

## FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DIFERENTES MANEJOS HÍDRICO, NUTRICIONAL E SUBSOLAGEM<sup>1</sup>

WANDERSON JOSÉ DE OLIVEIRA<sup>2</sup>; MARIO MONTEIRO ROLIM<sup>3</sup>; GERÔNIMO FERREIRA DA SILVA<sup>4</sup>; MANASSÉS MESQUITA DA SILVA<sup>5</sup>; CERES DUARTE GUEDES CABRAL DE ALMEIDA<sup>6</sup> E EVANILSON PAULINO DA SILVA<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Parte da tese de doutorado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus Recife, Recife PE, Brasil.

<sup>2</sup>Secretaria de Educação de Pernambuco, Governo do Estado de Pernambuco, Av. Afonso Olindense, n° 1513, CEP - 50810-000, Recife PE, Brasil, [wanderson.jdoliveira@professor.educacao.pe.gov.br](mailto:wanderson.jdoliveira@professor.educacao.pe.gov.br)

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP – 52171-900, Recife PE, Brasil, [mario.rolim@ufrpe.br](mailto:mario.rolim@ufrpe.br)  
evanilson.psilva@gmail.com

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP – 52171-900, Recife PE, Brasil, [geronimo.silva@ufrpe.br](mailto:geronimo.silva@ufrpe.br)

<sup>5</sup> Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP – 52171-900, Recife PE, Brasil, [manasses.mesquita@ufrpe.br](mailto:manasses.mesquita@ufrpe.br)

<sup>6</sup> Colégio Dom Agostinho Ikas, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rodovia PE 05 Km 25, n° 4000, Tiúma, CEP - 54.737-200, Lourenço da Mata PE, Brasil, [ceres.cabral@ufrpe.br](mailto:ceres.cabral@ufrpe.br)

<sup>7</sup> Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Ângela Cristina Canto Pessoa de Luna, s/n, Bairro Novo, CEP - 55812-010, Carpina PE, Brasil, [evanilson.psilva@gmail.com](mailto:evanilson.psilva@gmail.com)

### 1 RESUMO

Com o objetivo de identificar a função de produção que estima o máximo rendimento de açúcar e álcool na cana-de-açúcar cultivada com diferentes doses de nitrogênio, lâminas de irrigação em solo com e sem subsolagem, foi realizado um experimento em campo com cana soca. Os tratamentos consistiram em quatro lâminas de irrigação (0, 50, 100 e 150% da ETC) e 5 doses de N (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha<sup>-1</sup>). Foi utilizado um delineamento de 5x4x2 com 3 repetições em blocos inteiramente casualizados. A produtividade foi obtida por meio da pesagem dos colmos. A partir da função de produção foram determinadas a região de produção máxima, a taxa marginal de substituição e a região de produção racional. Através da produtividade foram calculados os rendimentos de açúcar e álcool. As lâminas, doses de N e produtividades máximas encontradas foram, de 2033 mm, 131 Mg ha<sup>-1</sup> e 125 Mg ha<sup>-1</sup> no solo sem subsolagem e de 1729 mm, 137 Mg ha<sup>-1</sup> e 127 Mg ha<sup>-1</sup> no solo com subsolagem. Para o maior rendimento de açúcar e álcool a aplicação de insumos deve permanecer nas doses de N entre 80 a 160 kg ha<sup>-1</sup> e lâminas entre 1456 e 1731 mm.

**Palavras-chave:** curva de isoproducto, *Saccharum officinarum*, taxa marginal, álcool.

OLIVEIRA, W. J.; ROLIM M. M.; SILVA G. F.; SILVA, M. M.; ALMEIDA, C. D. G.C.; SILVA, E. P.

**FUNCTION OF PRODUCTION AND YIELD IN SUGAR CANE CULTIVATED UNDER DIFFERENT MANAGEMENT NUTRITIONAL AND WATER AND SUBSOLATION**

**2 ABSTRACT**

With the objective of identifying the production function that estimates the maximum yield of sugar and alcohol in sugarcane cultivated with different doses of nitrogen, irrigation depths in soil with and without subsoiling, an experiment was carried out in the field with ratoon cane. Treatments consisted of four irrigation depths (0, 50, 100 and 150% of ETC) and 5 N doses (0, 40, 80, 120 and 160 kg ha<sup>-1</sup>). A 5x4x2 design with 3 replications in completely randomized blocks was used. Productivity was obtained by weighing the stalks. From the production function, the region of maximum production, the marginal rate of substitution and the region of rational production were determined. Through productivity, the yields of sugar and alcohol were calculated. The depths, N doses and maximum productivity found were 2033 mm, 131 Mg ha<sup>-1</sup> and 125 Mg ha<sup>-1</sup> in the soil without subsoiling and 1729 mm, 137 Mg ha<sup>-1</sup> and 127 Mg ha<sup>-1</sup> in the soil with subsoiling. For the highest yield of sugar and alcohol, the application of inputs should remain at doses of N between 80 and 160 kg ha<sup>-1</sup> and depths between 1456 and 1731 mm.

**Keywords:** yield function, isoproduct curve, *Saccharum officinarum*, marginal rate, alcohol.

**3 INTRODUÇÃO**

A cana-de-açúcar é uma cultura que apresenta grande importância econômica no Brasil devido à grande produção de açúcar e etanol. Em 2020 a produção de cana-de-açúcar no mundo foi de aproximadamente 1,9 bilhão de toneladas com mais de 50% da produção concentradas nas américas, sendo o Brasil o maior produtor mundial (FAOSTAT, 2022).

