recomendação de descarte de variáveis</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Médias das herdabilidades nas condições AI e DH</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estresse hídrico baseia-se na falta de água presente no solo, em quantidades abaixo das adequadas para que a planta consiga realizar suas atividades fisiológicas, prejudicando processos vitais para a planta (CAMPOS *et al.*, 2021). Os efeitos desse estresse acarretam mudanças fisiológicas, anatômicas e bioquímicas nas plantas, em diferentes magnitudes, dependendo da planta e do tempo de exposição ao estresse (CAMPOS *et al.*, 2021). Segundo Liu *et al.* (2012), quando a planta é submetida ao déficit hídrico, esta fecha seus estômatos e diminui sua taxa fotossintética, devido redução na assimilação de CO<sub>2</sub>. Esse comportamento prejudica a produção de carboidratos pelas plantas, já que, elas necessitam absorver água do solo para assimilar o CO<sub>2</sub> da atmosfera e produzir carboidratos, fazendo com que ocorra redução de massa seca de raiz e parte aérea (CLEMENTE, 2017; TAIZ; ZEIGER, 2013).

O milho apresenta alta sensibilidade ao estresse hídrico, sendo este o principal fator abiótico responsável por perdas em seu cultivo (CLEMENTE, 2017). Em se tratando de parte aérea, observa-se diminuição no desenvolvimento vegetativo e expansão foliar, gerando redução da área transpiratória, influenciando de forma negativa a fotossíntese e ocasionando perdas em produção (CLEMENTE, 2017; LOPES *et al.*, 2011). Quanto às raízes, percebe-se maior desenvolvimento em relação à parte aérea, pois assim, a planta consegue alcançar camadas mais profundas e com maior umidade do solo, sendo esta, a estratégia utilizada como forma de resistir ao déficit hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2013). Com isso, surge a necessidade de estudar variáveis que apresentem maior poder discriminatório na cultura do milho sob déficit hídrico a fim de subsidiar estudos futuros nestas condições.

Embora se tenha avançado muito em ferramentas moleculares, a forma mais utilizada para selecionar plantas em estudos envolvendo déficit hídrico é ainda baseado em fenótipos (AVRAMOVA *et al.*, 2016). Para a realização da fenotipagem a planta deve ser submetida a repetições, e se possível, à avaliações em mais de um ambiente, com o objetivo de obter informações mais realistas para as variáveis estudadas (ZIYOMO; BERNARDO, 2013). Adicionalmente, é corriqueira a realização de estudo de herdabilidade das variáveis com o intuito de conhecer a complexidade desta(s) no processo de seleção (GOMES *et al.*, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2011).

No contexto do melhoramento genético, o ideal é que uma variável de interesse apresente alta herdabilidade. Na prática, quando isto acontece, significa que há uma alta associação entre genótipo e fenótipo, sendo o último uma boa medida para identificar os melhores materiais genéticos (CAMACHO; CARABALLO, 1994). Do contrário, a variável sofre considerável influência do ambiente e maiores dificuldades são esperadas no processo de seleção (SABAGHNIA *et al.*, 2010; BRANDLE; MCVETTY, 1989).

Entretanto, na maioria das vezes, os estudos não visam apenas uma variável, sendo necessário o estudo das possíveis relações entre diferentes variáveis (SABAGHNIA *et al.*, 2010). E para auxiliar nesse processo análises estatísticas são utilizadas, a exemplo de análises de correlação (SABAGHNIA *et al.*, 2010; LEILAH; AL-KHATEEB, 2005). Essa ferramenta permite conhecer o grau de relacionamento entre as distintas variáveis consideradas no estudo, com possibilidade de descarte daquelas que são fortemente associadas a outras, além de permitir delinear estratégias de seleção com base noutras que são mais fáceis de mensurar (RODRIGUES *et al.*, 2011). Baseado no que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi identificar variáveis relevantes e discriminativas para estudos em condições contrastantes de suprimento de água.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material genético e condução experimental

Para a realização deste trabalho, foi utilizado um painel público com 360 linhagens endogâmicas de milho tropical (YASSUE *et al.*, 2021). Por tratar-se de um estudo envolvendo condições contrastantes de suprimento de água ideal (AI) e de déficit hídrico (DH), anteriormente aos experimentos principais, conduziu-se um experimento piloto com cinco linhagens (escolhidas aleatoriamente dentro do painel) avaliadas em cinco níveis de suprimento de água. Tais níveis foram definidos por meio de regressão, sendo realizada uma curva de retenção de água, no substrato, antes do experimento piloto para obtenção da capacidade de campo. Depois disso, foram determinadas as seguintes lâminas de irrigação: 100% de água disponível (AD), 80% de AD; 70% de AD; 50% de AD e 40% de AD. Por fim, as lâminas de 80% de AD e de 40% de AD foram escolhidas como os pontos de disponibilidade de AI e DH, respectivamente.

Foram conduzidos oito experimentos principais no segundo semestre de 2020 e 2021 na área experimental do setor de agricultura da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza-CE, a 3°44'24.27" de latitude S e 38°34'29.93" de longitude O. O município de Fortaleza é caracterizado como tropical quente sub-úmido, com chuvas predominantes de janeiro a maio (IPECE, 2017).

As sementeiras foram realizadas em vasos plásticos com capacidade de 3 litros, contendo substrato na proporção 3:1 (arisco: húmus de minhoca). Semearam-se 2 sementes por vaso, a uma profundidade média de 3-4 cm. O desbaste foi efetuado quando as plântulas estavam com duas folhas completamente desenvolvidas (V2), deixando apenas uma plântula por vaso (parcela). Neste mesmo estágio fenológico, também se iniciou a imposição do déficit hídrico, que permaneceu até o estágio V6 (colheita). As adubações de plantio e cobertura foram baseadas na análise química do substrato, levando em consideração as recomendações para a cultura, de modo a isolar o estresse nutricional durante a condução experimental. Os experimentos principais foram conduzidos sob AI e DH, quatro para cada condição, no delineamento experimental linha × coluna (Tabela 1). Cada experimento continha três blocos e, nestes, as parcelas foram distribuídas em 9 colunas com 38 a 40 linhas,

espaçados por 0,50 m. Buscou-se sempre equilibrar o número de genótipos entre os experimentos de AI e DH.

Tabela 1 – Descrição do *layout* experimental dos oito experimentos. Fortaleza, CE, 2023.

