

Efeitos de diferentes fontes, doses e métodos de aplicação de fósforo sobre a produtividade e a qualidade de variedades de cana-de-açúcar sacarina e energia

SILVA, Fábio Cesar da
MARCHIORI, Luís Fernando Sanglade
CHANG, Helena
MERLOTTO, Gabriel R.
SILVA, Jamile Vitória da

Resumo

A adubação fosfatada desempenha papel essencial no crescimento, produtividade e qualidade da cana-de-açúcar, especialmente em solos tropicais com baixa disponibilidade natural de fósforo (P). Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes fontes, doses e métodos de aplicação de fósforo sobre a produtividade e a qualidade de variedades de cana-de-açúcar Sacarina (RB867515) e Energia (VG11-4094). O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados em fatorial 3x4x2, em parcelas subdivididas, aplicando três doses de fósforo a lanço (0, 150 e 300 kg/ha) e quatro doses no sulco (0, 75, 150 e 300 kg/ha). As análises estatísticas foram realizadas utilizando ANOVA (análise de variância) e o teste de Tukey a 5% de significância. Os parâmetros avaliados incluíram TCH (toneladas de colmo por hectare), Pol (teor de sacarose), fibra, Brix, pureza, ATR (açúcar total recuperável) e fósforo no caldo. Os resultados mostraram que as doses de fósforo e suas interações influenciaram significativamente a produtividade, enquanto o fator variedade, isoladamente, não apresentou diferença significativa. As melhores produtividades foram obtidas com a combinação de 0 kg/ha a lanço e 300 kg/ha no sulco. Observou-se que doses elevadas simultâneas (lanço e sulco) resultaram em menor produtividade, sugerindo possíveis perdas por fixação do fósforo. Os dados também demonstraram impacto do fósforo sobre os teores de ATR e fósforo no caldo, com implicações tecnológicas para a fermentação e clarificação. A aplicação da estatística experimental mostrou-se fundamental para compreender as interações entre os fatores e orientar recomendações agrônomicas mais eficientes. Conclui-se que o manejo adequado da adubação fosfatada pode otimizar o desempenho agrônomo e industrial da cultura, promovendo maior sustentabilidade e produtividade.

Palavras-chave: nutrição mineral, biomassa vegetal, estatística experimental, cana energética.

Abstract

Phosphate fertilization plays an essential role in the growth, productivity and quality of sugarcane, especially in tropical soils with low natural phosphorus (P) availability. The aim of this study was to evaluate the effects of different sources, doses and application methods of phosphorus on the productivity and quality of the sugarcane varieties Sacarina (RB867515) and Energia (VG11-4094) using statistical analyses. The experiment was carried out in a randomized block design with a 3x4x2 factorial, in subdivided plots, applying three doses of phosphorus at the surface (0, 150 and 300 kg/ha) and four doses in the furrow (0, 75, 150 and 300 kg/ha). The analyses were carried out using ANOVA and the Tukey test at 5% significance. The parameters evaluated included TCH

(tons of stalk per hectare), Pol (sucrose content), fiber, Brix, purity, ATR (total recoverable sugar) and phosphorus in the juice. The results showed that the doses of phosphorus and their interactions had a significant influence on productivity, while the variety factor alone showed no significant difference. The best yields were obtained with the combination of 0 kg/ha in the field and 300 kg/ha in the furrow. It was observed that simultaneous high doses (in the field and in the furrow) resulted in lower yields, suggesting possible losses due to phosphorus fixation. The data also showed an impact of phosphorus on the ATR and phosphorus contents in the juice, with technological implications for fermentation and clarification. The use of experimental statistics proved to be fundamental in understanding the interactions between factors and guiding more efficient agronomic recommendations. The conclusion is that proper management of phosphate fertilization can optimize the agronomic and industrial performance of the crop, promoting greater sustainability and productivity.

Keywords: mineral nutrition, plant biomass, experimental statistics, energy cane.

Resumen

La fertilización fosfatada desempeña un papel esencial en el crecimiento, la productividad y la calidad de la caña de azúcar, especialmente en suelos tropicales con baja disponibilidad natural de fósforo (P). El objetivo de este estudio fue evaluar, por medio de análisis estadísticos, los efectos de diferentes fuentes, dosis y métodos de aplicación de fósforo en la productividad y calidad de las variedades de caña de azúcar Sacarina (RB867515) y Energia (VG11-4094). El experimento se realizó en un diseño de bloques al azar con un factorial 3x4x2, en parcelas subdivididas, aplicando tres dosis de fósforo en superficie (0, 150 y 300 kg/ha) y cuatro dosis en el surco (0, 75, 150 y 300 kg/ha). Los análisis se realizaron mediante ANOVA y la prueba de Tukey al 5% de significación. Los parámetros evaluados fueron TCH (toneladas de tallo por hectárea), Pol (contenido de sacarosa), fibra, Brix, pureza, ATR (azúcar total recuperable) y fósforo en el zumo. Los resultados mostraron que las dosis de fósforo y sus interacciones influyeron significativamente en la productividad, mientras que el factor variedad por sí solo no mostró diferencias significativas. Los mejores rendimientos se obtuvieron con la combinación de 0 kg/ha en el campo y 300 kg/ha en el surco. Se observó que las dosis altas simultáneas (en el campo y en el surco) daban lugar a rendimientos más bajos, lo que sugiere posibles pérdidas debidas a la fijación del fósforo. Los datos también mostraron un impacto del fósforo en la RTA y el contenido de fósforo en el zumo, con implicaciones tecnológicas para la fermentación y la clarificación. El uso de la estadística experimental resultó fundamental para comprender las interacciones entre los factores y orientar recomendaciones agronómicas más eficientes. La conclusión es que una gestión adecuada de la fertilización fosfatada puede optimizar el rendimiento agronómico e industrial del cultivo, promoviendo una mayor sostenibilidad y productividad.

