

Estatística

Predição da produtividade de grãos de bases genéticas de milho por meio de variáveis fenológicas e meteorológicas

Prediction of maize genetic bases grain yield by phenological and meteorological variables

Murilo Vieira Loro¹, Alberto Cargnelutti Filho¹, Vithória Morena Ortiz¹,
João Augusto Andretta¹, Mikael Brum dos Reis¹, Bruno Raul Schuller¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar se é possível prever a produtividade de grãos de bases genéticas de milho por meio de variáveis fenológicas e meteorológicas. Foi conduzido um experimento com genótipos de milho em cinco datas de semeadura. Na primeira data de semeadura (21 de setembro de 2021) foram semeados 71 genótipos (46 híbridos simples, 14 híbridos triplo, 3 híbridos duplo e 8 variedades). Nas outras quatro datas de semeadura (20 de outubro de 2021, 20 de novembro de 2021, 20 de dezembro de 2021 e 30 de janeiro de 2022) foram semeados 78 genótipos (47 híbridos simples, 15 híbridos triplo, 8 híbridos duplo e 8 variedades). Para cada genótipo e data de semeadura, foram obtidas as variáveis fenológicas, a produtividade de grãos, a radiação solar global acumulada e a soma térmica nos estádios vegetativo e reprodutivo. Para cada base genética de milho, aplicou-se a análise de componentes principais e estimaram-se os parâmetros do algoritmo de árvore de regressão para a predição da produtividade de grãos em função das variáveis fenológicas e meteorológicas. A radiação solar global acumulada nos estádios vegetativo e reprodutivo é a principal variável que determina a produtividade de grãos de híbridos triplo e duplo; e híbridos simples e variedades de milho, respectivamente.

Palavras-chave: *Zea mays*; Árvore de regressão; Radiação solar global; Soma térmica

ABSTRACT

The objective of this study was to determine if it is possible to predict the grain yield of maize genotypes using phenological and meteorological variables. An experiment was conducted with maize genotypes at five sowing dates. On the first sowing date (September 21, 2021), 71 genotypes were sown (46 single hybrids, 14 triple hybrids, 3 double hybrids, and 8 varieties). In the other four sowing dates (October 20, 2021, November 20, 2021, December 20, 2021, and January 30, 2022), 78 genotypes were sown (47 single hybrids, 15 triple hybrids, 8 double hybrids, and 8 varieties). For each genotype and sowing date,

the phenological variables, grain yield, accumulated global solar radiation, and the thermal sum in the vegetative and reproductive stages were obtained. For each maize genetic base, principal component analysis was applied, and the parameters of the regression tree algorithm for predicting grain yield as a function of phenological and meteorological variables were estimated. The global solar radiation accumulated in the vegetative and reproductive stages is the main variable that determines the grain yield of triple and double hybrids; and simple hybrids and maize varieties, respectively.

Keywords: *Zea mays*; Regression tree; Global solar radiation; Thermal sum

1 INTRODUÇÃO

A produtividade de grãos de milho é determinada pela expressão de sua base genética e pela interação com variáveis meteorológicas, como a radiação solar global, temperatura do ar e precipitação pluviométrica (Melo *et al.*, 2018; Ge *et al.*, 2022). Compreender a interação dessas variáveis com a produtividade de grãos de milho possibilita reduzir riscos de cultivo e planejar práticas de manejo adequadas, como o uso de genótipos com maior tolerância. É possível utilizar bases genéticas de milho que possuam diferentes capacidades de adaptação às condições meteorológicas.

As bases genéticas de milho são distintas em termos de variabilidade genética (Lima; Borém, 2018). A média da produtividade de grãos dos híbridos simples geralmente é maior do que a produtividade dos híbridos triplo e duplo, como relatado por Emygdio *et al.* (2007). Já as variedades caracterizam-se por exibir maior estabilidade fenotípica diante das variações do ambiente devido à sua ampla base genética, conforme observado por Carpentieri-Pípolo *et al.* (2010).

A capacidade de prever a produtividade de grãos de milho em resposta à variabilidade das condições meteorológicas pode promover o desenvolvimento de estratégias eficazes para o posicionamento de genótipos de milho por bases genéticas (Coelho *et al.*, 2022). As alterações da radiação solar global e temperatura do ar foram identificadas como as principais fontes de influência nas predições da produtividade de grãos (Jeong *et al.*, 2016; Sah *et al.*, 2020; Cedric *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2022).