No Brasil, a cana-de-açúcar é produzida principalmente em condições de sequeiro. Desta forma, o estresse hídrico é o principal fator que prejudica a produção da cultura, principalmente em fase inicial de brotação e durante fase de crescimento vegetativo intenso (INMAN-BAMBER, 2004; BASNAYAKE *et al.*, 2015).

Além do déficit hídrico diversos outros fatores se destacam como limitantes da produção, como a deficiência de

nitrogênio (N). Cunha *et al.* (2016) e Nascimento *et al.* (2018) ao estudarem o rendimento da cana-de-açúcar submetida a adubação nitrogenada constataram que a aplicação de nitrogênio promoveu maior desenvolvimento da planta e maior rendimento de álcool. Outro fator limitante da produção de cana-de-açúcar no Brasil é a compactação do solo, pois a mesma interfere diretamente na disponibilidade de água e absorção de nutrientes pela cultura. Além disso, provoca menor desenvolvimento das raízes, o que se reflete na diretamente na menor absorção de água e de nutrientes pelas plantas e, conseqüentemente, promove o decréscimo do rendimento da cana soca (ALAMEDA; ANTEN, 2012; CHERUBIN *et al.*, 2016).

A produção da cana-de-açúcar visa altas produtividades e rendimentos de açúcar e álcool, o que depende da quantidade de água aplicada, do manejo de irrigação

combinado com a quantidade certa de adubação, da variedade, da idade do corte, do tipo de solo e do clima (DANTAS NETO *et al.*, 2006). De qualquer forma o fornecimento de matéria prima de qualidade tecnológica a fim de propiciar extração econômica é uma das maiores necessidades da indústria sucroalcooleira (LEITE; CRUSCIOL; SILVA, 2011).

Para estimar a produtividade em função da variação de fatores ambientais pode-se utilizar uma função que descreva o comportamento dessas variáveis. Segundo Hexem e Heady (1978) e Heady e Dillon (1961), para obtenção da função de produção, dez modelos estatísticos mostraram-se bastante satisfatórios a partir de pesquisas de campo para representar uma função de produção de uma cultura.

Desta forma, objetivou-se com este trabalho identificar por meio da função de produção as doses de N e as lâminas de irrigação que permitem a maior produtividade e os maiores rendimentos de açúcar e álcool na cana-de-açúcar em plantas

de 4° corte em solo sem e com subsolagem, para utilização dos recursos da forma mais eficiente possível.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Instalação do experimento

O experimento foi realizado em campo, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina - EECAC/UFRPE, com coordenadas 7° 51' 13'' S, 35° 14' 10'' W, a 180 m de altitude, em cana soca na 4ª folha de cultivo dando continuidade ao trabalho iniciado por Costa *et al.* (2016).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, conforme Embrapa (2013). Foi realizada a caracterização química (Tabela 1) e física (Tabela 2) do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm de acordo com Teixeira *et al.* (2017). O histórico de adubação da área encontra-se na Tabela 3.

**Tabela 1.** Caracterização química do solo da área experimental.

Análises químicas 4° corte										
Camada	pH	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	H+Al	CTC	V	M	P
Cm	H <sub>2</sub> O	-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----					-----%-----		mg dm <sup>-3</sup>	
0-20	5,1	0,08	1,5	0,3	0,3	3,9	5,78	32,52	13,76	7
20-40	5,0	0,06	0,9	0,3	0,6	4,0	5,26	23,95	32,26	7

pH – Potencial hidrogeniônico em água; K<sup>+</sup> - Potássio; Ca<sup>2+</sup> - Cálcio; Mg<sup>3+</sup> – Magnésio; Al<sup>3+</sup> – Alumínio; H+Al – Hidrogênio + Alumínio; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m- Saturação por alumínio; P – Fósforo.

**Tabela 2.** Caracterização física do solo da área experimental.

Análises físicas 4° corte								
Camada	Ds <sup>1</sup>	Ds <sup>2</sup>	Areia	Silte	Argila	Θ <sub>CC</sub>	Θ <sub>PMP</sub>	Classe textural
(cm)	Mg m <sup>-3</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	-----g kg <sup>-1</sup> -----		--m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> --			
0-20	1,71	1,54	848,7	13,9	137,4	0,15	0,10	Franco arenoso
20-40	1,86	1,55	826,2	16,4	157,4	0,18	0,12	Franco arenoso

1 – Densidade do solo sem subsolagem; 2- Densidade do solo com subsolagem; Θ<sub>CC</sub> – Umidade na capacidade de campo; Θ<sub>PMP</sub> – Umidade no ponto de murcha permanente.

**Tabela 3.** Manejo da adubação durante o cultivo da área.

Folha	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>a</sup>	K <sub>2</sub> O <sup>b</sup>	N0	N1	N2	N3	N4	Fonte
kg ha <sup>-1</sup>								
1°	30	60	0	20	40	80	120	Ureia
2°	0	80	80	80	80	80	80	Ureia
3°	0	80	0	40	80	120	160	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
4°*	0	80	0	40	80	120	160	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Óxido de fósforo; K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio; KCl -Cloreto de potássio; N – Nitrogênio; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Sulfato de amônio; a – Super fosfato simples como fonte; b- Cloreto de potássio como fonte; \*A aplicação de N foi parcelada em duas vezes para doses ≥80 kg ha<sup>-1</sup>, a primeira por ocasião do corte da 3° folha e a outra 30 dias depois.

#### 4.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram na aplicação de quatro lâminas de irrigação (L) e cinco doses de nitrogênio (N) em solo com e sem subsolagem com delineamento em blocos, resultando em um experimento 5×4×2 com 3 repetições. A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a RB92579.