Palabras clave: nutrición mineral, biomasa vegetal, estadística experimental, caña energética.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas mais relevantes para o setor sucroenergético brasileiro, sendo cultivada tanto para a produção de alimentos (açúcar) quanto para energia renovável (etanol e bioeletricidade). As variedades podem ser classificadas como Sacarina, com alto teor de sacarose, e Energia, com maior proporção de biomassa (Silva *et al.*, 2017).

A cana-energia tem ganhado destaque por seu elevado potencial de geração de biomassa, com uso do bagaço para cogeração de eletricidade, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável e com menor emissão de gases de efeito estufa (Souza *et al.*, 2022; Borges *et al.*, 2017).

Por outro lado, a cana-sacarina apresenta alto teor de sacarose (em torno de 12,5%) e é amplamente utilizada para a produção de açúcar e etanol, com elevada produtividade em áreas de cultivo intensivo (Santos *et al.*, 2018). A seleção e melhoramento dessas variedades têm como foco o rendimento industrial, a resistência a pragas e doenças e a adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. Essa diferenciação genética é estratégica para a sustentabilidade do setor, garantindo maior estabilidade da produção em diferentes biomas brasileiros.

Entre os fatores que impactam diretamente o crescimento e o rendimento da cana, destaca-se o fósforo (P), um nutriente essencial para diversos processos fisiológicos, como a fotossíntese, a respiração, a síntese de ácidos nucleicos e o transporte de energia por meio das moléculas de ATP (Adenosina Trifosfato) (Mendonça *et al.*, 2020). O fósforo está diretamente envolvido em processos bioquímicos vitais para o crescimento vegetal, sendo determinante no estabelecimento e desenvolvimento inicial da cultura. Além disso, o fósforo estimula o crescimento radicular e melhora a resistência das plantas a estresses e patógenos, refletindo-se na maior eficiência agrônômica da cultura (Souza *et al.*, 2022).

A eficiência na absorção de fósforo, no entanto, é altamente influenciada pelas características físico-químicas do solo. A disponibilidade de fósforo no solo é influenciada por fatores como pH, textura e tipo de solo. Em solos ácidos, o P se complexa com ferro e alumínio, tornando-se indisponível; já em solos alcalinos, tende a se precipitar com cálcio (Oliveira *et al.*, 2020). Técnicas como a aplicação localizada no sulco e o uso de fontes solúveis e reativas têm sido adotadas para mitigar essas limitações, aumentando a eficiência de uso do nutriente. O uso racional de fertilizantes fosfatados, aliado ao conhecimento das interações solo-planta, é essencial para garantir altas produtividades com sustentabilidade ambiental e econômica (Oliveira *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a aplicação de métodos estatísticos rigorosos torna-se indispensável. A estatística experimental é uma ferramenta essencial para o delineamento, análise e interpretação de

experimentos agrícolas, possibilitando o entendimento de efeitos isolados e interações entre variáveis (Cruz *et al.*, 2019). Por meio de modelos como a análise de variância (ANOVA), é possível identificar a existência de efeitos significativos entre tratamentos, enquanto testes de comparação de médias, como o teste de Tukey, permitem avaliar quais níveis de fator se diferenciam entre si.

A estatística, portanto, vai além da simples validação matemática, sendo um instrumento decisivo na geração de conhecimento aplicável. A interpretação correta dos resultados estatísticos contribui para a formulação de estratégias agronômicas mais eficazes, permitindo ao técnico ou pesquisador tomar decisões baseadas em evidência. Além disso, a análise estatística também oferece suporte à recomendação de manejos específicos por variedade, ajustando as práticas às exigências de cada genótipo.

Neste contexto, este trabalho objetivou avaliar, por meio de análises estatísticas, os efeitos de diferentes fontes, doses e métodos de aplicação de fósforo sobre a produtividade e a qualidade de variedades Sacarina e Energia de cana-de-açúcar cultivadas sob adubação fosfatada.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cana-de-açúcar

A resposta da cana à adubação fosfatada pode variar conforme a variedade e o manejo adotado. Variedades como RB867515 (Sacarina) e VG11-4094 (Energia) são amplamente utilizadas em função de seu potencial produtivo e adequação a diferentes ambientes (Santos *et al.*, 2018). Enquanto a variedade Sacarina é voltada à produção de açúcar e etanol, a variedade Energia apresenta maior teor de fibras e biomassa, sendo direcionada à geração de bioeletricidade e biocombustíveis sólidos (Silva *et al.*, 2017).

Cana Energia

Para fins de biomassa, a cana energia apresenta alto potencial energético, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa (Trombeta, 2015).

Fonte de Fosforo (P)

A eficiência do fósforo está relacionada à sua fonte, à dose aplicada e ao método de aplicação. Fontes solúveis como superfosfato têm maior resposta imediata, enquanto fosfatos naturais apresentam efeito residual em função da acidez do solo (Oliveira *et al.*, 2020). Técnicas

como a aplicação localizada no sulco e o uso de fontes reativas ou termofosfatos têm sido recomendadas para aumentar a eficiência de uso do fósforo, reduzindo perdas por fixação e promovendo maior absorção pelas raízes (Souza *et al.*, 2022).

Além disso, o fósforo influencia positivamente a formação e desenvolvimento do sistema radicular, a síntese de ATP e a resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos. Quando aplicado corretamente, o fósforo contribui para o aumento da produtividade, qualidade tecnológica e longevidade do canavial, sendo essencial no contexto de agricultura sustentável (Mendonça *et al.*, 2020).

