

Árvore de regressão para previsão da produtividade de matéria fresca da parte aérea de teosinto em função de variáveis meteorológicas

Mikael B. Reis¹, Alberto Cargnelutti Filho², Murilo V. Loro^{†3}, João Augusto Andretta¹, Vithória M. Ortiz³, Bruno R. Schuller¹

¹Discente do curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

²Docente da Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia.

³Discente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi verificar se é possível prever a produtividade de matéria fresca da parte aérea de teosinto em função de variáveis meteorológicas. Foi conduzido um experimento com nove datas de semeadura (08/10/2021 a 01/01/2022). As semeaduras foram realizadas em uma fileira de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,80 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas na fileira. Em cada fileira, foram selecionadas, aleatoriamente, cinco plantas, totalizando 45 plantas. Em 28/03/2022, nas cinco primeiras datas de semeadura, e em 22/04/2022, nas últimas quatro datas de semeadura, determinou-se a produtividade de massa fresca da parte aérea da planta (MFPA, em g). Calculou-se a radiação solar global acumulada e a soma térmica dos subperíodos semeadura ao florescimento masculino (estádio vegetativo) e florescimento masculino à colheita (estádio reprodutivo). Aplicou-se o algoritmo de análise de árvore de regressão para previsão da MFPA em função das variáveis meteorológicas. A árvore de regressão foi realizada com os dados de todas as plantas e datas de semeadura (n=45). A radiação solar global acumulada no florescimento masculino à colheita foi o principal nó de divisão. No segundo nó hierárquico, os critérios de divisão foram soma térmica da semeadura ao florescimento masculino e radiação solar global acumulada da semeadura ao florescimento masculino. O maior desempenho produtivo (MFPA = 1162 g planta⁻¹) foi observado em plantas com radiação solar global acumulada no estágio reprodutivo menor que 494 MJ m⁻² e radiação solar global acumulada no estágio vegetativo inferior a 3257 MJ m⁻² (33% das observações).

Palavras-chave: *Zea mays ssp. mexicana*; radiação solar global; soma térmica; árvore de regressão.

Regression tree for prediction the yield of fresh matter of teosinte aerial part in function of meteorological variables

Abstract: The objective of this work was to verify if it is possible to predict the yield of fresh matter of teosinte aerial part in function of meteorological variables. An experiment was conducted with nine sowing dates (10/08/2021 to 01/01/2022). Sowings were carried out in a 5 m long row, spaced 0.80 m between rows and 0.20 m between plants in the row. In each row, five plants were randomly selected, totaling 45 plants. On 03/28/2022, in the first five sowing dates, and on 04/22/2022, in the last four sowing dates, the fresh matter of the aerial part of the plant (FMAP, in g) was determined. The cumulative global solar radiation and the thermal sum of the subperiods from sowing to male flowering (vegetative stage) and male flowering to harvest (reproductive stage) were calculated. The regression tree analysis algorithm was applied to forecast the FMAP as a function of meteorological variables. The regression tree was performed with data from all plants and sowing dates (n=45). The cumulative global solar radiation from male flowering to harvest was the main dividing point. In the second hierarchical node, the division criteria were thermal sum from sowing to male flowering and cumulative global solar radiation from sowing to male flowering. The highest productive performance (FMAP = 1162 g plant⁻¹) was observed in plants with cumulative global solar radiation in the reproductive stage lower than 494 MJ m⁻² and global accumulated solar radiation in the vegetative stage lower than 3257 MJ m⁻² (33% of observations).

Keywords: *Zea mays ssp. mexicana*; global solar radiation; thermal sum; regression tree.

^{††}Autor correspondente: muriloloro@gmail.com.

Introdução

O teosinto (*Zea mays* subsp. *mexicana*) pertencente à família *Poaceae* e caracterizado como uma planta anual de verão. Possui características de desenvolvimento rústico e de rápido estabelecimento (MOHAN; DAR; SINGH, 2017). Apresenta alta capacidade de perfilhamento e rebrote, podendo atingir produção de 9,2 kg m⁻² de massa fresca (JHA et al., 2016). Tem características nutricionais de alta qualidade sendo uma excelente alternativa como espécie forrageira (KUMAR et al., 2016).