A Análise de Componentes Principais (ACP) reduz a dimensionalidade dos

dados, preservando a maior variabilidade possível. Com isso, muitas variáveis podem ser substituídas por poucos componentes principais (Jolliffe; Cadima, 2016). A ACP tem sido amplamente aplicada para explorar diferentes bancos de dados e objetivos diversos. Estudos como os de Mwadzingeni *et al.* (2016) e Veenstra *et al.* (2021) demonstram o uso da ACP para analisar a influência de variáveis meteorológicas e identificar características importantes em cultivos agrícolas. A árvore de regressão é uma técnica de aprendizado de máquina utilizada para a predição de variáveis contínuas, como é o caso da produtividade de grãos de milho. Estudos utilizaram a árvore de regressão para predição da produtividade de grãos de trigo (Jeong *et al.*, 2016), soja (Di Mauro *et al.*, 2018) e milho (Jeong *et al.*, 2016; Cedric *et al.*, 2022), utilizando variáveis meteorológicas como explicativas.

No milho, a temperatura máxima do ar tem sido a principal variável meteorológica para determinação da produtividade de grãos de milho (Jeong *et al.*, 2016; Cedric *et al.*, 2022). Enquanto na soja a interação entre precipitação pluviométrica e temperatura do ar foram as variáveis mais importantes (Di Mauro *et al.*, 2018). Esses estudos identificaram as faixas de valores das variáveis meteorológicas que resultam na maximização da produtividade das culturas. No entanto, alguns estudos em milho (Jeong *et al.*, 2018; Cedric *et al.*, 2022) não consideraram a radiação solar global como variável preditora da produtividade de grãos.

Compreender as relações entre a produtividade de grãos e as variáveis fenológicas e meteorológicas por bases genéticas de milho pode promover o adequado posicionamento de genótipos para minimizar os riscos abióticos de cultivo. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi verificar se é possível prever a produtividade de grãos de bases genéticas de milho por meio de variáveis fenológicas e meteorológicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizado um experimento em área localizada a 29°42'S, 53°49'O e 95 m de altitude do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria.

O clima do local é classificado como Cfa subtropical úmido, com verões quentes e sem estação seca definida (Alvares *et al.*, 2013) e o solo do local é Argissolo vermelho distrófico arênico (Santos *et al.*, 2018).

Foram avaliados genótipos nas seguintes datas de semeadura: 21 de setembro de 2021, 20 de outubro de 2021, 20 de novembro de 2021, 20 de dezembro de 2021 e 30 de janeiro de 2022. Com exceção da semeadura em 21 de setembro de 2021 que foi composta por 71 genótipos (46 híbridos simples, 14 híbridos triplo, 3 híbridos duplo e 8 variedades), em todas as demais datas foram semeados 78 genótipos de milho de diferentes bases genéticas (47 híbridos simples, 15 híbridos triplo, 8 híbridos duplo e 8 variedades).

Os genótipos de milho, em cada data de semeadura, foram semeados em parcelas constituídas por uma fileira, lado a lado, de 5 m de comprimento espaçadas em 0,80 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas na fileira, totalizando 4 m². Realizou-se o desbaste para obter a densidade de 62.500 plantas ha⁻¹ (25 plantas por parcela).

Foram feitas bordaduras com plantas de milho para evitar interferência nas plantas das laterais e extremidades das parcelas. A área foi previamente preparada e adubada com 415 kg ha⁻¹ de adubo químico na fórmula (NPK) 05-20-20. A adubação nitrogenada com ureia (N - 46%) foi realizada nos estádios V4 com 250 kg ha⁻¹ e em V6 com 150 kg ha⁻¹. Os demais manejos culturais, como controle de plantas daninhas, pragas e doenças, foram realizados de forma uniforme em todos os genótipos de acordo com as indicações técnicas para a cultura de milho (Fancelli; Dourado Neto, 2009).

Cada genótipo foi caracterizado fenologicamente em cada data de semeadura. Para isso, foram registradas as seguintes datas: florescimento masculino, quando 50% das plantas em cada parcela apresentavam a última ramificação do pendão visível; florescimento feminino, quando 50% das plantas de cada parcela apresentavam estigmas visíveis na espiga; e o ponto de colheita, quando a palha da espiga e a folha da base da espiga estavam 100% senescentes. Assim, foram obtidos os seguintes

caracteres fenológicos: dias da semeadura ao florescimento masculino (SFM, dias), dias da semeadura ao florescimento feminino (SFF, dias), dias do florescimento masculino à colheita (FMC, dias) e dias do florescimento feminino à colheita (FFC, dias).

A partir de todas as plantas da parcela foi avaliada a produtividade de grãos (PROD, em Mg ha⁻¹), corrigida a 13% de umidade. As variáveis meteorológicas foram obtidas de uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada a 100 metros da área experimental. Obteve-se, para cada dia, a radiação solar global horária, em MJ m⁻² hora⁻¹ e as temperaturas máximas e mínimas horárias, em °C, para o período entre a semeadura e o ponto de colheita dos genótipos, em cada data de semeadura.