Adubação Fosfatada

A adubação fosfatada é fundamental para suprir as necessidades da cana, utilizando fontes como fosfatos naturais reativos (exemplo, o Gafsa) e superfosfato triplo solúvel (Freire *et al.*, 2024). Quanto às fontes de fosfato que podem ser aplicadas à cultura da cana, elas podem ser divididas em dois grupos de fosfatos, sendo aplicados formas solúveis, como superfosfatos, no fundo do sulco no plantio, e os fosfatos naturais reativos na forma farelada teor mínimo de 27% de P_2O_5 total e 30% de solubilidade em ácido cítrico 2%, 1:100, utilizados em fosfatagem em área total (Rein *et al.*, 2015 e 2021).

Os fosfatos naturais reativos, embora sejam insolúveis em água, tornam-se disponíveis às plantas após reação com o solo, o que propicia sua dissolução (Rein; Sousa, 2013). Ao serem avaliados para a cana-de-açúcar em solos com baixos teores de fósforo — ou seja, solos considerados responsivos à adubação fosfatada —, os fosfatos naturais reativos mostraram eficiência em aplicações a lanço com incorporação ou no sulco de plantio, com base no teor de P_2O_5 total (Caione *et al.*, 2013). Tal fato é explicado pela liberação de fósforo de curto e longo prazo, o que é muito importante para culturas como a cana-de-açúcar.

Estatística na Agricultura

A estatística experimental é amplamente utilizada em estudos agrônômicos para avaliar a influência de variáveis sobre as culturas. O uso de delineamentos apropriados, como blocos casualizados, parcelas subdivididas e fatorial completo, garante maior precisão e controle dos erros experimentais (Barros *et al.*, 2021).

Ferramentas estatísticas como a análise de variância (ANOVA) permitem a verificação de efeitos significativos entre tratamentos, considerando o desvio experimental e a variabilidade dos

dados. Em estudos com múltiplos fatores, como doses e formas de aplicação de fertilizantes, o uso da ANOVA fatorial possibilita investigar não apenas os efeitos principais, mas também as interações entre os fatores. Segundo Lima *et al.* (2018), essas interações podem revelar comportamentos agrônômicos específicos que seriam ocultos se os fatores fossem avaliados separadamente.

Além disso, o teste de Tukey é amplamente utilizado após a ANOVA para comparação de médias, assegurando que as diferenças observadas entre os tratamentos sejam estatisticamente válidas. Como reforçado por FM2S (2025) e Estatística Fácil (2025), esse tipo de abordagem proporciona maior segurança na tomada de decisões.

A integração de dados experimentais com análises estatísticas é fundamental para embasar recomendações agrônômicas personalizadas, aumentando a eficiência da fertilização e reduzindo desperdícios (Souza *et al.*, 2022).

METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido no ano de 2018 em área agrícola da Usina Granelli, localizada na cidade Ipeúna, estado de São Paulo. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo de textura arenosa, apresentando 227 g kg⁻¹ de argila, 30 g kg⁻¹ de silte e 743 g kg⁻¹ de areia, conforme classificação de Embrapa (2018). O pH do solo foi corrigido conforme as recomendações técnicas, visando adequar a fertilidade (Raij *et al.*, 2001).

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados em fatorial 3x4x2, com parcelas subdivididas e quatro repetições, conforme metodologia descrita por Ferreira (2018). Os tratamentos principais consistiram em duas variedades de cana-de-açúcar: RB867515 (cana-sacarina) e VG11-4094 (cana-energia). Nas subparcelas, foram aplicadas três doses de fósforo à lanço (0, 150 e 300 kg P₂O₅ ha⁻¹) e quatro doses no sulco de plantio (0, 75, 150 e 300 kg P₂O₅ ha⁻¹), totalizando 24 combinações, com sorteio aleatório das subparcelas.

Durante o ciclo da cultura, foram avaliados o acúmulo de matéria seca e a produtividade total de matéria seca (TPMS), além de variáveis tecnológicas como produtividade agrícola (TCH), teor de sacarose (Pol), fibra, Brix, pureza, ATR (açúcar total recuperável) e concentração de fósforo no caldo. Os dados foram analisados com auxílio do software Microsoft Excel, utilizado para cálculos preliminares e construção de gráficos de interação.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SAS (*Statistical Analysis System*), conforme recomendações de Gomes (2009), sendo as variáveis submetidas à análise de

variância (ANOVA) para verificação de efeitos significativos entre tratamentos. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, metodologia amplamente utilizada em experimentos agrícolas para comparações múltiplas (Banzatto; Kronka, 2013).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Com base nas médias calculadas, foram realizadas análises estatísticas para avaliar os efeitos principais e as interações entre as variáveis: variedade de cana (Sacarina e Energia), doses de fósforo aplicadas a lanço e no sulco de plantio. Os resultados foram obtidos por meio de análise de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias (Tukey), com nível de significância de 5% (Barros *et al.*, 2021; FM2S, 2025).

Tabela 1: Valores médios por tratamento de parâmetros avaliados para as canas energia e sacarina