O sucesso de uma espécie forrageira é determinado pela capacidade de suporte de carga animal e produção de massa fresca. No entanto, a expressão do potencial produtivo de uma forrageira é determinada pela constituição genética que interage com as condições meteorológicas do ambiente de cultivo (BRETAS et al., 2021). Por isso, o cultivo em datas de semeadura tem sido umas das estratégias eficientes para compreender as relações entre variáveis meteorológicas e a resposta produtiva das plantas, uma vez que maximiza a variação das condições ambientais (DJAMAN et al., 2022). Logo, compreender a resposta da produção de forragem, por meio dos efeitos das variáveis meteorológicas é importante para o posicionamento adequado das culturas (COELHO et al., 2022).

Dentre os modelos estatísticos utilizados para compreender as relações, a análise de árvore de regressão possibilita estimar valores ótimos das variáveis independentes, que promovem uma maior média de expressão da variável dependente (LOH et al., 2011). Esta metodologia foi utilizada para predição da produção de silagem de milho (JEONG et al., 2016) e biomassa da braquiária (BRETAS et al., 2021), por meio de variáveis meteorológicas. A radiação solar foi considerada a principal variável que determinou a produção de silagem de milho (JEONG et al., 2016). Em braquiária, dentre as variáveis meteorológicas, a precipitação pluviométrica e a temperatura do ar foram as mais importantes para predizer a produção de biomassa verde (BRETAS et al., 2021). Em palma forrageira, Araújo Júnior et al. (2021) observaram que a temperatura mínima do ar, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica foram as variáveis que mais afetaram o acúmulo da massa de forragem.

No entanto, não foram encontrados estudos de predição da produção de forragem de teosinto por meio de variáveis meteorológicas. Logo, predizer a massa fresca da parte aérea da planta de teosinto, por meio de variáveis meteorológicas, permite o posicionamento de cultivo da cultura em datas de semeadura adequadas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi verificar se é possível predizer a produtividade de matéria fresca da parte aérea de teosinto em função de variáveis meteorológicas.

Material e métodos

O experimento foi conduzido no ano agrícola 2021/2022 na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, localizada a 29°42'S, 53°49'W e a 95 m de altitude. O clima do local é classificado como *Cfa* subtropical úmido (ALVARES et al., 2013) e o solo como Argissolo Vermelho distrófico arênico (SANTOS et al., 2018). Foi realizada a análise química do solo na profundidade de 0 – 20 cm, que apresentou: pH em água 1:1: 5,4; Ca: 5,0 cmol_c dm⁻³; Mg: 2,3 cmol_c dm⁻³; Al: 0,2 cmol_c dm⁻³; H+Al: 2,8 cmol_c dm⁻³; índice SMP: 6,4; matéria orgânica: 2,2%; teor de argila: 28,0%; S: 15,6 mg dm⁻³; P (*Mehlich*): 38,3 mg dm⁻³; K: 0,614 cmol_c dm⁻³; CTC pH7: 10,8 cmol_c dm⁻³; Cu: 1,41 mg dm⁻³; Zn: 1,96 mg dm⁻³; B: 0,76 mg dm⁻³. A área experimental totalizou 36 m² e o preparo do solo foi realizado com a aplicação de 300 kg há⁻¹ de N-P-K na proporção 5:20:20, e uma gradagem.

O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado com nove datas de semeadura (08/10/2021, 30/10/2021, 13/11/2021, 20/11/2021, 04/12/2021, 11/12/2021, 18/12/2021, 25/12/2021 e 01/01/2022). As semeaduras foram realizadas com três sementes por cova, em uma fileira de 5 m de comprimento, espaçadas a 0,80 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas na fileira. Após a emergência das plântulas foi realizado um desbaste para atingir o estande final desejado. Foram marcadas após

emergência, aleatoriamente, cinco plantas em cada fileira totalizando 45 plantas na área experimental (9 datas de semeadura \times 5 plantas/data de semeadura).

Em cada data de semeadura registraram-se as datas de: florescimento masculino e o ponto de colheita da forragem. Assim, foram obtidos os seguintes caracteres fenológicos: dias da semeadura ao florescimento masculino (SFM, dias) e dias do florescimento masculino à colheita (FMC, dias). As cinco plantas de cada data de semeadura foram colhidas individualmente para avaliação da massa fresca da parte aérea da planta (MFPA, em g planta⁻¹).

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 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 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) e florescimento masculino à colheita (RFMC, 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: $GD = Tmed - Tb$, onde: Tmed = temperatura média diária do ar, em °C e Tb = temperatura base inferior (10°C). A Tb é a temperatura abaixo da qual não ocorre o desenvolvimento da planta. Para 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) e florescimento masculino à colheita (SFMC, °C dia).