Para cada dia, foi obtida a radiação solar global diária, em MJ m⁻² dia⁻¹ por meio do somatório da radiação solar global horária, em MJ m⁻² hora⁻¹. Após, para cada genótipo, em cada data de semeadura, a partir da radiação solar global diária, obteve-se a radiação solar global acumulada nos subperíodos: semeadura ao florescimento masculino (RSFM, MJ m⁻²); semeadura ao florescimento feminino (RSFF, MJ m⁻²); florescimento masculino à colheita (RFMC, MJ m⁻²); e florescimento feminino à colheita (RFFC, MJ m⁻²).

Para cada dia, a partir das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas (Tmin) horárias, calcularam-se os 24 valores de temperatura média horária. Em seguida, calculou-se a temperatura média (Tmed) diária do ar, em °C, pela média dos 24 valores de temperatura média horária. Após, calculou-se os graus dias (GD, em °C) por meio do método proposto por Arnold (1960) pela expressão:

$$GD = T_{med} - T_b \quad | \quad (1)$$

onde:

Tmed = temperatura média diária do ar, em °C;

Tb = temperatura base inferior (10°C);

A Tb é a temperatura abaixo da qual não ocorre o desenvolvimento da planta e se algum desenvolvimento ocorrer, ocorrerá a uma taxa significativamente reduzida.

Quando $T_{med} \leq T_b$ foi considerado GD igual a zero.

Para cada genótipo, em cada data de semeadura, a soma térmica foi obtida somando-se os valores de GD de cada um dos seguintes subperíodos: semeadura ao florescimento masculino (SSFM, °C dia); semeadura ao florescimento feminino (SSFF, °C dia); florescimento masculino à colheita (SFMC, °C dia); e florescimento feminino à colheita (SFFC, °C dia).

Os dados foram padronizados devido às diferentes escalas de medida das variáveis. Em seguida, aplicou-se a análise de componentes principais para cada base genética, visando verificar possíveis agrupamentos entre as datas de semeadura. O número de fatores a serem retidos foi determinado pelo critério de Kaiser-Guttman (Guttman; 1954; Kaiser, 1960), ou seja, foram retidos os componentes com autovalor maior que 1,0. Simultaneamente a esse critério, verificou-se a porcentagem de explicação acumulada dos componentes, tendo por objetivo reter componentes de modo que a explicação fosse superior a 60% (Hair *et al.*, 2009).

A fim de verificar as variáveis fenológicas e morfológicas que determinam a produtividade de grãos, realizou-se a predição da produtividade de grãos, utilizando o algoritmo CART com abordagem em árvore de regressão. Assim, para cada base genética de milho (híbridos simples, triplo, duplo e variedades) estimaram-se os parâmetros do algoritmo de árvore de regressão para a predição da produtividade de grãos em função das variáveis fenológicas e meteorológicas ($PROD = SFM + SFF + FMC + FFC + RSFM + RSFF + RFMC + RFFC + SSFM + SSFF + SFMC + SFFC$).

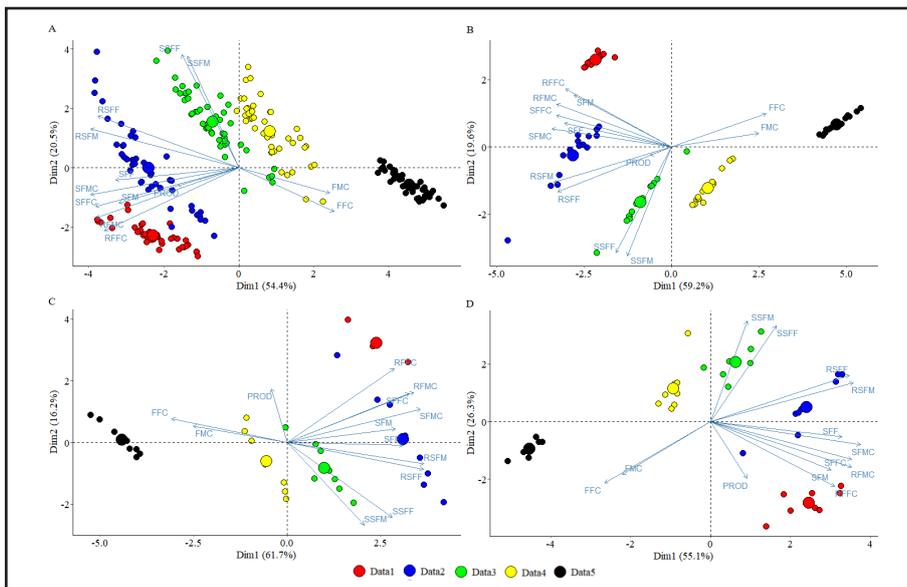
Todas as análises foram realizadas por meio do Microsoft Excel e software R (R Core Team, 2023). Utilizou-se o pacote rpart (Therneau; Atkinson, 2022) para estimar os parâmetros do algoritmo de regressão e o pacote rpart.plot (Milborrow, 2022) para gerar a árvore de regressão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de componentes principais realizada para híbridos simples, triplo,

duplo e variedades de milho, observou-se que os dois primeiros componentes principais explicaram, respectivamente, 74,9%, 78,8%, 77,9% e 81,4% da variação total dos dados (Figura 1).