Doses no sulco	Gafsa a Lanço	Pol	Fibra	Brix	Pureza	ATR ⁽¹⁾	TCH	Fósforo
-----% cana-----					Caldo	Cana Kg/T	T cana. /ha	mg P L
CC-D1	M1	13.78	12.65	17.58	78.23	144.45	114,40	74.45
CC-D1	M2	12.99	11.87	16.45	79.9	135.82	127,05	119.7
CC-D1	M3	12.47	11.68	15.64	79.73	130.92	130,90	139.66
CC-D2	M1	14.39	13.59	18.06	79.66	148.93	108,96	89.66
CC-D2	M2	14.19	12.94	17.61	78,76	140.82	123,15	99.35
CC-D2	M3	12.01	12.01	16.03	80.41	125.9	116,60	88.71
CC-D3	M1	14.52	12.07	18.45	78.51	151.42	122,65	95.73
CC-D3	M2	13.59	12.44	17.21	77,76	146.92	118,26	99.35
CC-D3	M3	13.29	12.44	17.21	75.9	141.62	114,45	97.35
CC-D4	M1	14.23	12.99	17.61	80.8	146.73	104,92	148.65
CC-D4	M2	14.00	12.909	17.56	80.0	143.63	106,45	128.65
CC-D4	M3	13.34	13.08	17.38	76.73	141.29	109,09	99.85
Média (CC)		13.68	12.41	17.34	79.01	143.2	116,50	97.73
Variação		2.71	2.05	2.42	4.95	25.81	25,03	37.20
CE-D1	M1	10.94	20.68	15.33	71.36	120.32	97,52	104.72
CE-D1	M2	10.19	20.07	14.58	69.55	114.61	113,55	100.11
CE-D1	M3	11.02	19.95	15.31	71.99	120.86	118,54	88.72
CE-D2	M1	9.89	20	15.35	64.44	115.3	112,91	93.51
CE-D2	M2	11.23	18.29	15.41	72.75	122.78	115,46	91.86
CE-D2	M3	10.71	20.12	14.93	71.6	118.06	121,57	84.98
CE-D3	M1	11.15	20.1	15.2	73.36	123.95	114,18	99.12

CE-D3	M2	10.97	17.92	15.22	72.02	121	109,82	74.94
CE-D3	M3	11.66	20.84	15.86	73.53	125.67	112,05	84.05
CE-D4	M1	9.47	18.52	12.73	60.8	93.13	139,85	112.98
CE-D4	M2	10.07	20.69	14.6	68.71	113.92	116,76	142.74
CE-D4	M3	10.84	20.36	14.9	72.66	118.52	109,48	215.37
Média (CE)		10.67	19.79	14.95	70.23	117.34	115,15	107.75
Variação (CE)		2.19	2.59	2.60	12.73	32.54	24,06	140.43

Fonte: Autores.

CC= cana sacarina; CE= cana energia;

*D= dose; **M= dose a lanço. *D1=0kg P₂O₅.ha⁻¹; D2=75kg P₂O₅.ha⁻¹; D3=150kg P₂O₅.ha⁻¹; D4=300kg P₂O₅.ha⁻¹; **M1=0kg P₂O₅.ha⁻¹; M2=150kg P₂O₅.ha⁻¹; M3=300kg P₂O₅.ha⁻¹;

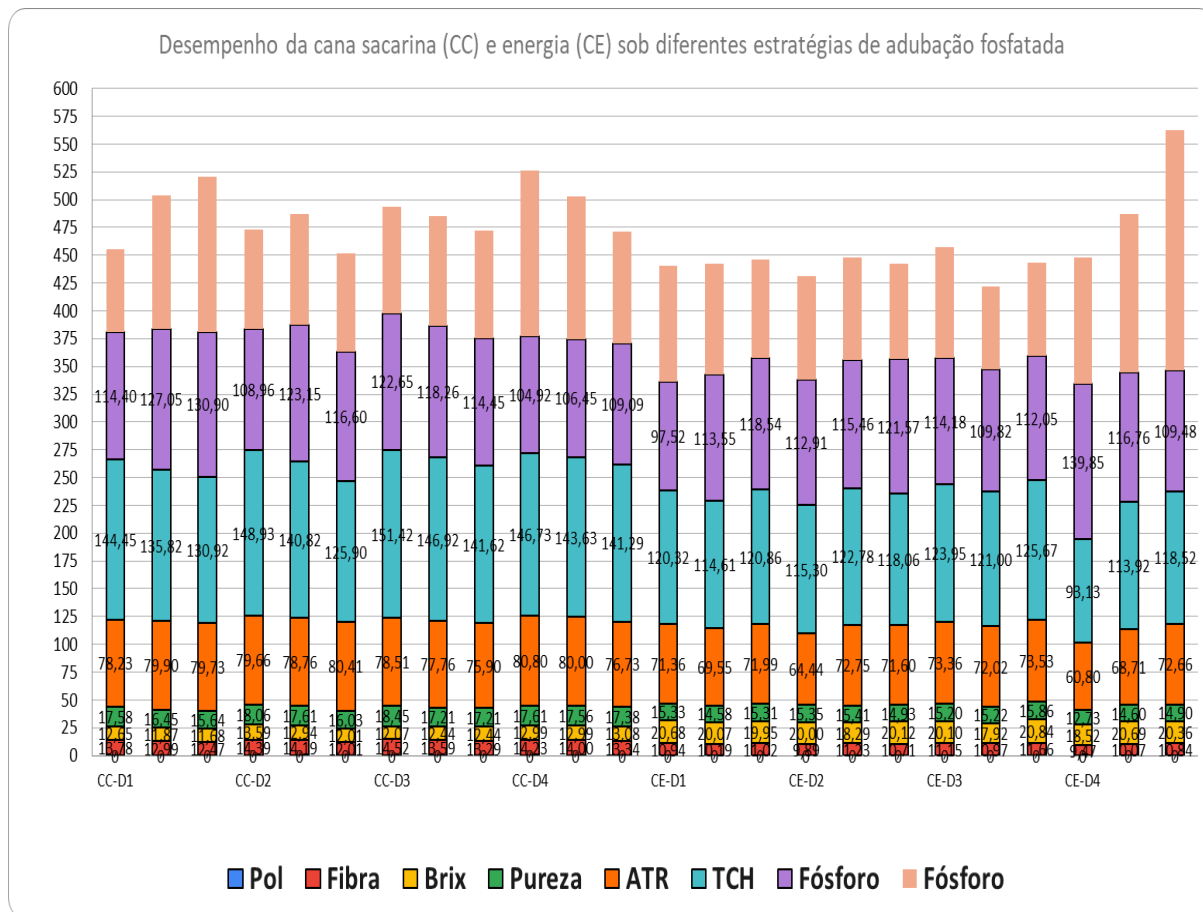
ATR na cana-de-açúcar = Açúcar Total Recuperável, um indicador de qualidade que mede a quantidade de açúcar que pode ser extraída do canavial após o processamento industrial.