Para cada variável, em cada data de semeadura calculou-se os valores médios. Aplicou-se a análise de componentes principais, a fim de verificar possíveis formações de grupos entre datas de semeadura. Estimaram-se os parâmetros do algoritmo de árvore de regressão para a predição da MFPA em função das variáveis meteorológicas (RSFM, RFMC, SSFM, SFMC). 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.

Resultados e discussão

A massa fresca da parte aérea da planta variou entre 477,00 a 1318,20 gramas entre as nove datas de semeadura, com média geral de 824,63 gramas (Tabela 1). A segunda, terceira e quarta data de semeadura apresentaram condições ambientais para expressão da maior média da massa fresca da parte aérea da planta ($\geq 1126,60$ gramas). Assim, pode-se inferir que nessas datas de semeadura houve um melhor desenvolvimento das plantas de teosinto. Isso permite identificar os períodos de semeadura ideais para o cultivo do teosinto e otimizar a produção de forragem, contribuindo para o manejo eficiente dos sistemas pecuários e a obtenção de melhores resultados na produção agrícola.

A duração da SFM e do FMC variou de 70 a 148 dias e 16 a 58 dias, respectivamente. Houve redução gradativa da SFM e aumento gradativo da FMC, com o atraso das datas de semeadura. Nas três primeiras datas de semeadura houve maior acúmulo de RSFM e menor acúmulo da RFMC, enquanto que na última data observaram-se os menores acúmulos de RSFM e maiores acúmulos de RFMC.

Tabela 1. Médias da massa fresca de parte aérea (MFPA, g), dias da sementeira ao florescimento masculino (SFM), dias do florescimento masculino à colheita (FMC), radiação solar global acumulada da sementeira ao florescimento masculino (RSFM, MJ m⁻²), radiação solar global acumulada do florescimento masculino à colheita (RFMC, MJ m⁻²), soma térmica da sementeira ao florescimento masculino (SSFm, °C dia) e soma térmica do florescimento masculino à colheita (SFMC, °C dia).

Datas de sementeira	MFPA	SFM	FMC	RSFM	RFMC	SSFm	SFMC
08/10/2021	595,60	148,00	23,00	3489,56	367,75	2014,83	262,29
30/10/2021	1213,00	126,00	23,00	3023,53	367,75	1810,28	262,29
13/11/2021	1318,20	112,00	23,00	2677,45	367,75	1638,19	262,29
20/11/2021	1126,60	70,00	58,00	1776,57	1148,41	1060,57	761,34
04/12/2021	954,60	98,00	16,00	2320,72	270,03	1473,09	172,57
11/12/2021	451,00	91,00	41,00	2122,95	620,08	1382,94	387,23
18/12/2021	563,80	84,00	41,00	1998,05	620,08	1283,98	387,23
25/12/2021	721,90	77,00	41,00	1804,27	620,08	1185,25	387,23
01/01/2022	477,00	70,00	41,00	1592,25	620,08	1073,94	387,23
Média Geral	824,63	97,33	34,11	2311,71	555,78	1435,90	363,30

Fonte: Autores.

Nas três primeiras datas de sementeira observaram-se os maiores valores de SSFM ($\geq 1638,19$ °C dia). Sementeiras precoces em regiões subtropicais caracterizam-se por baixas temperaturas médias do ar. Logo, neste período há menor acúmulo de graus dia e, assim, há aumento do estágio vegetativo da cultura. Isso explica a maior duração, acúmulo de radiação solar global e soma térmica no período vegetativo das três primeiras datas de sementeira.