As doses de nitrogênio foram N1 = 0; N2= 40; N3 = 80, dose padrão segundo Cavalcanti (2008); N4 = 120 e N5 =160 kg ha<sup>-1</sup>. As lâminas totais de água aplicadas via irrigação foram determinadas de acordo com a evapotranspiração da cultura (ETC), sendo (L1, L2, L3 e L4) 0, 50, 100 e 150% da ETC respectivamente conforme a Tabela 4. A ETC de 0% corresponde a um plantio em condições de sequeiro.

**Tabela 4.** Lâminas de irrigação e totais aplicadas no experimento.

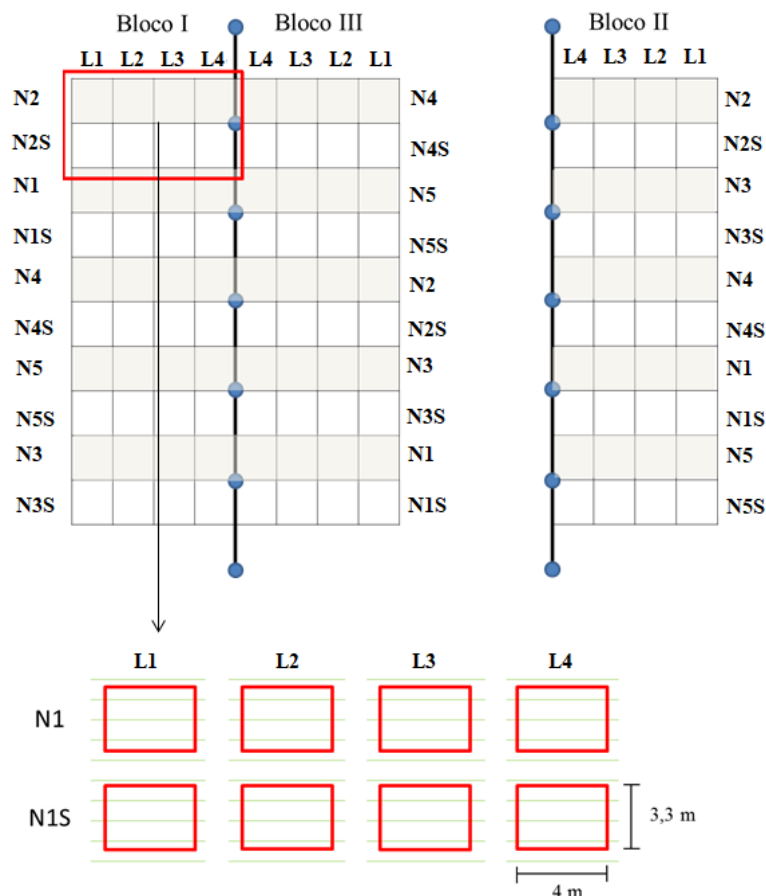
Lâmina	ETC	Precipitação	Lâmina aplicada	Lâmina Total
	%	mm	mm	mm
L1	0	905	0	905
L2	50	905	275	1180
L3	100	905	551	1456
L4	150	905	826	1731

As parcelas experimentais foram constituídas por cinco fileiras de plantas de cana-de-açúcar, espaçadas de 1,10 m entre si, com 6,0 m de comprimento, totalizando uma área de 33,0 m<sup>2</sup>. A área útil correspondeu às três fileiras centrais

descontando-se um metro de cada lado no sentido do comprimento, ficando com 4,0 m de comprimento, resultando em uma área útil de 13,2 m<sup>2</sup>.

De acordo com croqui da área experimental (Figura 1).

**Figura 1.** Croqui da área experimental com detalhamento da parcela experimental e os tratamentos. N1, N2, N3, N4 e N5 (0, 40, 80, 120, 160 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente). L1, L2, L3 e L4 (0, 50, 100 e 150% da ETC). O S em frente ao nome do fator indica que o solo foi com subsolagem e a ausência de S indica o solo sem subsolagem.



Foi utilizado um sistema de irrigação por aspersão em linha, “line source sprinkler system”. O sistema de irrigação por aspersão em linha foi descrito por Hanks *et al.* (1976), consiste em uma única linha de aspersores em campo sobrepostos. A disposição dos aspersores muito próximos em uma única linha permite a sobreposição de jatos de água, proporcionando maior precipitação ao longo da linha lateral e um gradiente decrescente perpendicularmente ao tubo. Este sistema, desenvolvido para fins experimentais, permite a aplicação de diferentes lâminas de água.

O sistema foi constituído de uma linha central com sete aspersores, espaçados a cada 15 m, sobre uma tubulação localizada no centro da área experimental. Os

aspersores usados foram do tipo minicanhão KS 1500 mm, pressão de serviço de 25 mca, vazão nominal de 13,61 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> e 60 m de diâmetro molhado.

No início do 3º ciclo de cultivo foi feita uma subsolagem em metade de cada parcela experimental a uma profundidade média de 50 cm, criando assim a condição subsolada e não subsolada que persistiu durante o 4º ciclo de cultivo.

### 4.3 Manejo da irrigação

A evapotranspiração diária da cultura (ETC - mm) foi calculada utilizando dados coletados em tanque classe A existente próximo à área de cultivo pela seguinte equação:

$$ETC = ECA \times K_p \times K_c \quad (1)$$

Onde:

ECA é a evaporação do tanque Classe A, mm;

$K_p$  é o coeficiente do tanque Classe A;

$K_c$  é o coeficiente de cultura.