A tabela 1, refere-se aos valores médios calculados por tratamento de parâmetros avaliados para as canas energia e sacarina. A partir das médias foi feito o gráfico para verificar o desempenho da cana sob diferentes estratégias de adubação fosfatadas.

Na Figura 1, podemos verificar as colunas empilhadas, neles representam os valores médios de TCH (toneladas de colmo por hectare), fósforo disponível no solo, brix do caldo, pureza, fibra, pol do caldo, toneladas de pol por hectare (t Pol/ha) e ATR (açúcares totais recuperáveis). Os dados foram agrupados conforme as variedades - CC-cana convencional ou de açúcar e CE- cana-energia - submetidos a diferentes doses de fósforo aplicadas a lanço e no sulco.

Observa-se que os tratamentos com cana convencional (CC) apresentaram, de modo geral, maiores valores de TCH e ATR em comparação à cana-energia (CE), indicando maior produtividade na variedade sacarina. Isso está de acordo com Santos *et al.* (2018), que apontam que a variedade RB867515 apresenta elevada capacidade de acúmulo de sacarose, favorecendo o rendimento agrícola e industrial.

Figura 1: Desempenho da cana-de-açúcar sob diferentes estratégias de adubação fosfatada na soqueira (TCH, Fosforo, Brix, Pureza, Fibra, Tpol/ha e ATR acumulado)



Fonte: Autores. *CC= cana sacarina; * CE= cana energia; *TCH= toneladas de colmo por hectare. A sequência de CC com M1 a M3 com D1, D2, D3, D4.

*D= dose; **M= dose a lanço. *D1=0kg P₂O₅.ha⁻¹; D2=75kg P₂O₅.ha⁻¹; D3=150kg P₂O₅.ha⁻¹; D4=300kg P₂O₅.ha⁻¹; **M1=0kg P₂O₅.ha⁻¹; M2=150kg P₂O₅.ha⁻¹; M3=300kg P₂O₅.ha⁻¹;

A aplicação de fósforo no sulco resultou em maiores médias de fósforo disponível no solo, sugerindo maior eficiência de absorção pelas raízes, como descrito por Oliveira *et al.* (2020), que relatam que aplicações localizadas de fósforo reduzem perdas por fixação e favorecem o aproveitamento do nutriente. Parâmetros tecnológicos como Brix, Pureza e Pol do caldo mantiveram-se relativamente constantes entre os tratamentos, com leve superioridade nos tratamentos com CC. Esse comportamento reforça a estabilidade da composição química do caldo em condições de adubação controlada, conforme observado por Rein (2012).

Quadro 1: Tabela de Análise de Variância.

FV	GL	SQ	QM	<u>Fc</u>	<u>Pr>Fc</u>
VARIÉDADE	1	7.309584	7.309584	0.023	0.8803
DOSE_LANCO	2	5242.251058	2621.125529	8.181	0.0006
DOSE_SULCO	3	4771.074603	1590.358201	4.964	0.0033
VARIÉDADE*DOSE_LANCO	2	1352.824525	676.412262	2.111	0.1280
VARIÉDADE*DOSE_SULCO	3	1043.601395	347.867132	1.086	0.3602
DOSE_LANCO*DOSE_SULC	6	12236.531225	2039.421871	6.365	0.0000
erro	78	24991.997733	320.410227		
Total corrigido	95	49645.590124			
CV (%) =	19.07				
Média geral:	93.8580208	Número de observações:	96		
Obs. Codificações usadas para as FV do quadro de ANOVA					
1: VARIÉDADE					
2: DOSE_LANCO					
3: DOSE_SULCO					
4: VARIÉDADE*DOSE_LANCO					
5: VARIÉDADE*DOSE_SULCO					
6: DOSE_LANCO*DOSE_SULCO					
7: Fim					

Fonte: ANOVA. *FV= fatores/variedades; *GL= graus de liberdade; *SQ= soma de quadrados; *QM= quadrado médio.

O quadro de ANOVA é uma tabela que resume os resultados da análise de variância. Ele mostra como a variação total dos dados é distribuída entre diferentes fontes de variação, como:

Graus de Liberdade (GL): indica o número de informações independentes disponíveis para estimar a variação.

Soma de Quadrados (SQ): representa a quantidade de variação associada a cada fonte de variação.

Quadrado Médio (QM): é a soma de quadrados dividida pelos graus de liberdade correspondentes, representando a variância média para cada fonte de variação.

Estatística do teste F (ANOVA): é o resultado da divisão do quadrado médio entre os grupos pelo quadrado médio dentro dos grupos. Essa estatística é usada para testar a hipótese nula de que as médias dos grupos são iguais.

Valor-p: é a probabilidade de observar resultados tão extremos quanto os observados, assumindo que a hipótese nula é verdadeira. Um valor-p pequeno (tipicamente menor que 0,05) indica evidências contra a hipótese nula, sugerindo que existem diferenças significativas entre as médias dos grupos.

Tabela 2: Efeitos das doses de fósforo aplicadas a lanço e no sulco, e suas interações com a variedade, sobre a produtividade da cultura

Fator	Produtividade Média	DMS (5%)
Variedade		
CC	123,40	
CE	121,56	
Dose a lanço (kg/ha)		
0	129,74	
150	127,82	13,90
300	108,50	
Dose no sulco (kg/ha)		
0	129,70	17,64
75	111,45	
150	116,26	
300	132,36	

Fonte: Autores. *CC= cana sacarina; *CE= cana energia; *DMS= Diferença Mínima Significativa. As letras diferentes significam que diferenciam a 5% de probabilidade (Teste F) na comparação no teste de Tukey.