Figura 1 – Variabilidade total dos dados dos híbridos simples (A), híbridos triplos (B), híbridos duplos (C) e variedades de milho em cinco datas de semeadura representada por dois componentes principais



Legenda: SFM: dias da semeadura ao florescimento masculino; SFF: dias da semeadura ao florescimento feminino; FMC: dias do florescimento masculino à colheita; FFC: dias do florescimento feminino à colheita; PROD: produtividade de grãos, em Mg ha^{-1} ; RSFM: radiação solar global acumulada da semeadura ao florescimento masculino, em MJ m^{-2} ; RSFF: radiação solar global acumulada da semeadura ao florescimento feminino, em MJ m^{-2} ; RFMC: radiação solar global acumulada do florescimento masculino à colheita, em MJ m^{-2} ; RFFC: radiação solar global acumulada do florescimento feminino à colheita, em MJ m^{-2} ; SSFM: soma térmica da semeadura ao florescimento masculino, em $^{\circ}\text{C dia}$; SSFF: soma térmica da semeadura ao florescimento feminino, $^{\circ}\text{C dia}$; SFMC: soma térmica do florescimento masculino à colheita, em $^{\circ}\text{C dia}$; SFFC: soma térmica do florescimento feminino à colheita, em $^{\circ}\text{C dia}$. Os círculos maiores correspondem ao desempenho médio de cada grupo; Data1: 21/09/2021; Data2: 20/10/21; Data3: 20/11/21; Data4: 20/12/21; e Data5: 31/01/22. Fonte: Organização dos autores (2023)

Esses valores representam uma explicação satisfatória da variabilidade dos dados. Portanto, com base nesses resultados, definiu-se que os dois primeiros componentes principais são suficientes para explicar a variação total dos dados (Hair *et al.*, 2009). Isso significa que a maior parte da informação contida na matriz original pode ser representada adequadamente por esses dois componentes principais.

As observações de cada data de semeadura foram coloridas distintamente para cada base genética. Isso resultou na formação de cinco grupos distintos, identificados principalmente pelas datas de semeadura. Os pontos ou grupos de genótipos que estão na mesma direção e sentido dos vetores das variáveis indicam maior expressão dessas variáveis, ou seja, apresentam valores mais altos. Por outro lado, os pontos ou grupos localizados em direção oposta aos vetores indicam menor expressão das variáveis, revelando valores mais baixos para esses atributos. Essa interpretação permite identificar quais grupos ou genótipos se destacam, positiva ou negativamente, em relação às variáveis avaliadas. Logo, nos híbridos simples, duplo e variedades as maiores magnitudes de PROD, RFMC, RFFC foram observadas na primeira data de semeadura. Isso indica que nesta data, essas bases genéticas apresentaram maior produtividade de grãos e acúmulo de radiação solar global no estágio reprodutivo.

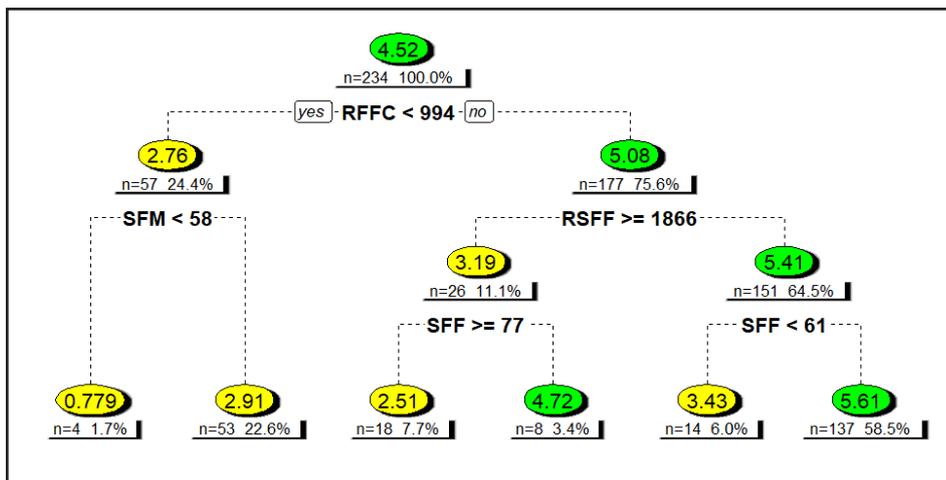
Na quinta data de semeadura os genótipos de todas as bases genéticas apresentaram maior duração do FMC e FFC (Figura 1). Por outro lado, em todas as bases genéticas a duração do FFC e FMC foi menor nos genótipos cultivados na primeira data. Maior duração do estágio reprodutivo também foi relatado por Bonelli *et al.* (2016) à medida que ocorreu o atraso da semeadura do milho.