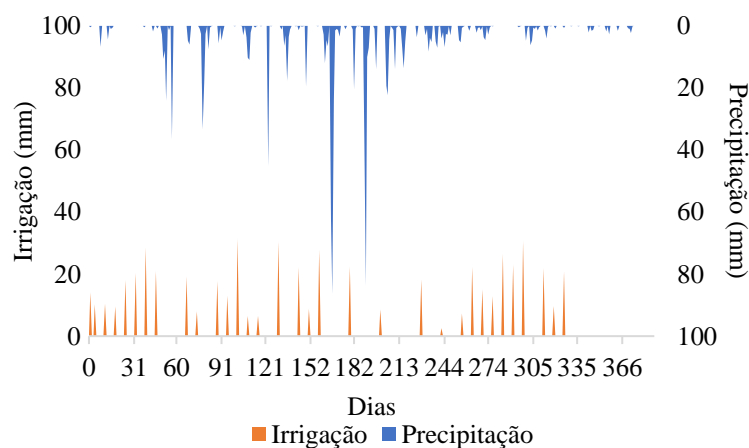
O valor de  $K_p$  foi obtido a partir dos dados de uma estação meteorológica e do tanque classe A utilizando os valores recomendados por Doorenbos e Kassam (1994) (Tabela 5).

**Tabela 5.** Valores de  $K_c$  para cana-soca.

Idade da Cana (Meses)	Período de desenvolvimento	$K_c$
0-1	Do plantio a 25% de cobertura	0,55
1-2	De 25 a 50% de cobertura	0,80
2-2,5	De 50 a 75% de cobertura	0,90
2,5-4	De 75% a cobertura completa	1,00
4-10	Cobertura total do solo	1,05
10-11	Início da Maturação	0,80
11-12	Maturação	0,60

A Figura 2 apresenta os dados de precipitação e lâmina de irrigação durante o período.

**Figura 2.** Precipitação e lâmina de irrigação aplicada durante o experimento.



#### 4.4 Rendimento de açúcar e álcool

Foram estimados os rendimentos de açúcar standard e álcool anidro utilizando-se os rendimentos estequiométricos dos processos que resultam nestes dois produtos em função do ART (açúcar redutores totais). Seguindo as relações a seguir segundo Fernandes (2011).

1,0000 açúcar Standard = 1,0526 kgs de ART

1,0000 álcool Anidro = 1,7160 kgs de ART

1,0000 álcool Hidratado = 1,64736 kgs de ART

#### 4.5 Função de produção

Os fatores de produção água (L) e nitrogênio (N) constituíram as variáveis independentes e a produtividade da cultura (Y) a variável dependente. Para obtenção da função de produção, foram testados dez modelos estatísticos que, de acordo com Hexem e Heady (1978) e Heady e Dillon (1961), mostraram-se bastante satisfatórios a partir de pesquisas de campo para

representar uma função de produção de uma cultura.

Dentre estes modelos, foi escolhido aquele que melhor se ajustou aos dados do experimento, tendo em vista os coeficientes de determinação  $R^2$ , o valor do teste F da análise de variância para todos os coeficientes, o erro padrão e os sinais das variáveis dos modelos analisados. Os modelos estatísticos testados foram:

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N+X_3.L^{0,5}+X_4.N^{0,5}+X_5.N^{0,5}.L^{0,5} \quad (2)$$

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N+X_3.L^{0,5}+X_4.N^{0,5}+X_5.N.L \quad (3)$$

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N+X_3.L^{0,5}+X_4.N^{0,5} \quad (4)$$

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N+X_3.L^2+X_4.N^2+X_5.L.N \quad (5)$$

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N+X_3.L^2+X_4.N^2 \quad (6)$$

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N+X_3.L^{1,5}+X_4.N^{1,5}+X_5.L.N \quad (7)$$

$$Z=X_0+X_1.L+X_2.N-X_3.L^{1,5}-X_4.N^{1,5} \quad (8)$$

$$Z=X_0+X_1.L-X_2.L^2-X_3.N^2 \quad (9)$$

$$Z=X_1.L+X_2.N-X_3.L^2-X_4.N^2+X_5.L.N \quad (10)$$

$$Z=X_1.L+X_2.N-X_3.L^2-X_4.N^2 \quad (11)$$

#### 4.6 Região de produção máxima

Os valores das variáveis independentes, L e N que maximizam a produção foram obtidos derivando-se a equação que melhor se ajustou aos dados do experimento em relação a cada fator estudado e igualando-se a zero (Equações 12 e 13).

$$\partial Z/\partial L=0 \quad (12)$$

$$\partial Z/\partial N=0 \quad (13)$$

Onde:

$\partial Z/\partial L$ = derivada da função (Z) em relação ao fator considerado (L);

$\partial Z/\partial N$  = derivada da função (Z) em relação ao fator considerado (N);

#### 4.7 Taxa marginal de substituição técnica

A taxa marginal de substituição (TMS) que corresponde a quantidade do fator lâmina, a qual pode ser substituída pelo fator nitrogênio, mantendo o mesmo nível de produtividade, foi obtida pela relação entre a derivada primeira da função de produção em relação ao fator lâmina e a derivada primeira da função de produção em relação ao fator nitrogênio (Equação 14).

$$TMS=-(\partial Z/\partial N)/(\partial Z/\partial L) \quad (14)$$

Onde:

$\partial Z/\partial L$  = derivada da função (Z) em relação ao fator considerado (L);

$\partial Z/\partial N$  = derivada da função (Z) em relação ao fator considerado (N);

#### 4.8 Isoquantas e região de produção racional

A partir da função de produção foram determinadas as isoquantas, plotando-se os dados de lâminas de água e doses de nitrogênio em função das produtividades previamente fixadas em um gráfico de duas dimensões. O ponto de cada isoquanta em que a taxa marginal de substituição é nula ou infinita delimita a região de produção racional.

