



ÁGUAS NÃO PASSADAS: A MEMÓRIA A SECA POTENCIALIZA A PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR

Palavras-Chave: BIOENERGIA, BIOMASSA, PROPAGAÇÃO VEGETATIVA.

Autores(as):

JULIANE LOPES, IB – UNICAMP

MSc. MARIA DOLORES PISSOLATO (coorientadora), IB – UNICAMP

Prof. Dr. RAFAEL VASCONCELOS RIBEIRO (orientador), IB – UNICAMP

INTRODUÇÃO

A seca é um dos principais fatores climáticos que impactam atualmente as áreas cultivadas em todo o mundo, resultando na redução da produtividade de várias culturas, incluindo a cana-de-açúcar. Como espécie semi-perene, a cana-de-açúcar enfrenta secas sazonais em condições de campo, onde o déficit hídrico causa redução na fotossíntese, acúmulo de carboidratos, alterações no metabolismo antioxidante e comprometimento do crescimento da planta e produção de sacarose (Ribeiro et al., 2013). Além disso, os impactos adversos dos períodos de seca na produtividade da cana-de-açúcar variam conforme a duração, intensidade e frequência das secas, estágio de desenvolvimento da cultura e a capacidade de adaptação das plantas a estresses repetidos (Jaiphong et al., 2016).

Em um ambiente de estresse dinâmico e flutuante, a sobrevivência das plantas pode depender significativamente de sua capacidade de "lembrar" ou "aprender" com eventos de seca anteriores e adaptar sua fisiologia para responder com maior velocidade e eficácia a secas futuras (Galviz et al., 2020). Assim, a memória de estresse é definida justamente como essa capacidade de plantas estressadas armazenarem informações de forma que possam responder de uma maneira diferente quando expostas novamente ao estresse, geralmente levando à uma melhor performance (Avramova, 2015; Crisp et al., 2016). Nesse sentido, Marcos et al. (2018a,b) concluíram que plantas de cana-de-açúcar são capazes de reter informações a partir de eventos prévios de seca, uma vez que essas plantas apresentaram melhor performance fotossintética quando foram submetidas a seca pela terceira vez, em relação a um primeiro evento estressante.

Além disso, a memória transgeracional, é um fenômeno observado em plantas onde a experiência de estresse de uma geração influencia o desempenho e a resposta das gerações subsequentes. Essa memória pode influenciar a fisiologia e a resposta da prole, aumentando sua capacidade de lidar e se adaptar às condições de estresse (Bilichak e Kovalchuk, 2016). A cana-de-açúcar é propagada vegetativamente, tornando a memória transgeracional especial nessa cultura. Acredita-se que o provável sítio de acúmulo de fatores/metabólitos induzidos pela seca sejam as gemas laterais.

No presente estudo, acompanhamos o desenvolvimento de propágulos de cana-de-açúcar cultivadas em condições comerciais, e obtidas de plantas previamente estressadas em diferentes fases fenológicas. Analisando os efeitos dessa memória transgeracional, podemos obter informações valiosas sobre a capacidade adaptativa das plantas à seca e sua influência na produção da cultura. Essa compreensão pode fornecer *insights* importantes para o desenvolvimento de estratégias de manejo e seleção de variedades mais resistentes, visando aprimorar a produtividade e a sustentabilidade da cultura de cana-de-açúcar em condições de estresse hídrico.

METODOLOGIA

Material vegetal e condições de crescimento

Foram utilizados dois genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): IACSP95-5000 (material com alta produtividade de colmos) e IACCTC07-8008 (material tolerante à seca). As mudas, propagadas vegetativamente, foram adquiridas de ambos os genótipos a partir de: (a) Plantas expostas a três ciclos de seca e reidratação na fase de máximo perfilhamento (MP); (b) Plantas expostas a três ciclos de seca e reidratação na fase de maturação (M); (c) Plantas não estressadas (C, controles).