<b>Experimentos</b>	<b>Linhas</b>	<b>Colunas</b>	<b>Blocos</b>	<b>Genótipos</b>
AI_1	40	9	3	354
AI_2	40	9	3	354
AI_3	38	9	3	338
AI_4	38	9	3	338
DH_1	40	9	3	354
DH_2	40	9	3	354
DH_3	38	9	3	338
DH_4	38	9	3	338

Fonte: DoVale, JC (2023)

Por ser conduzido em campo aberto, o controle da irrigação de cada experimento foi realizado de forma manual e diária. Assim, usaram-se 15 amostras aleatórias para calcular a média do peso diário dos vasos dentro de cada nível de disponibilidade de água. Posteriormente, era calculada a diferença entre o peso atual e o peso total obtido em AI e DH para reposição do volume de água dentro de cada nível. Vale destacar que, para cada estágio vegetativo, foi obtido o peso médio das plantas, a fim de subtrair juntamente com o peso atual e este não interferir no volume de água a ser repostado.

## **2.2 Obtenção de dados fenotípicos das variáveis**

As avaliações fenotípicas foram realizadas quando a maioria das plantas estavam em estágio fenológico V6. As variáveis consideradas na parte aérea das plantas foram: altura de planta (AP – em cm) - mensurada do solo à inserção da folha bandeira, medido com uso de uma régua graduada; diâmetro do colmo (DC – em mm) - média de duas medidas acima do nível do solo no segundo nó do colmo obtido com uso de um paquímetro; número de folhas (NF) e a estimativa do teor de clorofila -

utilizando clorofilômetro portátil (SPAD), aferindo três folhas por planta para obter a média, entre 10 e 12h da manhã. Posteriormente, as plantas foram cortadas rentes ao solo, acondicionadas em sacos e transferidas para uma estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, por 72 horas, para a obtenção da massa seca de parte aérea (MSPA – em g).

Por ocasião da colheita, o sistema radicular foi separado da parte aérea, o substrato removido e as raízes lavadas cuidadosamente com água. Posteriormente, foram armazenadas em potes plásticos com capacidade de 1L, contendo uma solução de água e álcool 70% (proporção 3:1, respectivamente) para conservação, até o período das fotografias. Estas, por sua vez, foram realizadas sobre uma estrutura permanente com formato de cubo, com o intuito de uniformizar a distância da câmera até as raízes (objeto/alvo). Para melhor distribuição de luzes em seu interior, fixou-se LEDs de 12W, em todas as direções, a fim de evitar a formação de sombras. Após a obtenção das imagens, as raízes foram levadas e mantidas em secadora de circulação forçada de ar, a uma temperatura de 40 °C, por 4 dias, tempo necessário para constância de massa. Após este período, foi determinada a massa seca das raízes (MSR – em g) em balança de precisão com quatro casas decimais.

As imagens capturadas pelo dispositivo (celular), em formato JPEG foram analisadas pelo *software* RhizoVision Explorer® para extração de dados. Foram consideradas as variáveis: comprimento de raízes laterais (CRL – em cm) e axiais (CRA – em cm), áreas superficiais de raízes laterais (ASRL – em cm<sup>2</sup>) e axiais (ASRA – em cm<sup>2</sup>), volume de raízes laterais (VRL – em cm<sup>3</sup>) e axiais (VRA – em cm<sup>3</sup>) e área convexa do sistema radicular (ACR – em cm<sup>2</sup>). O nível de limite da imagem foi ajustado uma a uma e o limite de poda de raiz foi definido com 5 pixels para todas as imagens. Considerou-se um limiar de diâmetro de raiz de 0,50 mm para distinguir as raízes axiais das raízes laterais. Assim, foram consideradas raízes laterais fragmentos com diâmetro igual ou inferior a 0,50 mm, e para as raízes axiais, fragmentos com diâmetro maior que 0,50 mm (TRACHSEL et al., 2009).

### **2.3 Análises genético-estatísticas**

Análises de correlação foram realizadas com dados brutos entre as variáveis discriminadas anteriormente. Desse modo, as variáveis da parte aérea e do sistema radicular foram analisadas nas duas condições de suprimento de água (AI e

DH). Para isso, usou-se a correlação de *Pearson*, com a hipótese de correlação igual a zero analisada pelo teste t com  $n-2$  graus de liberdade ( $p < 0,05$ ), usando o pacote *corrplot* (WEI e SIMKO, 2021) da versão do *software* R 4.03 (R CORE TEAM, 2021).

*Outliers* foram eliminados via função *boxplot.stats* na base do *software* R, seguida da verificação de ajuste via *qqplots* para os dados dos oito experimentos, descritos anteriormente. Esses “novos” conjuntos de dados ajustados foram usados para as análises descritas abaixo.

Equações de modelos lineares mistos foram ajustadas para obter o melhor preditor linear não-viesado (BLUP) pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML) para cada variável estudada em AI e DH, pelo pacote *spATS* (RODRIGUEZ-ALVAREZ *et al.*, 2022). Essas análises foram realizadas usando o seguinte modelo:

$$y = X_1b + X_2NL + Z_1r + Z_2c + Z_3g + \varepsilon$$

Em que  $y$  é o vetor de valores fenotípicos das linhagens do painel para cada variável estudada;  $X_1$  e  $X_2$  são matrizes de incidência para os efeitos fixos;  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  são matrizes de incidência para os efeitos aleatórios;  $b$  é efeito fixo de bloco;  $r$  é o efeito aleatório de linha, sendo  $r \sim N(0, I\sigma_r^2)$ ;  $c$  é o efeito aleatório de coluna, sendo  $c \sim N(0, I\sigma_c^2)$ ;  $g$  é o efeito aleatório de genótipo, sendo  $g \sim N(0, I\sigma_g^2)$ ;  $\varepsilon$  é o efeito aleatório do resíduo, onde  $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_e^2)$ .

A fim de corrigir a diferença no vigor e desenvolvimento das plantas, o número de folhas (NL) foi usado como covariável. Com a função *getHeritability* do pacote supramencionado, foram obtidas as herdabilidades das variáveis para cada um dos oito experimentos. A análise da herdabilidade foi realizada usando o seguinte estimador:

$$h^2 = \sigma_g^2 / (\sigma_g^2 + \sigma_e^2)$$

Em que  $h^2$  é a estimativa do coeficiente de herdabilidade das linhagens do painel para cada variável estudada;  $\sigma_g^2$  é a estimativa da variância genética; e  $\sigma_e^2$  é a estimativa da variância ambiental.