#### 4.9 Análise estatística

Para o rendimento de açúcar standard, álcool anidro e álcool hidratado foi realizado o teste F e aplicado teste de Tukey para as interações significativas ( $P < 0,05$ ) com o Software Sisvar (FERREIRA, 1998).

Para os parâmetros dos modelos que descrevem as funções de produção foi realizado o teste F, cálculo do  $R^2$ , cálculo do erro padrão e análise dos sinais das funções.

A análise estatística foi realizada utilizando o Software Statistica 10 (STATSOFT, 2011).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Função de produção

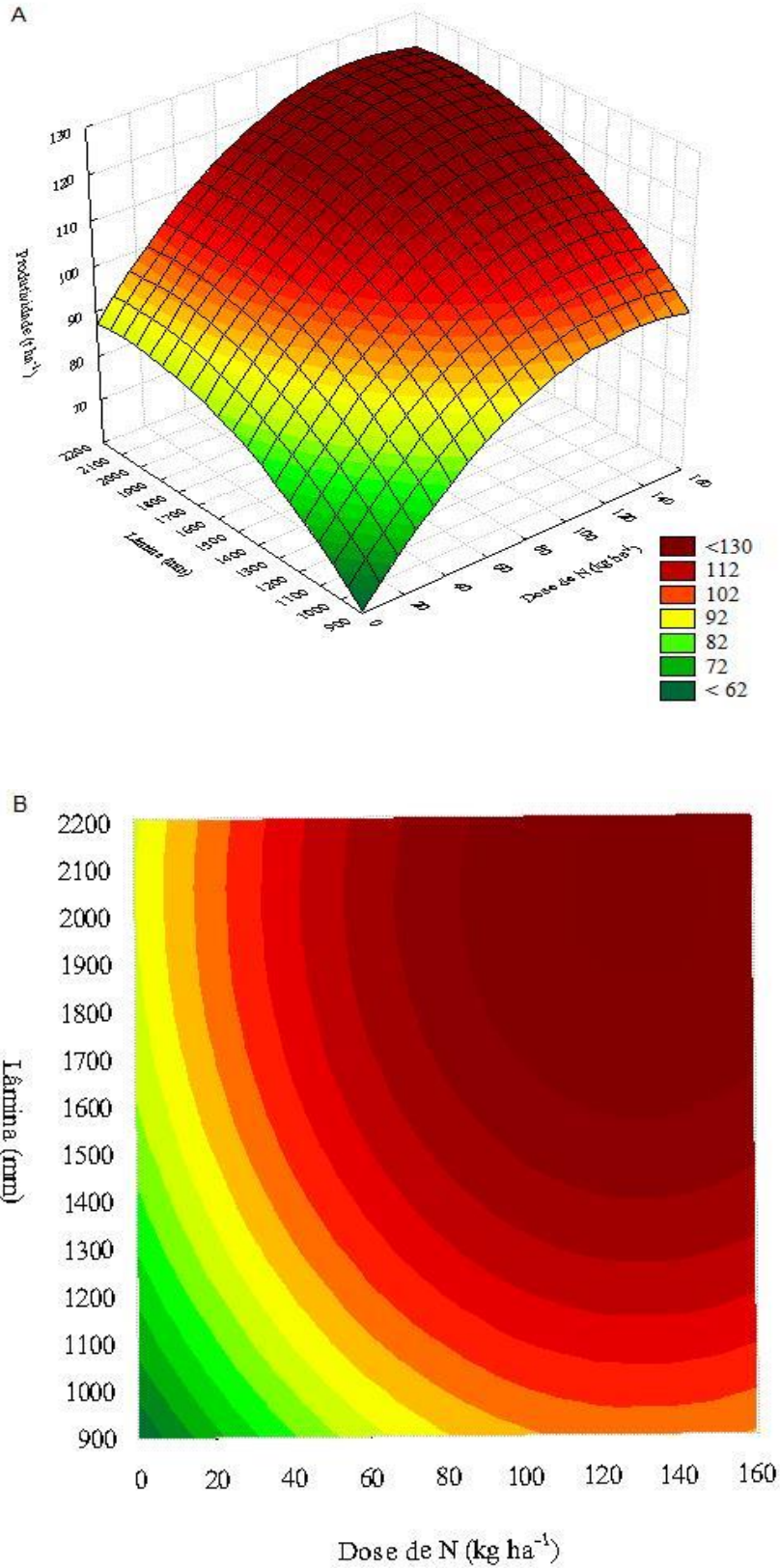
Depois de realizada a análise dos parâmetros dos 10 modelos que descrevem o comportamento da função de produção, apenas os modelos 10 e 11 apresentaram todos os parâmetros significativos pelo teste F ( $P < 0,01$ ), com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,69; o que garante bom ajuste e explicação da variância nos solos com e sem subsolagem. Para representar o comportamento da produtividade em ambos os casos foi escolhida a equação 11, por possuir também o menor erro padrão em ambos os casos.

A função de produção descreve o comportamento da produtividade em função da dose de N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e da lâmina total (precipitação + irrigação) no cultivo da cana-de-açúcar. Na Figura 3 observa-se o comportamento da função de produção para o solo não subsolado conforme descrito na equação 15.

$$\text{TCH} = 0,086411L + 0,562707N - 0,000021L^2 - 0,002148N^2 \quad (15)$$



**Figura 3.** Função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo não subsolado.



Na Figura 3A observa-se que a medida que a dose de N e a lâmina total aumentam a produtividade também aumenta até chegar a um ponto de máxima. Segundo Singh e Brar (2015) a cana-de-açúcar responde bem a irrigação, o que proporciona aumento de produtividade.