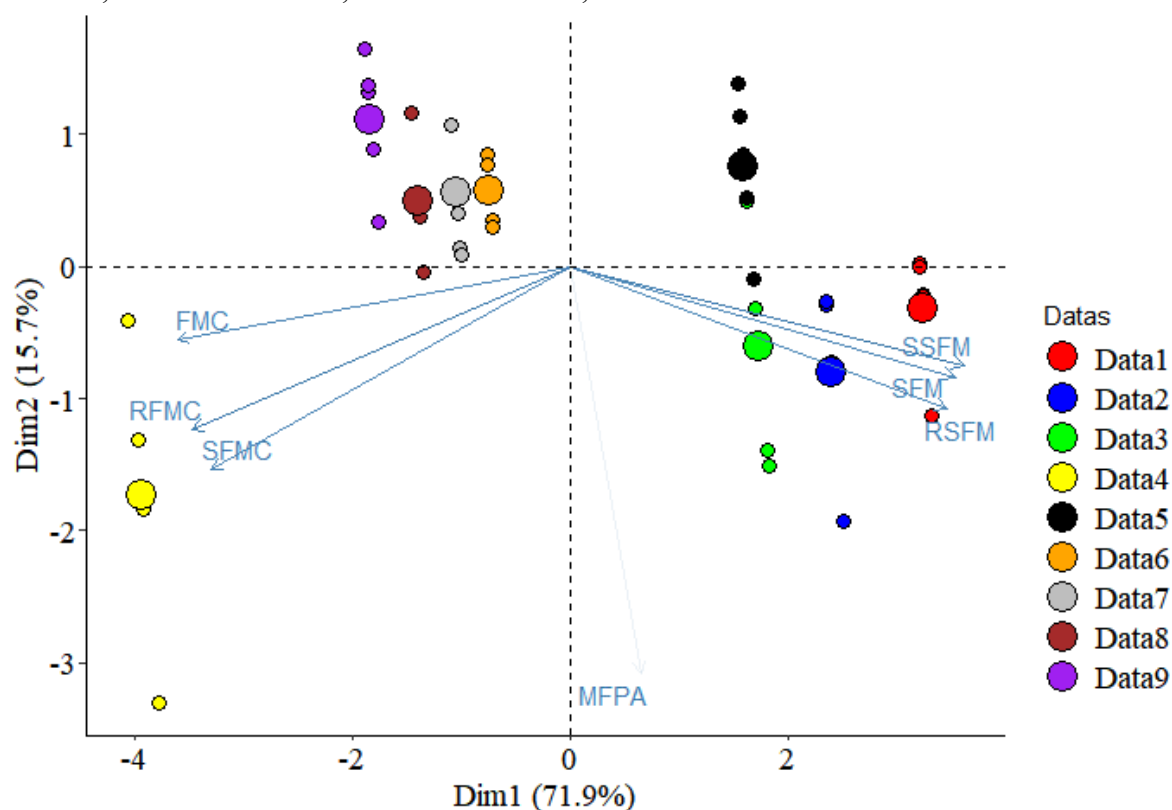
Na análise de componentes principais, os dois primeiros componentes principais explicaram 87,60% da variação total da matriz de dados (Figura 1). Esta é considerada uma explicação satisfatória da variabilidade dos dados. Logo, definiu-se que os dois primeiros componentes principais foram suficientes para explicar a variação total dos dados.

As observações de cada data de sementeira foram coloridas distintamente. Os pontos ou os grupos que estão na mesma direção e sentido dos vetores das variáveis indicam que estes apresentam maiores expressões destas variáveis. Por exemplo, as maiores magnitudes de MFPA são observadas na segunda, terceira e quarta datas de sementeira. Na quarta data de sementeira observou-se a maior duração do FMC e as maiores magnitudes de RFMC e SFMC. No entanto, nesta mesma data foram evidenciadas a menor duração do SFM e as menores magnitudes de RSFM e SSFM.

As variações entre datas e entre as plantas dentro das datas de sementeira são claramente observadas. A maior variação entre as plantas dentro de uma data ocorreu na quarta data de sementeira. Houve grande variação, principalmente, das variáveis meteorológicas entre as nove datas de sementeira. Isso fez com que os genótipos fossem, claramente, agrupados dentro de suas datas. Esta variação é fundamental para que seja possível o estudo de predição da MFPA por meio de variáveis meteorológicas.

Por meio da árvore de regressão foi possível identificar as faixas das variáveis meteorológicas que correspondem a um aumento da massa fresca da parte aérea da planta de teosinto (Figura 2). A radiação solar global acumulada durante o estágio reprodutivo da cultura do teosinto 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 massa fresca da parte aérea da planta de teosinto. Esses resultados são similares aos evidenciados por Jeong et al. (2016), sendo a radiação solar global a principal variável que determinou a produção de silagem de milho. Já em palma forrageira Araújo Júnior et al. (2021), observaram a maior influência da temperatura mínima, umidade relativa e precipitação pluviométrica no acúmulo de forragem.