Com os dados padronizados das variáveis de todos os experimentos, foram realizadas análises de componentes principais (ACP) com a função *PCA* do pacote *FactoMineR* (HUSSON, *et al.*, 2023). As saídas (“*outputs*”) dessas análises foram usadas para obter gráficos *biplots* com a função *fviz\_pca\_var* do pacote *factoextra* (KASSAMBARA e MUNDT, 2022)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Médias das variáveis nas condições AI e DH

Os valores médios das variáveis na condição de AI foram superiores as médias em DH, com grande variação nos resultados obtidos (Tabela 2). A variável que menos variou foi o índice SPAD com uma diferença de 2,53% de AI para DH. Por outro lado, a maior diferença observada foi para volume de raízes laterais (VRL) com 67,12%. Estes resultados corroboram com aqueles obtidos por Chun *et al.* (2011), Rivera-Hernández *et al.* (2009), Moura *et al.* (2006), Clemente (2017) e Brito *et al.* (2013) ao estudarem os efeitos de diferentes níveis de fornecimento de água para a cultura do milho, observaram que ao impor o déficit hídrico, as plantas apresentaram redução no crescimento com menor ganho em biomassa de raiz e parte aérea. Essa perda aliada à redução da área foliar é percebida quando as plantas são submetidas ao estresse hídrico na fase vegetativa (CLEMENTE, 2017; MELO *et al.*, 2018).

Para altura de planta e diâmetro do colmo percebeu-se redução das médias em DH. Tal comportamento se deve ao fato de o estresse acarretar menor desenvolvimento do colmo (CLEMENTE, 2017). Esses resultados corroboram com os obtidos por Melo *et al.* (2018), Efeoglu *et al.* (2009) e Brito *et al.* (2013) para a variável altura de planta, e com Clemente *et al.* (2017), Moura *et al.* (2006) e Brito *et al.* (2013) para diâmetro do colmo. Esse comportamento é decorrente da diminuição do potencial hídrico, que afeta diversos processos da planta, sendo os processos de divisão e expansão celular os primeiros a serem afetados. Este último, principalmente, pode sofrer retardo ou ser interrompido, prejudicando o crescimento da planta em altura e desenvolvimento do colmo em diâmetro (MELO *et al.*, 2018). Estas variáveis representam a capacidade de armazenamento de água e nutrientes ao milho. Quanto mais a planta as desenvolver, maior será o volume de armazenamento, sendo que estes nutrientes serão usados pela planta no período de frutificação para o enchimento dos grãos (BRITO *et al.*, 2013).

Tabela 2 – Valores médios para os caracteres altura de planta (AP – em cm), diâmetro do colmo (DC – em mm), índice SPAD, massa seca de parte aérea (MSPA – em g), massa seca das raízes (MSR – em g), comprimentos de raízes laterais (CRL – em cm) e axiais (CRA – em cm), áreas superficiais de raízes laterais (ASRL – em cm<sup>2</sup>) e axiais (ASRA – em cm<sup>2</sup>), volume de raízes laterais (VRL – em cm<sup>3</sup>) e axiais (VRA – em cm<sup>3</sup>) e área convexa do sistema radicular (ACR – em cm<sup>2</sup>). Fortaleza, CE, 2023.

Ambiente	AP	DC	SPAD	MSPA	MSR	CRL	CRA	ASRL	ASRA	VRL	VRA	ACR
AI_1	9,7	8,4	30,2	3,3	0,9	4324,3	4902,6	4182,4	17026,7	369,6	6148,6	8773,9
AI_2	13,5	9,6	35,2	4,2	1,2	5479,4	6902,5	5481,9	23690,0	495,5	8016,7	12952,8
AI_3	9,4	8,1	37,1	2,5	1,3	2299,8	4853,4	2550,7	18503,5	247,0	7414,4	7601,1
AI_4	10,7	8,3	23,7	2,5	1,6	3774,8	6934,2	4076,4	28700,4	385,6	13045,3	11710,9
DH_1	7,2	6,4	30,2	1,3	0,4	2633,1	2883,9	2578,7	9215,6	230,5	2875,8	6945,9
DH_2	10,0	7,1	30,5	2,0	0,7	4903,0	4534,1	4748,0	14314,9	418,0	4275,0	11053,61
DH_3	7,6	6,1	32,4	1,2	0,6	2073,8	2212,6	2201,4	6646,1	206,5	1901,4	5119,9
DH_4	7,3	6,1	29,9	1,1	0,7	2539,2	2582,0	2629,2	7902,7	241,5	2331,7	6700,7

Fonte: DoVale, JC (2023)

Quanto ao índice SPAD, observou-se pouca redução nos valores entre os ambientes, corroborando com os resultados de Nascimento *et al.* (2016), Maia Júnior (2017), Chen *et al.* (2016) e Bastos *et al.* (2011), este último trabalhou com produção de feijão sobre déficit hídrico. Esse comportamento demonstra que o DH apresenta efeito negativo sobre o teor de clorofila. Nascimento *et al.* (2016) perceberam em seu estudo que as plantas submetidas ao DH apresentavam uma menor leitura do índice SPAD do que plantas submetidas a condições de AI. Além disso, observaram que a persistência do estresse causou uma maior diferença nas leituras entre as duas condições, indicando efeito progressivo na redução do teor de clorofila. De acordo com Farooq *et al.* (2009), essa redução ocorre por conta da degradação (foto-oxidação) deste pigmento quando a planta é submetida ao DH. Quando essa degradação, que se intensifica com o decorrer do estresse, é maior que a taxa de síntese da clorofila, há prejuízo no processo de fotossíntese, pois esses pigmentos aliados aos carotenóides são responsáveis pela captação e conversão da energia luminosa em química (TAIZ; ZEIGER, 2013). Entretanto, plantas que enfrentam estresses hídricos moderados, permanecem realizando o processo de fotossíntese em níveis mais baixos (MAIA JÚNIOR, 2017; DIAS; BRÜGGEMANN, 2010; GONÇALVES *et al.*, 2010).