Os toletes obtidos dos três grupos foram germinados em vasos (500 mL) contendo substrato comercial composto por turfa de esfagno, vermiculita expandida, dolomito calcário, gipsita agrícola e adubo NPK (Carolina Soil®, Vera Cruz RS, Brasil). Após 90 dias, essas mudas foram transferidas para o campo, onde foi simulado o cultivo comercial.

O experimento foi conduzido em uma área de 82 m² localizada no Centro Experimental do Instituto Agrônomo (IAC) em Campinas, SP (22°54'S, 47°03'W, 670 m altitude) (Fig. 1). O clima local, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa (Setzer, 1966), definido como tropical de altitude, com inverno seco e temperatura média do mês mais quente maior que 22 °C.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 3-4 repetições e parcelas de 2,25 m e espaçadas de 1,5 m. Foram selecionados aleatoriamente para as análises propostas aqui, quatro touceiras de cada grupo. Após 7 meses DAP (dias após o plantio), iniciamos o acompanhamento do crescimento vegetativo das touceiras.



Figura 1. Plantio das mudas nas instalações do IAC, em Campinas-SP em março/2022

Biometria

Os dados biométricos foram avaliados a cada 30 dias. Para isso, foi selecionado um perfilho representativo de cada touceira. Os parâmetros determinados foram: altura do colmo do perfilho principal, nº de folhas verdes e o nº de perfilhos total da touceira.

Análise tecnológica do colmo

Colmos foram coletados, identificados e imediatamente encaminhados para o processamento no Laboratório de Análise Tecnológica do Centro de Cana do IAC/Ribeirão Preto, seguindo os métodos do Sistema de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (SPCTS), conforme descrito em Fernandes (2003). As variáveis consideradas foram: sólidos solúveis do caldo (SS, °Brix); sacarose aparente do caldo (POL, %); teor de fibra (%); pureza (POL/SS, %); açúcares redutores (AR, %); e açúcares totais recuperáveis (ATR, kg/t).

Produção de biomassa

Quando o índice de maturação da planta foi >1, uma soqueira/parcela foi colhida para a quantificação da biomassa. As plantas foram divididas em colmo (produtividade de colmos, PC), ápice e palha e pesadas para determinar a biomassa fresca da parte aérea (MSPA). O ápice era composto por lâminas foliares verdes, bainhas foliares verdes e a porção apical imatura do colmo. O índice de área foliar foi medido em uma planta representativa de cada parcela com um planímetro eletrônico modelo LI-3000C (LI COR, Lincoln NE, EUA) acoplado ao acessório de mesa LI-3050C (LI-COR, Lincoln NE, EUA). Os resultados foram então extrapolados para a parcela (2,25 m²) e posteriormente para um hectare.

Análise morfológica de raiz

Foi coletado um volume de 7 L de terra próximo à base da soqueira. As raízes foram separadas da terra, lavadas e submetidas à análise morfológica. Parâmetros morfológicos da raiz como: comprimento total, área, volume e diâmetro foram determinados usando um scanner EPSON1680 e o software WinRHIZO (Regent Instruments Inc., Quebec, Canadá), como realizado por Pissolato et al. (2021).

Análise estatística

Os dados foram analisados por meio da estatística Bayesiana através do software JASP (<https://jasp-stats.org/>). Quando diferenças significativas foram detectadas, os valores médios ($n= 3-4$) foram comparados pelo Fator de Bayes (BF_{10}), onde $1 < BF_{10} < 3$ = suporte fraco; $3 < BF_{10} < 20$ = suporte positivo à hipótese alternativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o decorrer do período de coleta de dados, pudemos observar diferenças significativas no número de perfilhos em todos os meses (com exceção do mês 4) para propágulos do genótipo IACSP95-5000 do grupo M. No momento da colheita, tanto o grupo M quanto o MP deste mesmo genótipo apresentaram maior número de perfilhos e número de folhas verdes em relação ao grupo C (Fig. 2a,c). Não observamos diferenças quanto ao comprimento do perfilho principal. Para o genótipo IACCTC07-8008, propágulos do grupo MP apresentaram maior número de perfilhos apenas nos meses 1 e 7 em relação a plantas do grupo C (Fig. 2a). O comprimento do perfilho principal foi significativamente maior em plantas do grupo M em relação ao grupo C no final do experimento (Fig. 2b). O número de folhas verdes dos grupos M foi significativamente maior nos primeiros meses de avaliações em relação aos grupos C e MP, porém, no momento da colheita, apesar dos grupos MP e M terem apresentado valores maiores, não observamos diferenças significativas (Fig. 2c).