A Tabela 2, apresenta os efeitos principais das doses de fósforo aplicadas a lanço e no sulco, bem como das variedades avaliadas, sobre a produtividade da cultura. Observa-se que não houve diferença significativa entre as variedades (CC=123,40; CE=121,56), mas as doses de fósforo aplicadas a lanço e no sulco influenciaram a produtividade. As maiores médias registradas foram nas doses 0 (129,74) e 150 (127,82) kg/ha no lanço, tanto a lanço quanto no sulco, indicando um possível efeito residual ou limitação na absorção em doses mais elevadas.

Tabela 3: Médias de produtividade conforme interação entre variedade e dose de fósforo aplicada a lanço. CC – Cana Convencional (sacarina) e CE - Cana Energia

Variedade	Dose a lanço (kg/ha)	Produtividade Média
CC	0	126,12 AB
CC	150	136,20 A
CC	300	106,83 B
DMS (5%)		19,82
CE	0	132,32 A
CE	150	120,60 AB
CE	300	111,05 B
DMS (5%)		19,82

Fonte: Autores. *CC= cana sacarina; *CE= cana energia; *DMS= Diferença Mínima Significativa. As letras diferentes significam que diferenciam a 5% de probabilidade (Teste F) na comparação no teste de Tukey.

Na Tabela 3, destaca-se a resposta diferenciada das variedades à adubação a lanço. A variedade CC teve melhor desempenho com 150 kg/ha de P_2O_5 , enquanto a CE foi mais produtiva na ausência de adubação a lanço. Esse comportamento pode estar relacionado à capacidade de aproveitamento do fósforo residual no solo pela CE, como observado por Caione *et al.* (2013) em experimentos com fosfatos naturais reativos (Matsuoka *et al.*, 2022).

Tabela 4: Médias de produtividade conforme interação entre variedade e dose de fósforo aplicada no sulco. CC – Cana Convencional (sacarina) e CE - Cana Energia

Variedade	Dose no sulco (kg/ha)	Produtividade Média
CC	0	130,05 ^a
CC	75	105,84 ^b
CC	150	124,25 ^{ab}
CC	300	132,72 ^a
DMS (5%)		24,95
CE	0	125,56
CE	75	117,16
CE	150	110,25
CE	300	130,70
DMS (5%)		24,95

Fonte: Autores. *CC= cana sacarina; *CE= cana energia; *DMS= Diferença Mínima Significativa a 5% de probabilidade. As letra diferentes significam que diferenciam a 5% de probabilidade (Teste F) na comparação no teste de Tukey.

Já na Tabela 4, ilustra a interação entre as variedades e as doses de fósforo aplicadas no sulco. Para a variedade CC, observa-se um efeito quadrático, com a dose de 300 kg/ha proporcionando produtividade semelhante à dose zero (0= 130,05). Já a variedade CE apresentou menor variação entre as doses, sugerindo menor sensibilidade às alterações na adubação fosfatada no sulco, como discutido por Freire *et al.* (2024). Esse comportamento pode indicar diferenças na eficiência de absorção de P entre as variedades de cana energia e sacarina (Matsuoka *et al.*, 2022).

Tabela 5: Médias de produtividade conforme interação entre doses de fósforo aplicadas a lanço e no sulco

Dose no sulco (kg/ha)	Dose a lanço (kg/ha)	Produtividade Média
300	0	163,70 ^a
0	150	160,07 ^a
150	0	126,67 ^{ab}
75	0	118,05 ^a
75	150	110,88 ^a
150	150	109,80 ^a
150	300	103,07 ^a
300	150	131,41 ^{ab}
0	300	122,25 ^{ab}
0	0	110,61 ^a
75	300	130,15 ^{ab}
300	300	98,95 ^a

Fonte: Autores. *DMS= Diferença Mínima Significativa (37,425). As letras diferentes significam que diferenciam a 5% de probabilidade (Teste F) na comparação no teste de Tukey.

Na Tabela 5, a combinação de 150 kg/ha a lanço e 0 kg/ha no sulco obteve os melhores resultados, que equivaleria a aplicar a 300 kg/ha no sulco no plantio. Essa eficiência da aplicação superficial pode estar associada à maior solubilidade inicial da fonte e à rápida absorção nas fases iniciais da cultura, conforme relatado por Souza *et al.* (2022).

A aplicação de fósforo influenciou significativamente o teor de fósforo no caldo da cana-de-açúcar, independentemente do método de aplicação, corroborando os achados de Tomaz (2010), que observou aumento de até 100% nos teores de P no caldo com o uso de adubação fosfatada. Essa absorção tem implicações tecnológicas relevantes, especialmente nos processos de clarificação e de fermentação do caldo (Delgado *et al.*, 2019).

No processo de clarificação, segundo Honig (1967) e Delgado *et al.* (2019), quanto maior for a quantidade de fosfato no caldo, melhor será a estabilidade de cor durante o armazenamento do açúcar, o que gera uma maior eficiência no processo de refino do açúcar. Neste processo da produção de açúcar bruto (VHP, demerara), o fosfato e quando se pratica a caleagem e sem sulfitação (clarificação), encontra condições de pH bem favoráveis para se precipitar e, assim, propiciar a atenção de um caldo clarificado de melhor qualidade. Tal aspecto inicia-se com uma clarificação adequada para produção de açúcar bruto, foram obtidos, na faixa de 100 a 140 mg de P/l, que seriam os limites esses bem satisfatórios para uma boa clarificação de caldo, o que tem sido evidenciada na literatura (Delgado *et al.* 2019).