No que se refere à MSR e MSPA percebeu-se redução, com os valores dessa última se mostrando superiores aos da primeira em ambos os ambientes, com uma menor diferença em DH. Isso se deve ao fato de que, as plantas alocam mais carbono às raízes em condição de estresse, desenvolvendo mais proporcionalmente o sistema radicular frente à parte aérea (LAWLOR; UPRETY, 1993). Esses resultados corroboram com os obtidos por Clemente (2017) e Bergonci *et al.* (2001) para condições de DH. Para Taiz e Zeiger (2013), o desenvolvimento destas variáveis é regido pela relação entre a absorção de água e fotossíntese. Segundo Liu *et al.* (2012), quando a planta é submetida ao déficit hídrico ela fecha seus estômatos a fim de reduzir a perda de água para o ambiente e diminui a taxa fotossintética por conta da redução na assimilação de CO<sub>2</sub>. Esse comportamento compromete a produção de carboidratos pelas plantas, uma vez que, a planta necessita absorver água do solo para assimilar o CO<sub>2</sub> da atmosfera e produzir carboidratos, ocorrendo redução na massa seca de raiz e de parte aérea (CLEMENTE, 2017; TAIZ; ZEIGER, 2013). O milho obtém aproximadamente 90% de sua massa seca através da fotossíntese pela fixação do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera (MAGALHÃES; PAIVA, 1993). Segundo Sicher

e Barnaby (2012), com a redução na produção de fotoassimilados, a planta consome suas reservas para suprir sua demanda energética e produzir compostos osmorreguladores; com a persistência da falta de água, a planta continua utilizando seus estoques sem reposição de carboidratos em quantidades adequadas, reduzindo sua biomassa. Nessa situação, a cultura tende a desenvolver mais o sistema radicular proporcionalmente à parte aérea, para que a planta possa explorar maior volume de solo, na tentativa de acessar maiores níveis de umidade (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Para as variáveis que compõem o sistema radicular, como comprimento, área superficial e volume, observou-se que a classe das raízes axiais foi superior à classe das raízes laterais em todos os ambientes, exceto em DH\_2. As raízes axiais são a base de crescimento das raízes laterais. Pois, essas últimas surgem a partir de regiões presentes nas primeiras (DoVALE *et al.*, 2012). Quando se analisa as diferenças entre a produção de raízes axiais e laterais nas condições contrastantes de suprimento de água, evidencia-se que na condição de DH a diferença é menor. Esses resultados corroboram com aqueles observados por DoVale *et al.* (2012 e 2013) para condições de déficit nutricional e, por Ruta *et al.* (2010) e Coutinho (2011) em situação de estresse hídrico. As raízes laterais são mais eficientes na absorção de água e nutrientes (RUBIO *et al.*, 2003) e também são menos custosas em termos de demanda de carbono. Assim, numa situação de estresse, que altera negativamente a dinâmica fotossintética da planta, há maior prioridade na formação dessas raízes.

E por fim, ACR, que igualmente as demais variáveis, apresentou menores valores quando mensurada em DH. Tal comportamento denota o efeito do DH sobre a área de influência das raízes no solo. Já que, essa variável, através de um polígono gerado pela ligação de pontos que representam as raízes (RÊGO, 2022), forma a área explorada efetivamente pelo sistema radicular, e raízes menos desenvolvidas possuem menores áreas desses polígonos. Essa redução na área explorada pelas raízes ocorre por, como mencionado anteriormente, ao ser submetida ao DH, a planta desenvolver menos seu sistema radicular, por conta da menor assimilação de CO<sub>2</sub> da atmosfera (CLEMENTE, 2017; TAIZ; ZEIGER, 2013).

### **3.2 Importância relativa e recomendação de descarte de variáveis**

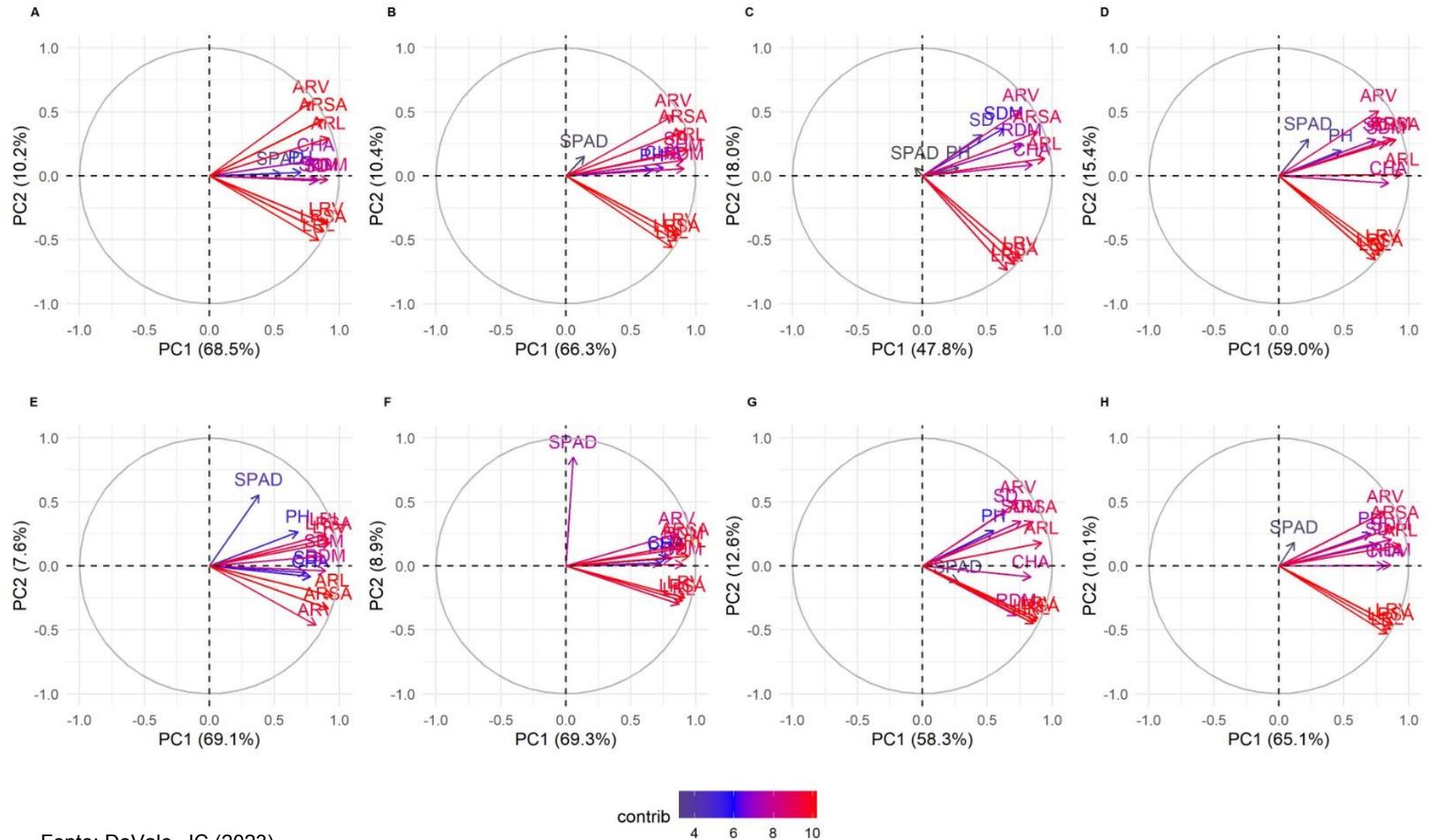
De acordo com a figura 1, as circunferências aliadas aos vetores, que representam as variáveis, demonstram como estas se comportam, sua influência na

contribuição para discriminar as linhagens dentro dos ambientes, e suas relações entre si. De modo que, quanto mais próximo o vetor estiver da borda da circunferência e apresentar coloração mais próxima ao vermelho, mais discriminativa é a variável, conseqüentemente, maior a sua contribuição. Além disso, quanto menor o ângulo entre as variáveis, mais associadas elas tendem a ser. Dessa forma, a variável SPAD apresentou contribuição variável entre os experimentos, denotando coloração de roxa a azul, apresentando contribuição de moderada a baixa, para discriminar as linhagens de milho tropical ao longo dos ambientes. No geral, foi a variável que menos contribuiu e que não apresentou tendência de associação com outra(s) variável(is).