Quanto à produção de biomassa, plantas dos genótipos IACCTC07-8008 e IACSP95-5000 obtidas dos grupos MP e M apresentaram valores significativamente mais altos para a produtividade final do colmo, massa fresca total da parte aérea e índice de área foliar em comparação com as plantas obtidas de plantas não estressadas (grupo C). Além disso, plantas de ambos genótipos obtidas dos grupos MP e M apresentaram valores significativamente mais altos de volume radicular em comparação às obtidas do grupo C. Essa resposta também foi observada para a área total radicular encontrada em plantas do genótipo IACSP95-5000 obtidas de plantas estressadas (Tabela 1).

Para os parâmetros de qualidade tecnológica do colmo, propágulos do genótipo IACSP95-5000 não apresentaram quaisquer diferenças significativas entre os grupos experimentais. Em contrapartida, propágulos do grupo M do genótipo IACCTC07-8008 apresentaram maior SS, POL, pureza, ATR e teor de fibras em comparação ao grupo C (Tabela 2).

A memória do estresse hídrico envolve mecanismos epigenéticos, como modificações no DNA ou histonas, e têm sido implicados na herança da memória do estresse. Essa memória pode influenciar a fisiologia e a resposta da prole, aumentando sua capacidade de lidar e se adaptar às condições de seca (Jacques et al., 2021). De acordo com Marcos et al. (2018b), a memória de seca pode conferir aos propágulos de cana-de-açúcar maior tolerância ao estresse hídrico, aumentando o conteúdo foliar de prolina, aminoácido que atua como uma molécula osmoprotetora, e aumento da atividade de enzimas antioxidantes. Aqui, propágulos de cana-de-açúcar demonstraram que a memória de estresse foi herdada de plantas previamente estressadas. Notamos que os propágulos obtidos de plantas estressadas já demonstravam diferenças no crescimento ao longo dos meses em condição de campo em comparação aos propágulos obtidos de plantas não estressadas, e a memória a seca herdada pelos propágulos foi capaz de aumentar a produtividade final dessas plantas, tornando-as mais capazes de lidarem com condições limitantes de em campo. Esse é um resultado muito importante, uma vez que o setor agrícola deve conduzir plantios resilientes e colheitas para atender à crescente necessidade da produção global de alimentos.