Todavia, deve ser ressaltado que, o fósforo original no caldo de cana-de-açúcar tem importância no processo de clarificação para a produção de açúcar, bem como na fermentação alcoólica (Martins, 2004). A falta do fósforo na clarificação leva a necessidade de adição de ácido fosfórico no processo de clarificação para atingir 150 mg de P no caldo por litro. Na levedura o valor estaria acima de 70 mg de P /L de caldo para não prejudicar o crescimento de levedura e no rendimento da fermentação (Delgado *et al.*, 2019).

A análise de variância demonstrou que as doses de adubação fosfatada influenciaram significativamente o teor de fósforo no caldo da cana-de-açúcar, independentemente do método de aplicação (lanço ou sulco). Isso corrobora com estudos anteriores que indicam a importância do manejo adequado da adubação fosfatada para otimizar a absorção de nutrientes pela planta. As doses de 150 kg/ha em lanço e 300 kg/ha no sulco resultaram nos maiores teores de fósforo no caldo, o que sugere que a combinação dessas dosagens e métodos de aplicação pode ser mais eficiente para a cultura da cana.

CONCLUSÃO

A análise dos efeitos de diferentes doses e métodos de aplicação de fósforo em variedades de cana sacarina (RB867515) e cana energia (VG11-4094) demonstrou que o manejo da adubação fosfatada influencia significativamente a produtividade e a qualidade tecnológica da cultura. Observou-se que doses elevadas aplicadas simultaneamente a lanço e no sulco não proporcionaram incremento na produtividade, podendo resultar em perdas por fixação do fósforo no solo e uma dosagem total do P acima do recomendado na cultura.

A variedade sacarina apresentou maior responsividade à adubação fosfatada, especialmente com aplicações a lanço, enquanto a cana energia demonstrou maior estabilidade produtiva em ausência ou em doses menores de P. Tal comportamento evidencia a importância da seleção varietal no planejamento do manejo nutricional, especialmente em sistemas que visam à sustentabilidade e à eficiência agrônômica em solos restritivos em fertilidade.

Além disso, houveram efeitos positivos da adubação sobre atributos de qualidade de matéria prima, como ATR e teor de fósforo no caldo, que reforçam sua importância não apenas para o rendimento agrícola, mas também para a qualidade industrial da matéria-prima. A eficiência do fósforo está intimamente ligada ao tipo de fonte utilizada, sua solubilidade e a forma de aplicação no solo, sendo recomendável priorizar práticas que maximizem sua disponibilidade às raízes, porque o nutriente é absorvido por difusão do P no solo, como a aplicação localizada no sulco.

A utilização da estatística experimental foi fundamental para identificar interações entre fatores (fontes de P e variedade) e variações significativas entre tratamentos, o que possibilita a formulação de recomendações técnicas no manejo da adubação fosfatada na cana-de-açúcar, com base em evidências científicas. Nesse contexto, o presente estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a nutrição fosfatada em cana-de-açúcar, diferenciando as variedades sacarina e energia, reforçando a necessidade de estratégias fitotécnicas ajustadas, e o uso de estatística experimental nos setores agrícolas, permitindo obter uma decisão eficaz.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos àqueles que nos inspiraram e apoiaram.

À Usina Granelli na pessoa, Sr. José Granelli pelo suporte fitotécnico no campo.

À cooperação técnica entre a Embrapa Agricultura Digital e a Cooperativa de Plantadores de Cana (Coplacana) no projeto de pesquisa "Desenvolvimento de soluções tecnológicas com escopo na recuperação da produtividade da cana-de-açúcar".

REFERÊNCIAS

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. *Experimentação Agrícola*. 4. ed. Jaboticabal: Funep, 2013.

BARROS, J. O.; SANTOS, M. E. R.; SOUZA, R. T. Estatística aplicada à agronomia: conceitos e aplicações. *Revista Agrociência*, v. 57, p. 215–228, 2021.

BORGES, W. L. B. *et al.* Resposta da cana-de-açúcar à adubação fosfatada em diferentes formas de aplicação. *Enciclopédia Biosfera*, v. 13, n. 24, 2017.

CAIONE, G.; FERNANDES, F. M.; LANGE, A. Efeito residual de fontes de fósforo nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de biomassa da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 8, n. 2, p. 189–196, 2013.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa: UFV, 2019.

DELGADO, A. A.; CESAR, M. A. A.; SILVA, F. C. da. *Elementos de tecnologia e engenharia da produção do açúcar, etanol e energia*. Piracicaba: FEALQ, 2019. 984 p. Colaborador: Luis Guilherme de Abreu e Lima Antoneli.

EMBRAPA. *Desenvolvimento de soluções tecnológicas com escopo na recuperação da produtividade da cana-de-açúcar*, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/217564/desenvolvimento-de-solucoes-tecnologicas-com-escopo-na-recuperacao-da-produtividade-da-cana-de-acucar>. Acesso em: 3 jul. 2025.

EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 15, n. 2, jul./dez. 2025. p. 55-72.

Efeitos de diferentes fontes, doses e métodos de aplicação de fósforo sobre a produtividade e a qualidade de variedades de cana-de-açúcar sacarina e energia

SILVA, Fábio Cesar da; MARCHIORI, Luís Fernando Sanglade; CHANG, Helena; MERLOTTO, Gabriel R.; SILVA, Jamile Vitória da

ESTATÍSTICA FÁCIL. *O que é o Teste de Tukey, como funciona e aplicações*. Disponível em:

<https://estatisticafacil.org/glossario/o-que-e-teste-de-tukey-como-funciona-e-aplicacoes/>.

Acesso em: 3 jul. 2025.

FERREIRA, D. F. *Estatística experimental*. 3. ed. Lavras: UFLA, 2018.

FM2S. *ANOVA: o que é, como funciona e como interpretar os resultados?* Disponível em:

<https://www.fm2s.com.br/blog/anova>. Acesso em: 3 jul. 2025.