Para AP e DC, observou-se que nos experimentos sob as duas condições de suprimento de água, estiveram sempre próximas, indicando tendência de associação. Ademais, ambas variáveis apresentam de moderada a baixa capacidade de discriminação ao longo dos ambientes, apresentando coloração de roxa a azul. Batista (2018) ao estudar o comportamento do sorgo em condição de DH e AI, semelhantemente observou baixa contribuição para altura de planta. Por outro lado, Ferreira *et al.* (2021) ao estudarem modelos multivariados na cultura do milho em semeio tardio obteve contribuição baixa para diâmetro do colmo e média para altura de planta, havendo no mesmo estudo obtido baixa tendência de associação entre as duas variáveis em AI.

As variáveis de MSR e MSPA também apresentaram ângulos rasos entre seus respectivos vetores nas análises de componentes principais ao longo dos experimentos, indicando tendência de alta associação entre as variáveis. Quanto a suas capacidades para discriminar os ambientes, percebe-se que para ambas as variáveis ao longo dos experimentos, seus respectivos vetores não se mostraram tão próximos a borda das circunferências, apresentando coloração roxa, demonstrando moderada capacidade para discriminar as linhagens dentro dos ambientes. Batista (2018) ao estudar o comportamento do sorgo em condição de estresse hídrico e condição ideal de água, obteve alta contribuição para massa seca de parte aérea e baixa para altura de planta, e percebeu baixa tendência de associação entre estas variáveis, em ambos ambientes.

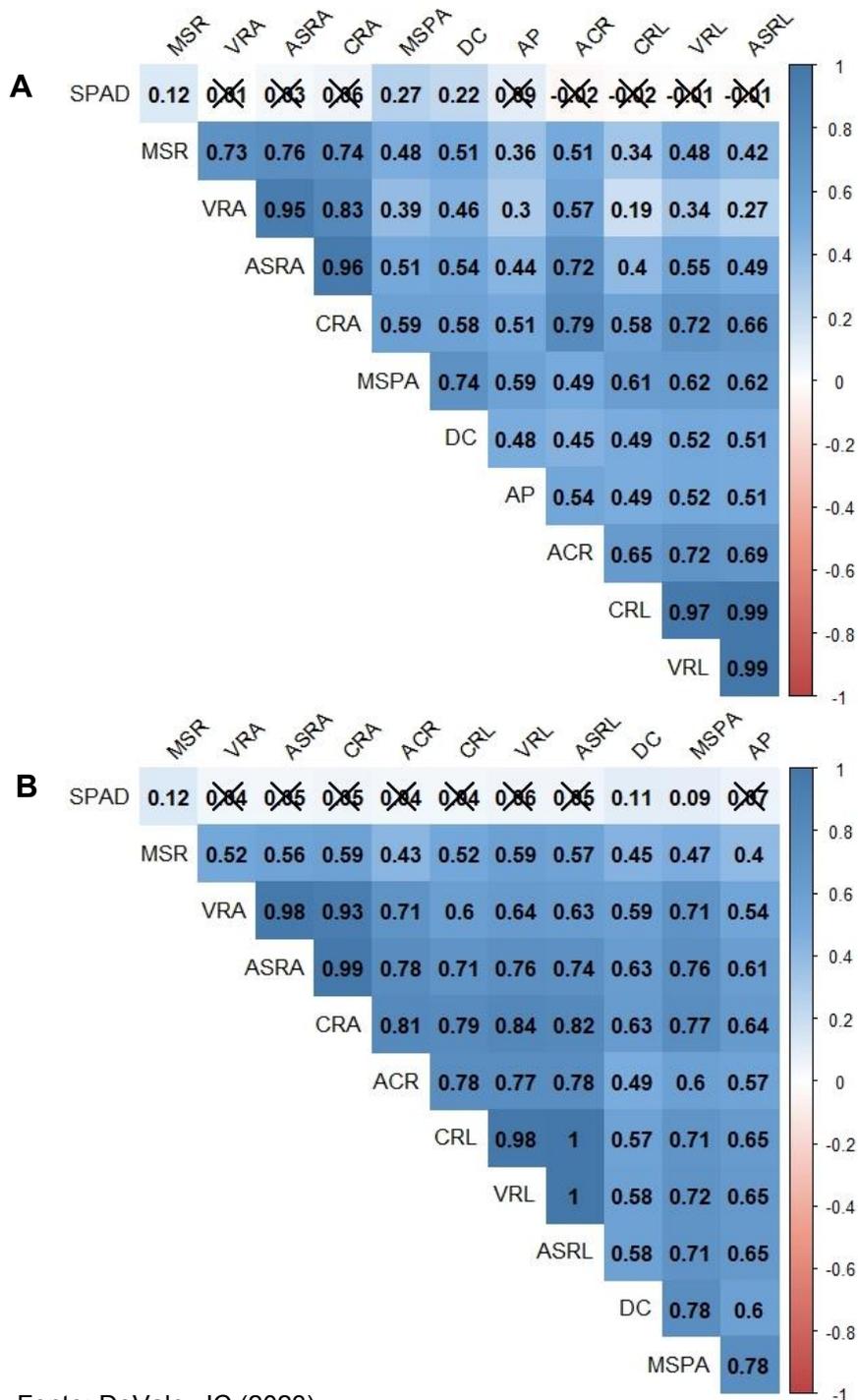
Figura 1 – Dispersão dos caracteres considerando os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) nos oito experimentos conduzidos. A) AI\_1; B) AI\_2; C) AI\_3; D) AI\_4; E) DH\_1; F) DH\_2; G) DH\_3; H) DH\_4. Fortaleza, CE, 2023.