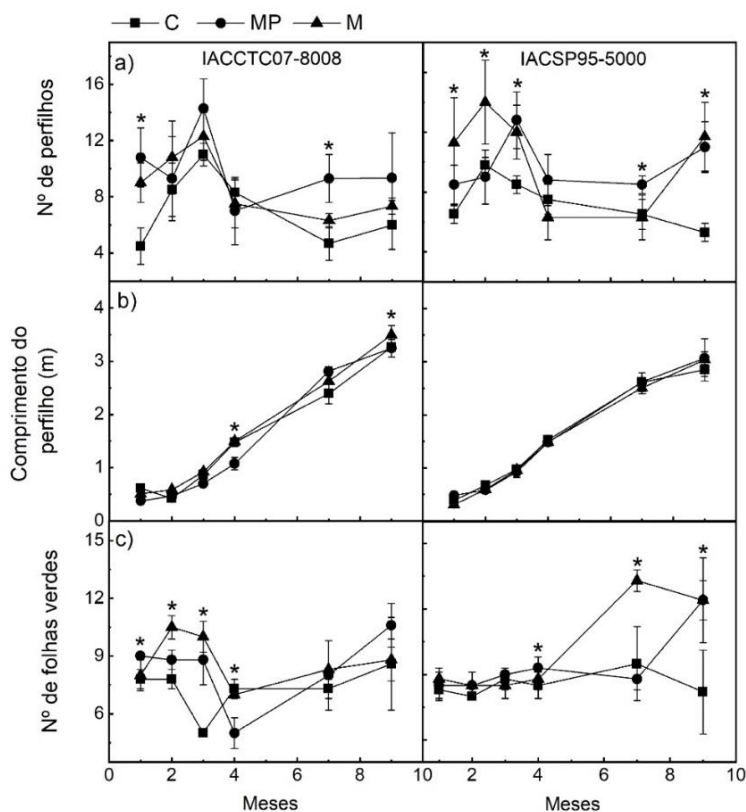


Figura 2 - Número de perfilhos (em a), altura do perfilho principal (em b) e número de folhas verdes (em c) ao longo dos meses de propágulos obtidos de plantas mantidas hidratadas (C) ou estressadas no estágio de perfilhamento (MP) e maturação (M) dos genótipos de cana-de-açúcar IACCTC07-8008 e IACSP95-5000 e cultivados em condições de campo. Cada símbolo representa a média ($n=3-4$) \pm desvio padrão. Asteriscos indicam diferenças significativas entre os grupos experimentais ($BF_{10}>3$).

Tabela 1. Produtividade final de colmo (PC), massa fresca total da parte aérea (MFT), índice de área foliar (IAF) e volume radicular total (VRT) de propágulos obtidos de plantas mantidas hidratadas (C) ou estressadas no estágio de perfilhamento (MP) e maturação (M) dos genótipos de cana-de-açúcar IACCTC07-8008 e IACSP95-5000 e cultivados em condições de campo. Cada barra representa a média ($n=3$) \pm desvio padrão. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os grupos experimentais ($BF_{10}>3$).

Variáveis	IACCTC07-8008			IACSP95-5000		
	C	MP	M	C	MP	M
PC (t/ha)	156,5 \pm 46,2 b	276,8 \pm 93,1 ab	352,26 \pm 57,4 a	177,3 \pm 53,6 b	614,8 \pm 114,1 ab	448, \pm 183,0 a
MFT (t/ha)	176,6 \pm 54,0 b	307,6 \pm 107,0 ab	383,34 \pm 59,02 a	207,8 \pm 62,5 b	712,1 \pm 143,5 a	575,4 \pm 208,8 ab
IAF (m ² /m ²)	1,9 \pm 0,3 b	3,0 \pm 0,6 ab	4,0 \pm 0,1 a	5,6 \pm 1,5 b	10,5 \pm 1,8 a	9,4 \pm 0,9 a
VRT (cm ³)	10,9 \pm 1,8 b	18,6 \pm 1,3 a	17,3 \pm 0,9 a	12,4 \pm 1,5 b	19,3 \pm 4,7 ab	23,6 \pm 1,6 a

Tabela 2. Parâmetros de qualidade tecnológica de colmos oriundos de propágulos de IACSP95-5000 e IACCTC07-8008 obtidos de plantas hidratadas (C) ou estressadas no máximo perfilhamento (MP) ou maturação (M). SS = sólidos solúveis; POL= sacarose aparente; AR= açúcares redutores; ATR= açúcares redutores totais. Valores representam a média ($n=3$) \pm desvio padrão, sendo cada repetição composta por 5-6 colmos. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os grupos ($BF_{10}>3$).