Figura 1. Variabilidade total dos dados representados por dois componentes principais. Massa fresca de parte aérea da planta (MFPA, g), dias da sementeira ao florescimento masculino (SFM), dias do florescimento masculino à colheita (FMC), radiação solar global acumulada da sementeira ao florescimento masculino (RSFM, MJ m⁻²), radiação solar global acumulada do florescimento masculino à colheita (RFMC, MJ m⁻²), soma térmica da sementeira ao florescimento masculino (SSFm, °C dia) e soma térmica do florescimento masculino à colheita (SFMC, °C dia). Os círculos maiores correspondem ao desempenho médio de cada grupo. Data1: 08/10/2021, Data2: 30/10/2021, Data3: 13/11/2021, Data4: 20/11/2021, Data5: 04/12/2021, Data6: 11/12/2021, Data7: 18/12/2021, Data8: 25/12/2021 e Data9: 01/01/2022.

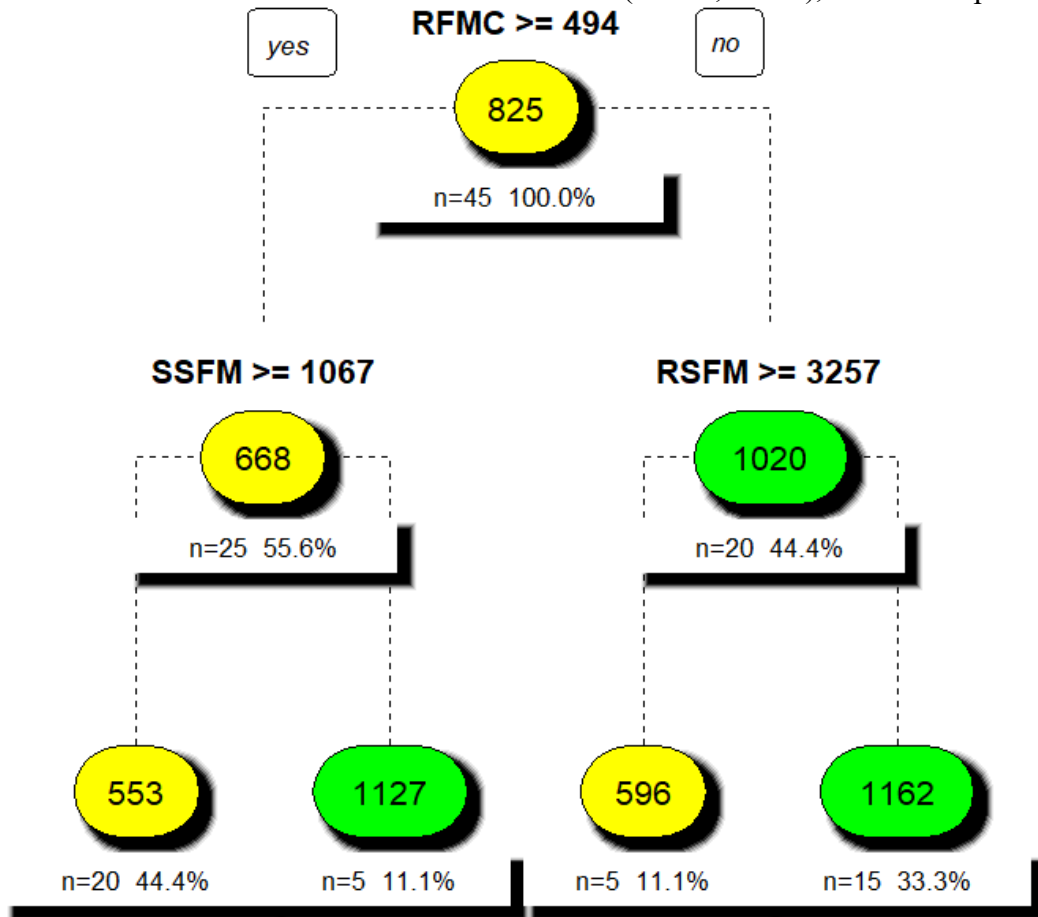


O maior acúmulo de radiação solar global no estágio reprodutivo associado a menor soma térmica no estágio vegetativo e o menor acúmulo de radiação solar global no estágio reprodutivo associado com menor radiação solar global acumulada no estágio vegetativo potencializaram a produção de massa fresca da parte aérea da planta de teosinto. Assim, pode-se compreender que há uma relação entre a radiação solar global e a soma térmica para definir o potencial de produção do teosinto. Na *brachiaria*, Bretas et al. (2021) também identificaram que houve relação entre as variáveis meteorológicas para definir a produção de forragem.