Ao longo dos experimentos e independentemente do suprimento de água, observou-se que os vetores das variáveis (comprimento, área superficial e volume) referentes às raízes laterais apresentaram-se sempre próximos formando ângulos rasos entre si, denotando assim tendência de alta associação. Foram observados ângulos menores entre elas ao longo de todos os experimentos nos dois ambientes, indicando que estas tendem a apresentar maior relação entre si, além de possuírem os maiores vetores, sempre próximos a borda das circunferências, com coloração vermelha, demonstrando maior capacidade de discriminação dentro dos ambientes, podendo ser classificadas como variáveis discriminativas. Analogamente, guardando certas proporções, foi observado o mesmo entre as variáveis das raízes axiais.

Para confirmar as possíveis relações detectadas nas análises de componentes principais, realizaram-se análises de correlação entre todas as variáveis, considerando as duas condições de suprimento de água (Figura 2). Assim, realmente, constataram-se correlações fortes e significativas entre as variáveis comprimento, área superficial e volume dentro das classes de raízes laterais e axiais tanto na condição de AI (Figura 2A) quanto em DH (Figura 2B). Para o melhoramento genético, coeficientes de correlação de elevada magnitude são de suma importância, pois, pode-se priorizar a seleção com base em apenas uma dessas variáveis obtendo resultados satisfatórios nas demais, sem a necessidade de avaliar todas elas, reduzindo com isso o tempo para obtenção de informações e mão-de-obra utilizada para tal atividade (HAIR *et al.*, 1995). Além do mais, pode-se delinear estratégias de seleção com base noutras que são mais fáceis de serem mensuradas (RODRIGUES *et al.*, 2011). Fortes associações como as observadas neste estudo permitem a utilização de critérios para seleção indireta, sendo especialmente importante quando a variável possui baixa herdabilidade ou é de difícil mensuração (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Figura 2 – Correlações fenotípicas entre os caracteres. A) ambientes com suprimento de água ideal (AI) e B) ambientes com déficit hídrico (DH). Fortaleza, CE, 2023.



Fonte: DoVale, JC (2023)

Com base nos resultados de componentes principais (figura 1) e de correlações (figura 2), sugere-se o descarte das variáveis área superficial e volume tanto das classes de raízes laterais como axiais. A razão desta sugestão é, majoritariamente, pelos elevados coeficientes de correlação (acima de 0.9) destas com comprimento. Depois, por serem variáveis mais complexas que o comprimento, pois tratam-se de variáveis bi e tridimensionais. Tais resultados corroboram os obtidos por Almeida (2016), que ao estudar caracteres de raízes e índice de eficiência de nitrogênio em milho-pipoca, obtiveram em seu estudo altas correlações entre comprimento total de raiz com área de raiz e volume de raiz, e para área de raiz com volume de raiz.

Os resultados da figura 2, permitem observar que relações obtidas na figura 1, nem sempre são verdadeiras, apenas demonstram tendências. Como é visto na correlação entre altura de planta e diâmetro do colmo, que na análise de correlação apresentaram uma associação mediana em ambas as disponibilidades de água, não sendo recomendado o descarte de nenhuma dessas variáveis. Resultados semelhantes foram obtidos por Cabral (2013) trabalhando com milho em AI, e diferiram de Beiragi *et al.* (2011) que obtiveram valores baixos para correlação destas variáveis em condição de AI e DH. As demais variáveis não apresentaram fortes correlações de modo que se tornasse possível realizar o descarte. O índice SPAD não se associou a nenhuma outra variável, como já havia sido apresentado anteriormente na análise de componentes principais.

### **3.3 Médias das herdabilidades nas condições AI e DH**

Os valores médios das herdabilidades dos caracteres sofreram variação, mostrando-se distintos tanto entre os ambientes quanto entre os caracteres (Tabela 3). Para estudos envolvendo melhoramento genético, o ideal é que uma variável de interesse apresente alta herdabilidade, indicando que há uma alta associação entre genótipo e fenótipo, sendo o último uma boa medida para identificar os melhores materiais genéticos (CAMACHO; CARABALLO, 1994). Do contrário, a variável sofre considerável influência do ambiente e maiores dificuldades são esperadas no processo de seleção (SABAGHNIA *et al.*, 2010; BRANDLE; MCVETTY, 1989).

Ao se comparar resultados obtidos pelas variáveis em diferentes ambientes pode-se observar que a maioria destas apresentaram maiores médias das

herdabilidades em condição de AI, corroborando com os obtidos por Coque e Gallais (2006) e Torres (2017) para condição de déficit nutricional. Isso ocorre, devido a maior variabilidade genética apresentada pelas linhagens nessa condição hídrica, já que, esse suprimento de água fornece aos genótipos condições mais favoráveis para expressarem seus potenciais genéticos, gerando maior variabilidade entre os materiais estudados (CRUZ *et al.*, 2011). Como observado anteriormente, a herdabilidade é regida por variabilidade genética dividida por variabilidade fenotípica, sendo que nesta última é adicionada a variação ambiental. A maior variabilidade genética obtida em AI faz com que a herdabilidade seja maior que a observada em DH, já que o estresse tende a reduzir o desempenho das linhagens, expressando em menor magnitude seus potenciais genéticos, fazendo com que apresentem um comportamento mais homogêneo, reduzindo a variabilidade genética, e consequentemente, a herdabilidade dessas variáveis (CRUZ *et al.*, 2011).

Tabela 3 – Herdabilidades médias dos caracteres altura de planta (AP – em cm), diâmetro do colmo (DC – em mm), índice SPAD, massa seca de parte aérea (MSPA – em g), massa seca das raízes (MSR – em g), comprimento de raízes laterais (CRL – em cm) e axiais (CRA – em cm) e área convexa do sistema radicular (ACR – em cm<sup>2</sup>) ao longo dos oito ambientes estudados. Fortaleza, CE, 2023.