As isoquantas que descrevem a relação entre a lâmina e a dose de N podem ser observadas na Figura 3B. As isoquantas são curvas onde o fator dependente, no caso a produtividade, permanece constante enquanto se varia os outros fatores independentes. Utilizando essas isoquantas é possível mensurar a relação entre as doses de N e as lâminas totais visando-se o alcance da produtividade desejada.

A produção máxima para a função de produção da cana-soca em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo não subsolado foi obtida igualando-se a 0 as derivadas parciais da função, conforme as equações 16 e 17.

$$\partial Z/\partial N = 0,562707 - 4,296 \times 10^{-3} N = 0 \quad (16)$$

$$\partial Z/\partial L = 0,086411 - 4,2 \times 10^{-5} L = 0 \quad (17)$$

Desta forma a produtividade máxima encontrada foi de 125 Mg ha<sup>-1</sup>, obtidas a partir da combinação da lâmina de 2033 mm com a dose de 131 kg ha<sup>-1</sup> de N. A lâmina total da produtividade máxima foi 40%

superior a lâmina de 100% da ETC (1456 mm), considerada a padrão. Para a dose de N, o aumento em relação a dose padrão (80 kg ha<sup>-1</sup>) superou os 60%.

Analisando a equação (15) que descreve a função de produção verifica-se que o tratamento que recebeu a dose de 80 kg de N ha<sup>-1</sup> (dose padrão) combinado com a lâmina de 100% da ETC (N3L3) proporcionou a obtenção de produtividade de 112 Mg ha<sup>-1</sup>. A máxima produtividade alcançada supera em 12% esse valor.

O menor valor da produtividade alcançada combinando-se a lâmina (0% ETC – 905 mm) e dose (0 kg ha<sup>-1</sup>) foi de 64 Mg ha<sup>-1</sup>. Obtendo-se com a produtividade máxima um aumento de 95%. De acordo com Silva, Cato e Costa (2010), um canalial economicamente produtivo deve ser conduzido por no mínimo cinco a seis cortes ou até quando a produtividade média for próxima a 65 Mg ha<sup>-1</sup>. O incremento de irrigação nas áreas de sequeiros dos canaliais brasileiros tem um potencial substancial no incremento de biomassa (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A taxa marginal de substituição (TMS) para o solo não subsolado é apresentada na Tabela 6. Por meio da TMS pode-se constatar o quanto pode-se substituir da lâmina (mm) por kg de N mantendo-se a mesma produtividade.

**Tabela 6.** Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar isoquantas de 70, 80, 90, 100, 110, 120 Mg ha<sup>-1</sup> em solo não subsolado.

N (kg ha <sup>-1</sup> )	70 Mg ha <sup>-1</sup>		80 Mg ha <sup>-1</sup>		90 Mg ha <sup>-1</sup>		100 Mg ha <sup>-1</sup>		110 Mg ha <sup>-1</sup>		120 Mg ha <sup>-1</sup>	
	L (mm)		L (mm)		L (mm)		L (mm)		L (mm)		L (mm)	
10	986	-11,7	1241	-15,5	1639	-31,1						
20			1107	-12,1	1412	-18,1						
30			997	-9,8	1256	-13,1	1672	-28,7				
40					1140	-10,3	1461	-16,1				
50					1049	-8,3	1327	-11,6	1857	-46,4		
60					974	-6,8	1225	-8,9	1606	-16,8		
70							1147	-6,9	1470	-10,9		
80							1086	-5,4	1380	-7,9		
90							1038	-4,2	1310	-5,7	1810	-18
100							1001	-3,0	1261	-4,1	1679	-8,8
110							975	-2,0	1230	-2,6	1615	-5,1
120							960	-1,0	1209	-1,3	1575	-2,4
130							955	-0,1	1202	-0,1	1561	-0,2
140							960	0,8	1208	1,1	1570	2,0
150							972	1,8	1225	2,9	1605	4,5
160							995	2,8	1255	3,8	1666	8,0

A TMS negativa indica que a água está sendo substituída pelo nitrogênio em proporções decrescentes. Já a obtenção de TMS positiva evidencia que a água está sendo substituída por nitrogênio em quantidades crescentes, sendo então a substituição antieconômica.

A análise da Tabela 6 permite uma série de combinação de cenários para obtenção das mais diversas produtividades garantindo o manejo adequado das lâminas e das doses de N. A TMS reforça a importância do manejo adequado da irrigação e da adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar. Segundo Vale *et al.* (2013) o manejo inadequado da adubação nitrogenada nos canaviais pode levar à redução no rendimento e longevidade das culturas, diminuindo assim o número de cortes entre as reformas.

Observando a produtividade de 110 Mg ha<sup>-1</sup>, o mais próximo do obtido em N3L3

(80 kg de N ha<sup>-1</sup> e lâmina de 1456 mm), observa-se que a menor dose de N aplicada para obtenção dessa produtividade é de 50 kg combinada com uma lâmina de 1810 mm, com TMS de -46,53, ou seja, para manter a mesma produtividade o acréscimo de um kg de N é seguido do decréscimo de 46,53 mm.

Nesta mesma produtividade de 110 Mg ha<sup>-1</sup> acima da dose de N de 140 kg ha<sup>-1</sup> é antieconômico substituir o fator lâmina (mm) por kg de N, pois a partir daí a TMS é positiva. A TMS de 1,11 indica que para cada kg de N acrescentado acrescenta-se também 1,11 mm de água para manter-se a mesma produtividade. Segundo Leite *et al.* (2013) o fator água pode ser substituído pelo fator nitrogênio até certo ponto, permitindo obter a mesma produtividade após o qual o volume de água aplicado ultrapassa a área de produção racional.