Foi observado que as plantas com valor de RFMC superior a 494 MJ m⁻² e SSFM inferior a 1067 °C dia apresentaram produção média de massa fresca da parte aérea da planta igual a 1127 gramas (11,10% das observações). Produção média da massa fresca da parte aérea da planta igual a 1162 gramas também foi observado em plantas com RFMC menor que 494 MJ m⁻² e RSFM inferior a 3257 MJ m⁻².

Logo, pode-se compreender que, quando a soma térmica no estágio vegetativo é inferior a 1067 °C dia, a produção de massa fresca de teosinto é compensada se houver um acúmulo de radiação solar global superior a 494 MJ m⁻². Em milho, Yang et al. (2021) também revelaram que o maior acúmulo de radiação solar global no estágio reprodutivo contribuiu para aumento da produção de biomassa.

Figura 2. Representação gráfica da árvore de regressão para predição da produção de massa fresca da parte aérea da planta de teosinto, em gramas, em função da radiação solar global acumulada da sementeira ao florescimento masculino (RSFM, MJ m⁻²), radiação solar global acumulada do florescimento masculino à colheita (RFMC, MJ m⁻²), soma térmica da sementeira ao florescimento masculino (SSFm, °C dia) e soma térmica do florescimento masculino à colheita (SFMC, °C dia), com n = 45 plantas.



Fonte: Autores.

Segundo Coelho et al. (2022), os efeitos adversos das variáveis meteorológicas podem ser minimizados a partir do posicionamento de genótipos com base nas condições meteorológicas das datas de sementeira. Com base nos resultados da árvore de regressão, pode-se inferir que as variáveis meteorológicas, principalmente a RSFM, RFMC e SSFM, determinam o potencial de produção de massa fresca da parte aérea da planta de teosinto. Isso proporciona o posicionamento de genótipos de teosinto de acordo com as condições meteorológicas incidentes nas datas de sementeira.

Conclusões

É possível prever a produtividade de matéria fresca da parte aérea da planta de teosinto por meio de variáveis meteorológicas. O maior desempenho produtivo médio de massa fresca da parte aérea da planta (MFPA = 1162 g planta⁻¹) é observado em plantas de teosinto com radiação solar global acumulada no estágio reprodutivo menor que 494 MJ m⁻² e radiação solar global acumulada no estágio vegetativo inferior a 3257 MJ m⁻² (33% das observações).

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 304652/2017-2 e 304878/2022-7), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela concessão de bolsas aos autores.

Referências

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 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*, v. 76, n. 1, p. 682-692, 1960.
- BRETAS, I. L. et al. Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in *Brachiaria* pastures by combining meteorological data and satellite imagery. *Grass and Forage Science*, v. 76, n. 3, p. 340-352, 2021.
- COELHO, A. E. et al. 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*, v. 46, e0210087, p. 1-21, 2022.
- DJAMAN, K. et al. Planting date and plant density effects on maize growth, yield and water use efficiency. *Environmental Challenges*, v. 6, e100417, p. 1-11, 2022.
- JEONG, J. H. et al. Random forests for global and regional crop yield predictions. *Plos One*, v. 11, n. 6, e0156571, 2016.
- JHA, A. K. et al. Impact of irrigation method on water use efficiency and productivity of fodder crops in Nepal. *Climate*, v. 4, n. 1, p. 1-13, 2016.
- KUMAR, B. et al. Herbage production, nutritional composition and quality of teosinte under Fe fertilization. *International Journal of Agriculture & Biology*, v. 18, n. 2, p. 319-329, 2016.
- LOH, W. Y. *Classification and regression trees*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, v. 1, n. 1, p. 14-23, 2011.
- MILBORROW, S. `rpart.plot: Plot 'rpart' Models: an Enhanced Version of 'plot.rpart'`. R package version 3.1.1, 2022. <<https://CRAN.R-project.org/package=rpart.plot>>.
- MOHAN, S.; DAR, E. A.; SINGH, M. Fodder quality of teosinte fodder as influenced by nitrogen, phosphorus and zinc application. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, v. 5, p. 596-604, 2017.
- R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

SANTOS, H. G. et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa. p. 356, 2018.

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>.

YANG, Y. S. et al. The effect of solar radiation change on the maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 20, n. 2, p. 482-493, 2021.