As variações entre datas e entre os genótipos dentro das datas de semeadura são claramente observadas. Para todas as bases genéticas a maior variação entre os genótipos dentro de uma data ocorreu na segunda, seguido da terceira e quarta data de semeadura. Portanto, nestas datas de semeadura, é possível que as condições meteorológicas tenham contribuído para a maior variação entre os genótipos, em relação a primeira e quinta data de semeadura.

Foi possível identificar as faixas das variáveis fenológicas e meteorológicas que correspondem a um aumento da produtividade de grãos das bases genéticas de milho (Figuras 2, 3, 4 e 5). A radiação solar global acumulada durante os estádios vegetativo e reprodutivo da cultura do milho foi o principal nó de divisão da árvore de regressão.

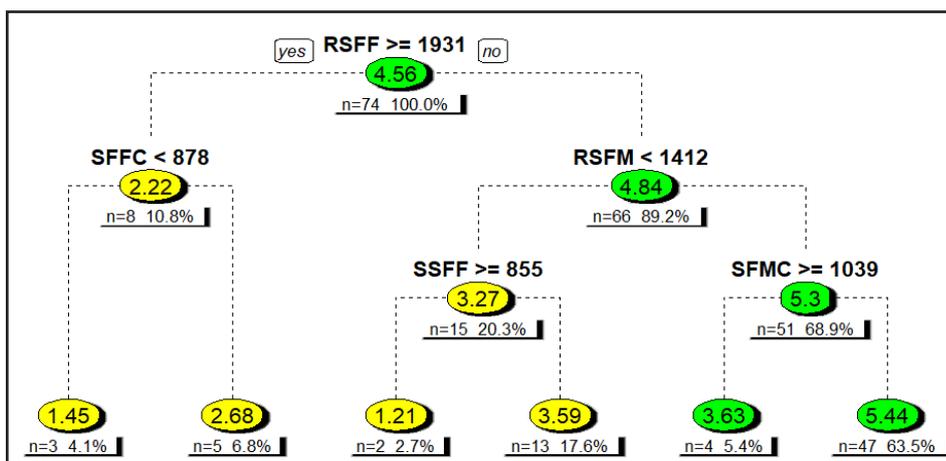
Isso indica que a radiação solar global foi a variável meteorológica de maior influência na produtividade de grãos das bases genéticas de milho.

Figura 2 – Predição da produtividade de grãos de híbridos simples de milho por meio da árvore de regressão (n = 234)



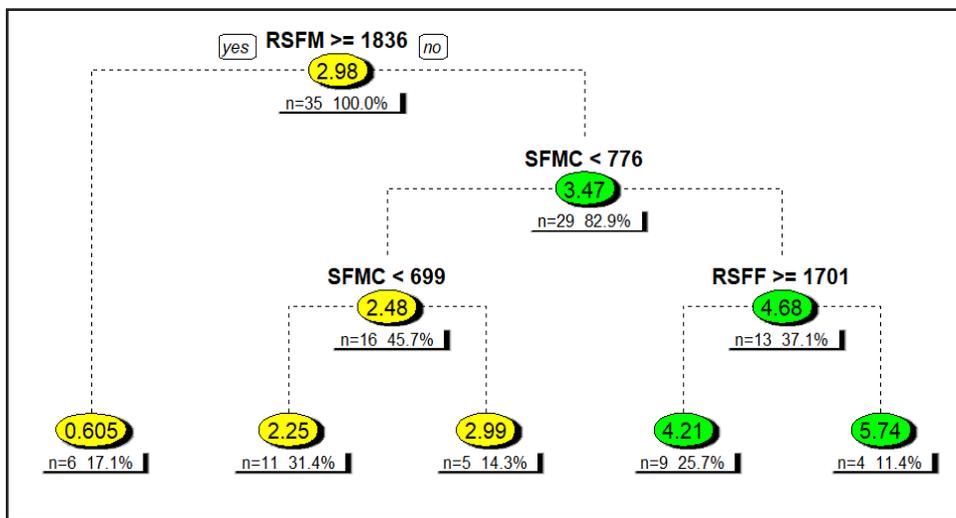
Legenda: SFM: dias da semeadura ao florescimento masculino; SFF: dias da semeadura ao florescimento feminino; RSFF: radiação solar global acumulada da semeadura ao florescimento feminino, em MJ m⁻²; RFFC: radiação solar global acumulada do florescimento feminino à colheita, em MJ m⁻². Fonte: Organização dos autores (2023)

Figura 3 – Predição da produtividade de grãos de híbridos triplo de milho por meio da árvore de regressão (n = 74)