Na Figura 3B ao observar as isoquantas, identifica-se a região de

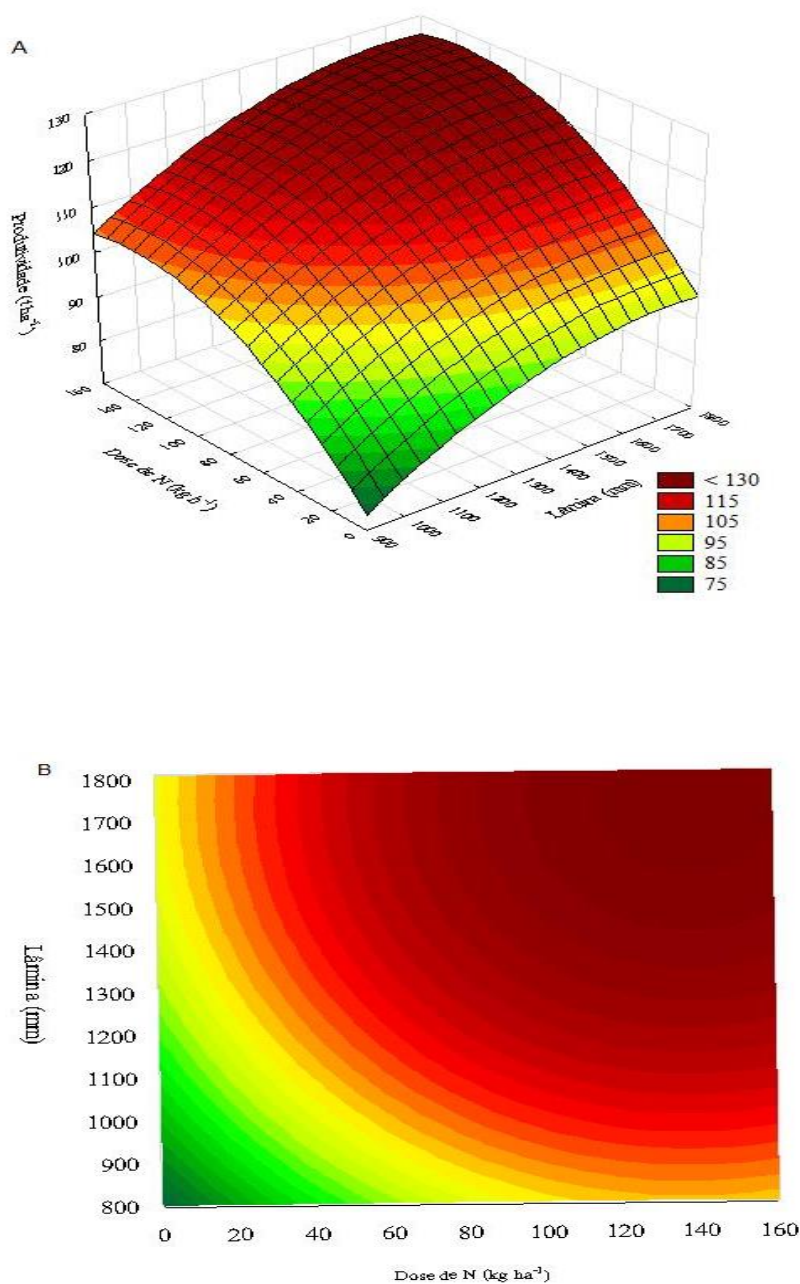
produção racional da cultura da-cana-de-açúcar para este estudo. Dada a função de produção escolhida, as lâminas de água e as doses de N, que delimitam a região de produção racional, correspondem aos mesmos valores que combinados resultam na produção máxima. Nessa região a TMS é

nula ou infinita. A lâmina e a dose de N são respectivamente 2033 mm e 131 kg ha<sup>-1</sup>.

Na Figura 4 observa-se o comportamento da função de produção para o solo subsolado conforme descrita na equação 18.

$$\text{TCH sub} = 0,110317L + 0,458228N - 0,000032L^2 - 0,001661N^2 \quad (18)$$

**Figura 4.** Função de produção da cana-planta em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo subsolado.



A produção máxima para a função de produção da cana-soca em função das lâminas de água e doses de nitrogênio no solo não subsolado foi obtida igualando-se a 0 as derivadas parciais da função conforme as equações 19 e 20.

$$\partial Z/\partial N = 0,458228 - 3,322 \cdot 10^{-3} N = 0 \quad (19)$$

$$\partial Z/\partial L = 0,110317 - 6,4 \cdot 10^{-5} L = 0 \quad (20)$$

Analisando o tratamento que recebeu a dose 80 kg de N ha<sup>-1</sup> (dose padrão) com a lâmina de 100% da ETC (N3L3) encontra-se uma produtividade de 118 Mg ha<sup>-1</sup>. A máxima produtividade alcançada foi apenas, aproximadamente, 8% superior a produtividade com as doses padrões. A lâmina de irrigação encontrada foi 18% superior a lâmina de 100% da ETC, enquanto para a dose de N o aumento registrado foi de 71%.

Nas duas condições de solo encontra-se valores de produtividade para N3L3

próximos às produtividades máximas. Segundo Roberts (2008) lâminas altas com doses altas de N têm grande potencial de perdas, principalmente por meio da lixiviação. Mendonça *et al.* (2018) cultivando cana-de-açúcar em Minas Gerais também encontraram produtividades elevadas com a aplicação de 80 kg ha<sup>-1</sup> suprimindo a ETC da cultura.