<b>Ambientes</b>	<b>AP</b>	<b>DC</b>	<b>SPAD</b>	<b>MSPA</b>	<b>MSR</b>	<b>CRL</b>	<b>CRA</b>	<b>ACR</b>
AI_1	0,71	0,64	0,01	0,51	0,50	0,18	0,69	0,43
AI_2	0,36	0,01	0,01	0,08	0,16	0,10	0,17	0,23
AI_3	0,48	0,39	0,56	0,56	0,07	0,01	0,07	0,10
AI_4	0,61	0,68	0,50	0,63	0,18	0,50	0,26	0,01
Média	0,54	0,43	0,27	0,45	0,23	0,20	0,30	0,19
DH_1	0,29	0,28	0,34	0,62	0,13	0,20	0,19	0,00
DH_2	0,39	0,08	0,05	0,29	0,09	0,04	0,17	0,23
DH_3	0,07	0,46	0,62	0,51	0,28	0,49	0,66	0,36
DH_4	0,31	0,44	0,14	0,51	0,25	0,34	0,85	0,38
Média	0,27	0,32	0,29	0,48	0,19	0,27	0,47	0,24

Fonte: DoVale, JC (2023)

As variáveis referentes a comprimento de raízes laterais e axiais foram a exceção, pois obtiveram maiores médias em condições de DH. Esses resultados corroboram com aqueles obtidos por DoVale *et al.* (2013) que obtiveram em seu estudo altas herdabilidades para CRA e CRL para ambiente ideal e déficit de nitrogênio. Assim como observado por Avila (2015) que percebeu maiores comprimentos de raízes em genótipos tolerantes de milho ao déficit hídrico e percebeu grande variação no desenvolvimento radicular entre os genótipos, sendo resultado da variabilidade genética. Como mencionado anteriormente, as linhagens apresentam comportamentos diferentes em DH, tendendo a apresentar maior variabilidade genética em desenvolvimento de CRA e CRL (AVILA, 2015), e assim, obtendo maiores valores de herdabilidade (CRUZ *et al.*, 2011).

Com base na tabela 3, percebe-se que as variáveis que obtiveram maiores valores de herdabilidades médias foram: AP (0,54), MSPA (0,45) e DC (0,43) para AI; e MSPA (0,48), CRA (0,47) e DC (0,32) para DH. Sendo essas as variáveis que obtiveram herdabilidades que possibilitaram sua indicação para subsidiar futuros estudos envolvendo AI e DH.

#### 4 CONCLUSÃO

Sob condições de AI e DH, as variáveis que foram classificadas como discriminativas foram as relacionadas às classes de raízes axiais e laterais (comprimento, área superficial e volume), com esta última sendo superior. Ambas as classes apresentaram maior poder discriminativo, além de possuírem alta correlação, entre cada classe, podendo-se fazer uso de descarte de modo a se trabalha com apenas uma variável que represente as demais.

As variáveis que obtiveram herdabilidades médias que possibilitaram sua indicação para subsidiar futuros estudos envolvendo condições de AI e DH foram: AP (0,54), MSPA (0,45) e DC (0,43) para AI; e MSPA (0,48), CRA (0,47) e DC (0,32) para DH.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, V. C. **Análise de média de gerações para caracteres de raiz e índices de eficiência de nitrogênio em milho-pipoca**. 2016. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/9500>. Acesso em: 08 abr.2023.
- AVILA, R. G. **Relação entre raízes, metabolismo antioxidante e ABA na fotossíntese e produtividade do milho sob déficit hídrico**. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/9661>. Acesso em: 08 abr. 2023.
- AVRAMOVA, V.; NAGEL, K. A.; ABDELGAWAD, H.; BUSTOS, D.; DUPLESSIS, M.; FIORANI, F.; BEEMSTER, G. T. S. Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 8, p. 2453– 2466, 2016.
- BASTOS, E. A.; NASCIMENTO, S. P.; SILVA, E. M.; FREIRE FILHO, F. R.; GOMIDE, R. L. Identificação de genótipos de feijão-caupi tolerantes à seca. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 100-107, 2011.
- BATISTA, P. S. C. **Tolerância ao estresse hídrico em sorgo granífero**. 2018. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018. Disponível em: <http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/1898>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- BEIRAGI, M. A.; EBRAHIMI, M.; MOSTAFAVI, K.; GOLBASHY, M.; KHORASANI, S. K. A study of morphological basis of corn (*Zea mays* L.) yield under drought stress condition using correlation and path coefficient analysis. **Journal of Cereals and Oilseeds**, v. 2, n. 2, p. 32-37, 2011.
- BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001.
- BRANDLE, J. E.; MCVETTY, P. B. E. Heterosis and combining ability in hybrids derived from oilseed rape cultivars and inbred lines. **Crop Science**, v. 29, n. 5, p. 1191-1194, 1989.
- BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D.; WANDERLEY, J.A.C.; MELO, A. S.; COSTA, F.B.; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.
- CABRAL, P. D. S. **Análise dialélica em milho-pipoca: capacidade combinatória, análise de trilha e efeito gênico**. 2013. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, CAMPOS DOS GOYTACAZES, 2013.

CAMACHO, R.G.; CARABALLO, D.F. Evaluation of morphological characteristics in venezueela maize (*Zea mys* L.) genotypes under drought stress. **Scientia Agricola**, v. 51, n. 3, p. 453-458, 1994.

CAMPOS, A. J. de M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. 311101523155-311101523155, 2021.

CHEN, D.; WANG, S.; CAO, B.; CAO, D.; LENG, G.; LI, H.; YIN, L.; SHAN, L.; DENG, X. Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 1-5, 2016.

CHUN, J. A.; WANG, Q.; TIMLIN, D.; FLEISHER, D.; REDDY, V. R. Effect of elevated carbon dioxide and water stress on gas exchange and water use efficiency in corn. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 3, p. 378–384, 2011.

CLEMENTE, D. I. **Estresse hídrico sobre caracteres morfofisiológicos e agrônômicos em populações de milho**. 2017. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2017. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/7572>. Acesso em: 08 abr. 2023.

COQUE, M.; GALLAIS, A. Genomic regions involved in response to grain yield selection at high and low nitrogen fertilization in maize. **Theoretical and Applied Genetics**, v.112, n.7, p.1205-1220, 2006.

COUTINHO, P. H. **Herança e relação dos caracteres fisiológicos e de raízes com a eficiência no uso da água em milho**. 2011. Dissertação (Mestrado em Plantas Daninhas, Alelopatia, Herbicidas e Resíduos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/4543>. Acesso em: 09 abr. 2023.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria aplicada ao estudo da diversidade genética**. 2. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011.

DIAS, M. C.; BRÜGGEMANN, W. Limitations of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* under drought stress: gas Exchange, chlorophyll fluorescence and Calvin cycle enzymes. **Photosynthetica**, v. 48, n. 1, p. 96-102, 2010.

DOVALE, J. C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; BERMUDEZ, F.; MIRANDA, G. V. Efeitos gênicos de caracteres associados à eficiência no uso de nitrogênio em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 385-392, 2012.

DOVALE, J. C.; FRITSCHÉ-NETO, R. Genetic control of traits associated with phosphorus use efficiency in maize by REML/BLUP. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 554-563, 2013.