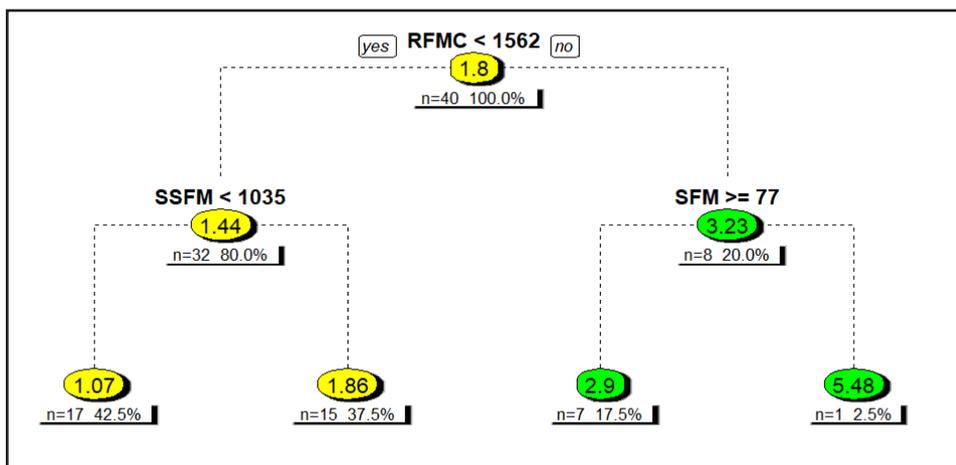
Legenda: RSFM: radiação solar global acumulada da semeadura ao florescimento masculino, em MJ m⁻²; RSFF: radiação solar global acumulada da semeadura ao florescimento feminino, em MJ m⁻²; SSFM: soma térmica da semeadura ao florescimento masculino, em °C dia; SSFF: soma térmica da semeadura ao florescimento feminino, em °C dia; SFMC: soma térmica do florescimento masculino à colheita, em °C dia; SFFC: soma térmica do florescimento feminino à colheita, em °C dia. Fonte: Organização dos autores (2023)

Figura 4 – Predição da produtividade de grãos de híbridos duplo de milho por meio da árvore de regressão (n = 35)



Legenda: RSFM: radiação solar global acumulada da sementeira ao florescimento masculino, em MJ m⁻²; RSFF: radiação solar global acumulada da sementeira ao florescimento feminino, em MJ m⁻²; SFMC: soma térmica do florescimento masculino à colheita, em °C dia. Fonte: Organização dos autores (2023)

Figura 5 – Predição da produtividade de grãos de variedades de polinização aberta de milho por meio da árvore de regressão (n = 40)



Legenda: SFM: dias da sementeira ao florescimento masculino; RFMC: radiação solar global acumulada do florescimento masculino à colheita, em MJ m⁻²; SSFM: soma térmica da sementeira ao florescimento masculino, em °C dia. Fonte: Organização dos autores (2023)

Observou-se que, quando a RSFF e RSFM foram menores que 1931 MJ m⁻² (Híbridos triplo) e 1836 MJ m⁻² (Híbridos duplo), respectivamente, houve redução da

produtividade de grãos esperada (2,220 Mg ha⁻¹ para híbridos triplo e 0,605 Mg ha⁻¹ para híbridos duplo, respectivamente). Esses resultados sugerem que, para esses híbridos, a elevada radiação durante o estágio vegetativo impacta negativamente o desempenho produtivo. Embora a radiação solar seja essencial para a fotossíntese e o crescimento das plantas, um acúmulo excessivo de radiação solar no estágio vegetativo do milho pode reduzir a produtividade de grãos. Isso ocorre porque altos níveis de radiação solar podem promover o estresse térmico e à perda de água por meio da transpiração das plantas (Taiz *et al.*, 2017).

Nos híbridos simples e variedades, o maior acúmulo de radiação solar global no estágio reprodutivo aumentou a produtividade de grãos. A menor incidência de radiação solar global no estágio reprodutivo limita a taxa fotossintética e reduz a produtividade de grãos (Zhou *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2022). Isso pode explicar os resultados obtidos nos híbridos simples e variedades, nos quais a radiação solar acumulada no estágio reprodutivo promoveu o aumento da produtividade de grãos quando acumulada acima de um valor mínimo.

Nos híbridos simples a RFFC foi o principal nó de divisão, enquanto que no segundo nó hierárquico, os critérios de divisão foram SFM e RSFF (Figura 2). A maior média da produtividade de grãos dos híbridos simples (5,61 Mg ha⁻¹) corresponde a uma combinação de uma RFFC superior a 994 MJ m⁻², RSFF inferior a 1866 MJ m⁻² e a duração da SFF superior a 61 dias (58,5% dos dados). Esses resultados indicam que essa combinação específica de variáveis preditoras promove uma maior produtividade de grãos dos híbridos simples de milho. Nos híbridos triplo, o critério de divisão principal foi a RSFF, conforme indicado no primeiro nó hierárquico (Figura 3). No segundo nó hierárquico, os critérios de divisão foram SFFC e RSFM. Foi observado que os híbridos com um valor de RSFF inferior a 1931 MJ m⁻², RSFM maior que 1412 MJ m⁻² e SFMC menor que 1039 °C apresentaram produtividade média de grãos igual a 5,44 Mg ha⁻¹ (63,5% dos dados).