Variáveis	IACCTC07-8008			IACSP95-5000		
	C	MP	M	C	MP	M
SS (°Brix)	13,8 \pm 1,9 b	15,5 \pm 0,8 b	18,1 \pm 0,5 a	20,0 \pm 1,4 a	20,9 \pm 0,3 a	20,9 \pm 0,5 a
POL (%)	10,1 \pm 2,4 b	12,4 \pm 1,1 b	15,5 \pm 0,5 a	17,9 \pm 1,5 a	18,6 \pm 0,4 a	18,8 \pm 0,7 a
Fibra (%)	9,6 \pm 0,4 b	9,7 \pm 0,1 ab	10,3 \pm 0,1 a	10,7 \pm 0,4 a	11,4 \pm 0,4 a	11,1 \pm 0,1 a
Pureza (%)	72,9 \pm 7,2 b	79,6 \pm 2,7 ab	85,4 \pm 0,8 a	89,5 \pm 1,4 a	89,1 \pm 0,4 a	89,7 \pm 0,5 a
AR (%)	1,0 \pm 0,20 a	0,8 \pm 0,03 a	0,6 \pm 0,04 b	0,49 \pm 0,08 a	0,50 \pm 0,02 a	0,48 \pm 0,04 a
ATR (kg/t)	94,4 \pm 17,9 b	111,2 \pm 8,7 b	134,3 \pm 4,6 a	152,5 \pm 11,2 a	156,3 \pm 2,2 a	158,6 \pm 4,4 a

CONCLUSÕES

A capacidade das plantas de lembrarem de eventos de seca passados e ajustarem sua fisiologia para responder de forma mais rápida e eficaz a futuras secas é uma estratégia importante para sua sobrevivência e crescimento em ambientes sujeitos a secas sazonais. Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que plantas de cana-de-açúcar são capazes de “herdar” a memória de estresse causado por ciclos de seca e, como resultado, demonstram um aumento significativo na produtividade em condição de campo, onde momentos de baixa disponibilidade de água são comuns. Esses resultados representam um avanço importante no campo da fisiologia vegetal e tem o potencial de impulsionar a agricultura sustentável, melhorando o rendimento das colheitas em ambientes de secas recorrentes.

BIBLIOGRAFIA

- Avramova Z. Transcriptional ‘memory’ of a stress: transient chromatin and memory (epigenetic) marks at stress-response genes. *The Plant Journal*.83(1): 149-59, 2015.
- Bilichak A, Kovalchuk I. Transgenerational response to stress in plants and its application for breeding. *Journal of Experimental Botany*. 67(7): 2081-92, 2016.
- Crisp PA et al. Reconsidering plant memory: intersections between stress recovery, RNA turnover, and epigenetics. *Science Advances*. 2(2): e1501340, 2016.
- Endres L, et al. Inter-relationship between photosynthetic efficiency, $\Delta^{13}\text{C}$, antioxidant activity and sugarcane yield under drought stress in field conditions. *Journal of agronomy and Crop Science*. 205(5): 433-446. 2019.
- Fernandes AC. **Cálculos na Agroindústria de Cana-de-açúcar**. 2 ed. Piracicaba: STAB, pag. 120, 2003.
- Galviz YC, Ribeiro RV, Souza GM. Yes, plants do have memory. *Theoretical and experimental plant physiology*. 32(3): 195-202, 2020.
- Jacques C, et al. Drought stress memory at the plant cycle level: A review. *Plants*. 10(9): 1873, 2021.
- Jaiphong T, et al. Effects of duration and combination of drought and flood conditions on leaf photosynthesis, growth and sugar content in sugarcane. *Plant Production Science*. 19(3): 427-37, 2016.
- Marcos FC, et al. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. *Journal of Plant Physiology*. 223: 9-18, 2018a.
- Marcos FC, et al. Drought tolerance of sugarcane propagules is improved when origin material faces water deficit. *PLoS One*. 13(12): e0206716, 2018b.
- Pissolato MD et al. Sugarcane regrowth is dependent on rootsystem size: an approach using young plants grown in nutrient solution. *Bragantia*. 13;80, 2021.
- Ribeiro RV, et al. Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. *Experimental Agriculture*. 49: 212–224, 2013.