EFGOGLU, B.; EKMEKÇI, Y.; ÇIÇEK, N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. **South African Journal of Botany**, v. 75, n. 1, p. 34-42, 2009.

FAROOQ M.; WAHID A.; KOBAYASHI N.; FUJITA D.; BASRA S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p. 185-212, 2009.

FERREIRA, L. L.; SILVA, R. S.; CARVALHO, I. R.; FERNANDES, M. S.; CARNEVALE, A. B.; BATISTA, P. F. Modelos multivariados aplicados ao comportamento de milho em semeio tardio. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2021.

GOMES, M. S.; PINHO, R. G. V.; RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. V.; BRITO, A. H. Variabilidade genética em linhagens de milho nas características relacionadas com a produtividade de silagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 879-885, 2004.

GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. P.; DUARTE, W. G.; Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.

HAIR, J.F.; ANDERSON R.E.; TATHAM R.L.; BLACK W.C. **Multivariate data analysis with readings**. 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall International, 1995.

HUSSON, F.; JOSSE, J.; LE, S.; MAZET, J. **Multivariate exploratory data analysis and data mining**. [S. L.: s. n.], 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil municipal**. Fortaleza: IPECE, 2017.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Extract and visualize the results of multivariate data analysis**. [S. L.: s. n.], 2022.

LAWLOR, D. W.; UPRETY, D. C. Effects of water stress on photosynthesis of crops and the biochemical mechanism. **Photosynthesis: photoreactions to plant productivity**, p. 419-449, 1993.

LEILAH, A. A.; AL-KHATEEB, S. A. Yield analysis of canola (*Brassica napus* L.) using some statistical procedures. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 12, p. 103-112, 2005.

LIU, M.; QI, H.; ZHANG, Z. P.; SONG, Z. W.; KOU, T. J.; ZHANG, W. J.; YU, J. L. Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence to drought stress in two maize cultivars. **African Journal of Agricultural Research**, v.7, n. 34, p. 4751-4760, 2012.

LOPES, M. S.; ARAUS, J. L.; VAN HEERDEN, P. D.; FOYER, C. H. Enhancing drought tolerance in C4 crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 9, p. 3135-3153, 2011.

MAGALHÃES, P.C.; PAIVA, E. Fisiologia da produção de milho. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Brasília, DF: EMBRAPA, 1993. p. 85-92.

MAIA JUNIOR, S. O. **Tolerância de cultivares de cana-de-açúcar ao déficit hídrico: relações hídricas, trocas gasosas, fluorescência da clorofila e metabolismo antioxidante**. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/3368>. Acesso em: 20 jun. 2023.

MELO, A. V.; SANTOS, V. M.; VARANDA, M. A. F.; CARDOSO, D. P.; DIAS, M. A. R. Desempenho agrônômico de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico no sul do estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p.177-189, 2018.

MOURA, E. G.; TEIXEIRA, A. P. R.; RIBEIRO, V. S.; AGUIAR, A. C. F.; FARIAS, M. F. Crescimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.) submetido a vários intervalos de irrigação na região da Pré-Amazônia. **Irriga**, v. 11, n. 2, p. 169-177, 2006.

NASCIMENTO, F. N.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; JÚNIOR, A. S. A.; RIBEIRO, V. Q. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p.167-181, 2016.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **Supplemental Information References S**, v. 1, p. 371-78, 2021.

RÊGO, A. S. **O teorema de Pick no Ensino-aprendizagem da geometria plana: cálculo de áreas de polígonos simples**. 2022. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/22827>. Acesso 30 jun. 2023.

RIVERA-HERNÁNDEZ, B.; CARRILO-ÁVILA, E.; OBRADOR-OLÁN, J. J.; JUÁREZ-LÓPEZ, J. F.; ACEVES-NAVARRO, L. A.; GARCÍA-LÓPEZ, E. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid, in Campeche, Mexico. **Agricultural water management**, v. 96, n. 9, p. 1285-1292, 2009.

RODRIGUES, F.; PINHO, R. G. V.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; PINHO, E. V. R. V. Índice de seleção e estimativa de parâmetros genéticos e fenotípicos para características relacionadas com a produção de milho-verde. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 2 p. 278-286, 2011.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, M. X.; BOER, M.; EILERS, P.; EEUWIJK, F. V. **Spatial analysis of field trials with splines**. [S. L.: s. n.], 2022.

RUBIO, G.; LIAO, H.; YAN, X. L.; LYNCH, J. P. Topsoil foraging and its role in plant competitiveness for phosphorus in common bean. **Crop Science**, v. 43, n. 2, p. 598-607, 2003.

RUTA, N.; LIEDGENS, M.; FRACHEBOUD, Y.; STAMP, P.; HUND, A. QTLs for the elongation of axile and lateral roots of maize in response to low water potential. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 120, n. 3, p. 621-631, 2010.

SABAGHNIA, N.; DEGHANI, H.; ALIZADEH, B.; MOGHADDAM, M. Interrelationships between seed yield and 20 related traits of 49 canola (*Brassica napus* L.) genotypes in non-stressed and water-stressed environments. **Spanish Journal of Agricultural Research**, n. 2, p. 356-370, 2010.

SICHER, R. C.; BARNABY, J. Y. Impact of carbon dioxide enrichment on the responses of maize leaf transcripts and metabolites to water stress. **Physiologia Plantarum**, v. 144, n. 3, p. 238–253, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TORRES, L. G. **Caracterização de linhagens endogâmicas de milho tropical para morfologia de raiz e eficiência nutricional em condições contrastantes de nitrogênio**. 2017. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/11669>. Acesso em: 08 jul. 2023.

TRACHSEL, S.; MESSMER, R.; STAMP, P. Mapeamento de QTLs para Crescimento Radicular Lateral e Axílico de Milho Tropical. **Genética Teórica e Aplicada**, v. 119, p. 1413-1424, 2009.

WEI, T.; SIMKO, V. **Visualization of a correlation matrix**. [S. L.: s. n.], 2021.

YASSUE, R. M.; CARVALHO, H. F.; GEVARTOSKY, R.; SABADIN, F.; SOUZA, P. H.; BONATELLI, M. L.; AZEVEDO, J. L.; QUECINE, M. C.; FRITSCHÉ-NETO, R. On the genetic architecture in a public tropical maize panel of the symbiosis between corn and plant growth-promoting bacteria aiming to improve plant resilience. **Molecular Breeding**, v. 41, p 1-16, 2021.

ZIYOMO, C.; BERNARDO, R. Drought tolerance in maize: Indirect selection through secondary traits versus genomewide selection. **Crop Science**, v.53, n.4, p.1269–1275, 2013.