A RSFM foi o principal nó de divisão nos híbridos duplo, enquanto no segundo nó hierárquico, o critério de divisão foi SFMC (Figura 4). O maior desempenho produtivo médio ($5,74 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi observado em híbridos duplo com RSFM inferior a 1836 MJ m^{-2} , SFMC maior que $776 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e RSFF menor que 1701 MJ m^{-2} (11,4% das observações). A RFMC foi o principal nó de divisão nas variedades de polinização aberta, enquanto no segundo nó hierárquico, os critérios de divisão foram SSFM e SFM (Figura 5). O maior desempenho produtivo ($5,48 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi observado em uma variedade com RFMC maior que 1562 MJ m^{-2} e SFM menor que 77 dias (2,5% das observações).

Pesquisas conduzidas por Zhou *et al.* (2016) e Guo *et al.* (2022), também evidenciaram a importância da radiação solar global como a principal variável meteorológica que determina a produtividade de grãos de milho. No estudo conduzido por Jeong *et al.* (2016), a temperatura máxima do ar determinou a produtividade de grãos de milho. No entanto, os autores não consideraram a radiação solar global como uma variável preditora. Ao investigarem a produtividade de silagem de milho, os autores incluíram a radiação solar como variável preditora e observaram que ela se tornou a principal variável meteorológica para explicar a produção de silagem. Cedric *et al.* (2022) também não consideraram a radiação solar como variável preditora, revelando que a produtividade de grãos de milho foi explicada pela precipitação pluviométrica e temperatura do ar. Isso indica a importância de considerar a radiação solar global como variável preditora da produtividade de grãos de milho.

A radiação solar global foi a principal variável que determinou a produtividade de grãos das bases genéticas de milho. Isso destaca a necessidade de garantir uma adequada exposição à radiação solar global durante os estádios vegetativo e reprodutivo para maximizar a produtividade de grãos das diferentes bases genéticas de milho. Considerar a radiação solar global nas práticas de manejo e no desenvolvimento de genótipos mais adaptados pode promover o aumento da produtividade de grãos e eficiência na produção de milho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível prever a produtividade de grãos de bases genéticas de milho por meio de variáveis fenológicas e meteorológicas.

A radiação solar global acumulada nos estádios vegetativo e reprodutivo é a principal variável que determina a produtividade de grãos de híbridos triplo e duplo; e híbridos simples e variedades de milho, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processos 304652/2017- 2 e 304878/2022-7), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Aos alunos bolsistas e voluntários pela ajuda na coleta de dados.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARNOLD, C. Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. **Journal of the American Society for Horticultural Sciences**, [S.l.], v. 76, n. 1, p. 682-692, 1960.
- BONELLI, L. E; MONZON, J. P; VERRUDO, A; RIZZALLI, R. H; ANDRADE, F. H. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. **Field Crops Research**, [S.l.], v. 198, n. 1, p. 215-225, 2016.
- CARPENTIERI-PÍPOLO, C; SOUZA, A; SILVA, D. A; BARRETO, T. P; GARBUGLIO, D. D; FERREIRA, J. M. Avaliação de cultivares de milho crioulo em sistema de baixo nível tecnológico. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 32, n. 2, p. 229-233, 2010.
- CEDRIC, L. S; ADONI, W. Y. H; AWORKA, R; ZOUEU, J. T; MUTOMBO, F. K; KRICHEN, M; KIMPOLO, C. L. M. Crops yield prediction based on machine learning models: case of west african countries. **Smart Agricultural Technology**, [S.l.], v. 2, n. 100049, p. 1-14, 2022.
- COELHO, A. E; SANGOI, L; BALBINOT JUNIOR, A. A; KUNESKI, H. F; MARTINS JÚNIOR, M. C. Nitrogen use efficiency and grain yield of corn hybrids as affected by nitrogen rates and sowing dates in subtropical environment. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 46, e0210087, p. 1-21, 2022.