FREIRE, J.F.; SILVA, F. C. da; REZENDE, J. S.; ANDRADE, C.; REIN, A. T. Fertilidade do solo e adubação em cana-de-açúcar. In: SILVA, F.C. da; FREIRE, F. J. (org.). *Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes*. 1ed.Brasília, v. 1, p. 253-287. DF.: Embrapa; Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2024.

GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

HONIG, P. No azucares inorganicos. In: *Princípios de tecnologia azucareira*. México. Continental. 1969. 3v. p. 291-360.

LIMA, J. R. S. *et al.* Uso da análise de variância no estudo de interações agrícolas. *Cadernos de Agroecologia*, v. 13, n. 1, 2018.

MARTINS, N.G.S. *Os fosfatos na cana-de-açúcar*. Tese (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) Universidade de São Paulo (USP). Piracicaba – SP, 2004.

MATSUOKA, S.; SILVA, F. C. da; MARCHIORI, L. F. S.; FARIA, D. L. de. Adaptabilidade de cana-energia à baixa disponibilidade de fósforo no solo. *STAB (PIRACICABA)*, v. 40, p. 21-26, 2022.

MENDONÇA, S. M. *et al.* Fósforo na agricultura tropical: disponibilidade e recomendações. *Revista Terra & Cultura*, v. 36, n. 3, 2020.

OLIVEIRA, C. C. *et al.* Fontes e métodos de aplicação de fósforo em solos tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, 2020.

RAIJ, B. van *et al.* *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. (Boletim Técnico, 100).

REIN *et al.* *Manejo da Adubação Fosfatada para Cana-de-Açúcar no Cerrado*, 2015. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1026343/1/CT29.pdf>. Acesso em: 06 de mar. 2025.

REIN, P. *Cane Sugar Engineering*. 2. ed. Berlin: Bartens, 2012.

REIN, T. A.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; SOUSA, D. M. G. de; CARVALHO, W. P. de; LEMES, G. de C. Corrective and maintenance phosphorus fertilization on sugarcane yield in Oxisols. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 56, 2160, 2021.

SANTOS, F. C. *et al.* Avaliação de variedades de cana-de-açúcar em diferentes ambientes de produção. *Revista Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 14, n. 4, 2018.

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 15, n. 2, jul./dez. 2025. p. 55-72.

Efeitos de diferentes fontes, doses e métodos de aplicação de fósforo sobre a produtividade e a qualidade de variedades de cana-de-açúcar sacarina e energia

SILVA, Fábio Cesar da; MARCHIORI, Luís Fernando Sanglade; CHANG, Helena; MERLOTTO, Gabriel R.; SILVA, Jamile Vitória da

SILVA, A. R. *et al.* Cana-de-açúcar para energia: variedades e manejo. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 6, n. 2, 2017.

SOUZA, L. A.; OLIVEIRA, T. R.; MORAES, D. R. Eficiência do uso de fósforo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 9, n. 1, p. 93–100, 2022.

TOMAZ, H. V. de Q. *Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar*. 2010. 93 f.

Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-24022010-093150/publico/Halan_Tomaz.pdf. Acesso em: 18 maio 2025.

TROMBETA, N. C. *Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil - uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos*. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, p. 149, Piracicaba, 2015.

1 SILVA, Fábio Cesar da. Possui graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade de São Paulo (1987), graduação em Engenharia Florestal pela Universidade de São Paulo (1987), mestrado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo (1991) e doutorado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo (1995). Atualmente é professor pleno 1 (equivalente: adjunto) da Faculdade de Tecnologia de Piracicaba – FATEC Dep. “Roque Trevisan” e pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas-SP.

2 MARCHIORI, Luís Fernando Sanglade. Possui graduação em Engenharia Agrônômica pela Faculdade de Agronomia e Zootecnia Manoel Carlos Gonçalves (1986), Mestrado em Agronomia, área de concentração Fitotecnia pela Universidade de São Paulo (1998) e Doutorado em Agronomia, área de concentração Fitotecnia pela Universidade de São Paulo (2004). Atualmente é Professor na Faculdade de Tecnologia de Piracicaba e Diretor Técnico da Estação Experimental Luiz de Queiroz da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo. Tem experiência nas áreas de Engenharia com ênfase em projetos e estudos hidrológicos e uso racional da água e Agronomia, com ênfase em Manejo e Tratos Culturais, atuando principalmente nos seguintes temas: Cana-de-açúcar; Desempenho em épocas de plantio e colheita; Sistemas de plantio cana inteira ou picada; Soja; Desempenho em épocas de semeadura Normal e Safrinha, populações e cultivares; Análise de crescimento da soja em diversas épocas de semeadura, cultivares e populações. Sistemas Agroflorestais com ênfase na produção de cacau semi sombreado.

3 CHANG, Helena. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” do Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” – CEETEPS.

4 MERLOTTO, Gabriel R. Engenheiro Agrônomo e Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical na área de Sistemas de Manejo e Qualidade Ambiental, no Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, com dissertação desenvolvida na Embrapa Meio Ambiente, com ênfase em Solos, Calagem e Carbono no solo. Atualmente, é doutorando em Engenharia Agrícola (FEAGRI) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), na área de Solos, com ênfase em calcário, biochar e pegada de carbono.

5 SILVA, Jamile Vitória da. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” do Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” – CEETEPS. Participou em pesquisa, como Bolsista de projeto de IC do CNPq e de iniciação Tecnologia Industrial – ITI- A com foco em aprimoramento das recomendações técnicas de correção da acidez do solo e suas implicações fitotécnicas no canavial (Projeto Embrapa/Embracal). Possui experiência em casa de vegetação e coleta de dados em campo e tem experiência na área de Ciências Ambientais e de Bioenergia, com ênfase em Ciências Ambientais.