- EMYGDIO, B. M; IGNACZAK, J. C; CARGNELUTTI FILHO, A. Potencial de rendimento de grãos de híbridos comerciais simples, triplos e duplos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 95-103, 2007.
- FANCELLI, A. L; DOURADO NETO, D. **Milho**: manejo e produtividade. Piracicaba: ESALQ/USP, 2009. 181 p.
- GE, J; XU, Y; ZHAO, M; ZHAN, M; CAO, C; CHEN, C; ZHOU, B. Effect of climatic conditions caused by seasons on maize yield, kernel filling and weight in entral China. **Agronomy**, [S.l.], v. 12, n. 8, p. 1-19, 2022.
- GUO, D; CHEN, C; LI, X; WANG, R; DING, Z; MA, W; WNAG, X; ... ZHOU, B. Adjusting sowing date improves the photosynthetic capacity and grain yield by optimizing temperature condition around flowering of summer maize in the North China Plain. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 1-16, 2022.
- GUTTMAN, L. Some necessary conditions for common factor analysis. **Psychometrika**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 149-162, 1954.
- JEONG, J. H; RESOP, J. P; MUELLER, N. D; FLEISHER, D. H; YUN, K; BUTLER, E. E; TIMLIN, D. J; ... KIM, S. H. Random forests for global and regional crop yield predictions. **PloS One**, [S.l.], v. 11, n. 6, e0156571, 2016.
- JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [S.l.], v. 374, p. 20150202, 2016.
- KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, [S.l.], v. 23, n. 3, p. 187-200. 1958.
- LIMA, R; BORÉM, A. **Melhoramento de Milho**. Minas Gerais: UFV, 2018. 396p.
- MAURO, G. di; CIPRIOTTI, P. A; GALLO, S; ROTUNDO, J. L. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. **European Journal of Agronomy**, [S.l.], v. 99, p. 186-194, 2018.
- 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 Sorgo e Milho**, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 177-189, 2018.
- MILBORROW, S. **Rpart.plot**: Plot 'rpart' Models: an Enhanced Version of 'plot.rpart'. R package version 3.1.1, 2022. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=rpart.plot>. Acesso em: 25/04/2023.
- MWADZINGENI, L.; SHIMELIS, H.; TESFAY, S.; TSILO, T. J. Screening of bread wheat genotypes for drought tolerance using phenotypic and proline analyses. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 1276, 2016.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **Vienna: R Foundation for Statistical Computing**, 2023.

- SAH, R. P; PRASAD, M; PANDIT, M; TUDU, V. K; CHAKRAVARTY, M. K; NARAYAN, S. C; RANA, M; MOHARANA, D. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 10, n. 2944, p. 1-15, 2020.
- SANTOS, H. G; HACOMINE, P. K. T; ANJOS, L. H. C; OLIVEIRA, V. A; LUMBRERAS, J. F; COELHO, M. R; ALMEIDA, J. A; ... CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2018.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**, 6. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 858p.
- THERNEAU, T.; ATKINSON, B. **Rpart**: Recursive Partitioning and Regression Trees. R package version 4.1.19, 2022. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=rpart>. Acesso em: 25/04/2023.
- VEENSTRA, R. L.; MESSINA, C. D.; BERNING, D.; HAAG, L. A.; CARTER, P.; HEFLEY, T. J.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. A. Effect of tillers on corn yield: Exploring trait plasticity potential in unpredictable environments. **Crop Science**, [S.l.], v. 61, n. 1, p. 3660-3674, 2021.
- ZHOU, B; YUE, Y; SUN, X; WANG, X; WANG, Z; MA, W; ZHAO, M. Maize Grain Yield and Dry Matter Production Responses to Variations in Weather Conditions. **Agronomy Journal**, [S.l.], v. 108, n. 1, p. 196-204, 2016.

CONTRIBUIÇÕES DE AUTORIA

1 – Murilo Vieira Loro

Discente do doutorado em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0000-0003-0241-4226> • muriloloro@gmail.com

Contribuição: conceituação, metodologia, software, validação, curadoria de dados, análise formal, investigação, redação – rascunho original, redação – revisão e edição, visualização de dados.

2 – Alberto Cargnelutti Filho

Professor do departamento de Fitotecnia na Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0000-0002-8608-9960> • alberto.cargnelutti.filho@gmail.com

Contribuição: conceituação, metodologia, software, validação, curadoria de dados, análise formal, investigação, redação – revisão e edição, visualização de dados, supervisão, administração do projeto, recursos e obtenção de financiamento

3 – Vithória Morena Ortiz

Discente do mestrado em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0000-0002-8112-9812> • vithoria.ortiz159@gmail.com

Contribuição: análise formal, investigação e redação – revisão e edição

4 – João Augusto Andretta

Discente do curso de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0000-0003-0633-1102> • aundregusto@gmail.com
Contribuição: análise formal, investigação e redação – revisão e edição

5 – Mikael Brum dos Reis

Discente do curso de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0000-0003-4226-690X> • mikareis1999@gmail.com
Contribuição: análise formal, investigação e redação – revisão e edição

6 – Bruno Raul Schuller

Discente do curso de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0000-0002-1811-7245> • bruninhoschuller2904@gmail.com
Contribuição: análise formal, investigação e redação – revisão e edição

Como citar este artigo

LORO, M. V.; CARGNELUTTI FILHO, A.; ORTIZ, V. M.; ANDRETTA, J. A.; REIS, M. B. dos; SCHULLER, B. R. Predição da produtividade de grãos de bases genéticas de milho por meio de variáveis fenológicas e meteorológicas. **Ciência e Natura**, 47, e83990, 2025. <https://doi.org/10.5902/2179460X83990>.