O menor valor de produtividade 74 Mg ha<sup>-1</sup> foi obtida na lâmina (0% ETC) e dose (0 kg ha<sup>-1</sup>). A produtividade máxima representa um aumento de aproximadamente 70% em relação a menor produtividade encontrada. Esse valor é superior aos 59,73 Mg ha<sup>-1</sup> encontrados por Costa *et al.* (2016) em cana-planta para a mesma dose de N e aplicação de 0% da ETC. Na Figura 3B os valores que combinados resultam na produtividade máxima, também delimitam a região de produção racional igualmente no solo não subsolado.

Na Tabela 7 é apresentada a TMS para o solo subsolado.

**Tabela 7.** Valores da taxa marginal de substituição (TMS) de água (L) por nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar isoquantas de 80, 90, 100, 110, 120 Mg ha<sup>-1</sup> em solo subsolado.

N (kg ha <sup>-1</sup> )	80 Mg ha <sup>-1</sup>		90 Mg ha <sup>-1</sup>		100 Mg ha <sup>-1</sup>		110 Mg ha <sup>-1</sup>		120 Mg ha <sup>-1</sup>	
	L (mm)		L (mm)		L (mm)		L (mm)		L (mm)	
10	1030	-10,3	1170	-11,9	1639	-74,3				
20			1070	-9,3	1403	-18,8				
30			980	-7,5	1256	-11,9				
40					1150	-8,8	1550	-28,5		
50					1060	-6,8	1349	-12,1		
60					995	-5,5	1249	-8,5		
70					951	-4,5	1200	-6,7		
80							1140	-5,1	1456	-13,2
90							1080	-3,8	1400	-7,6
100							1050	-2,9	1350	-5,2
110							1020	-2,05	1290	-3,31
120							1010	-1,30	1270	-2,03
130							1000	-0,57	1250	0,86
140							1000	0,15	1250	0,23
150							1000	0,86	1260	1,34
160							1010	1,6	1280	2,56

Analisando a produtividade de 120 Mg ha<sup>-1</sup>, o mais próximo do obtido em N3L3 (80 kg de N ha<sup>-1</sup> e lâmina de 1456 mm) observa-se que a menor dose de N aplicada para obtenção dessa produtividade é a mesma usada no tratamento N3L3. Abaixo de 80 e acima de 120 Mg ha<sup>-1</sup> a TMS fica positiva indicando doses crescentes dos dois recursos para aumento ou manutenção da produtividade.

Comparando-se o solo sem e com subsolagem observa-se que as produtividades de 125 Mg ha<sup>-1</sup> obtida no solo sem subsolagem e de 127 Mg ha<sup>-1</sup> para obtida no solo com subsolagem são bastante próximas, o que acontece quando comparadas as doses de N; 131 e 137 kg ha<sup>-1</sup> também para os solos sem e com subsolagem. Quando comparadas as lâminas que combinadas com a dose de N alcançam essas produtividades essa diferença aumenta bastante. Quase 18% entre as lâminas aplicadas, uma diferença de 304 mm. Esses valores são inferiores a produtividade obtida

por Costa *et al.* (2016) em cana-planta 170 Mg ha<sup>-1</sup>).

A condição de solo não subsolado resultou em uma maior lâmina para alcançar a máxima produtividade. Segundo Alameda *et al.* (2012) a compactação do solo provoca menor desenvolvimento das raízes o que dificulta a absorção de água e nutrientes pela planta.

Segundo Cherubin *et al.* (2016) o aumento da compactação do solo promove decréscimo do potencial de rendimento na quarta e quinta soca. Assim, é fundamental a utilização de práticas que reduzam a compactação do solo, como a subsolagem, e minimizem os danos na estrutura do solo, que prejudicam a absorção de água e nutrientes e promove a diminuição do rendimento da cana-de-açúcar (SOUZA *et al.*, 2014).

Fatores como genótipo, idade das plantas, região de cultivo além dos estudados podem influenciar a produtividade da cana-

de-açúcar, por isso na literatura encontra-se diversos valores de produtividades.

Cardozo, Bordonal e Scala Júnior (2016) relataram que a produtividade média da cana-de-açúcar irrigada no Brasil pode atingir valores maiores que 140 Mg ha<sup>-1</sup>. Silveira, Barbosa e Oliveira (2002) encontraram produtividades entre 122 e 151 Mg ha<sup>-1</sup> com aplicação de fertilizantes convencionais em regime de irrigação. Dias e Sentelhas (2019) e Silva *et al.* (2019) já demonstraram a viabilidade técnica de irrigação com esta cultura, resultando em consideráveis aumentos de produção. Assim como os valores encontrados neste estudo em condições de irrigação, esses valores são superiores a produtividade média do Brasil, que é de 72,61 kg ha<sup>-1</sup> segundo a Conab (CANA-DE-AÇÚCAR, 2022), resultando no entendimento de que a irrigação e adubação da cana-de-açúcar de forma eficiente, proporcionam maiores produtividades para o produtor.

## 5.2 Rendimento de açúcar e álcool

Segundo Moraes *et al.* (2016) é importante que se conheça e entenda as correlações existentes entre os atributos produtivos e os tecnológicos da planta com os do solo, de forma a contribuir não apenas com a redução dos custos, mas também como forma de proporcionar o aumento da produtividade da cultura e da qualidade do material colhido.

O entendimento da interação entre os fatores que limitam a produtividade é de suma importância para a indústria sucroalcooleira, pois assim podemos identificar o manejo adequado para alcançar os maiores rendimentos.

Na Tabela 8 é apresentada a análise de variância para o rendimento de açúcar (Aç), álcool anidro (AA) e Álcool hidratado (Ah).

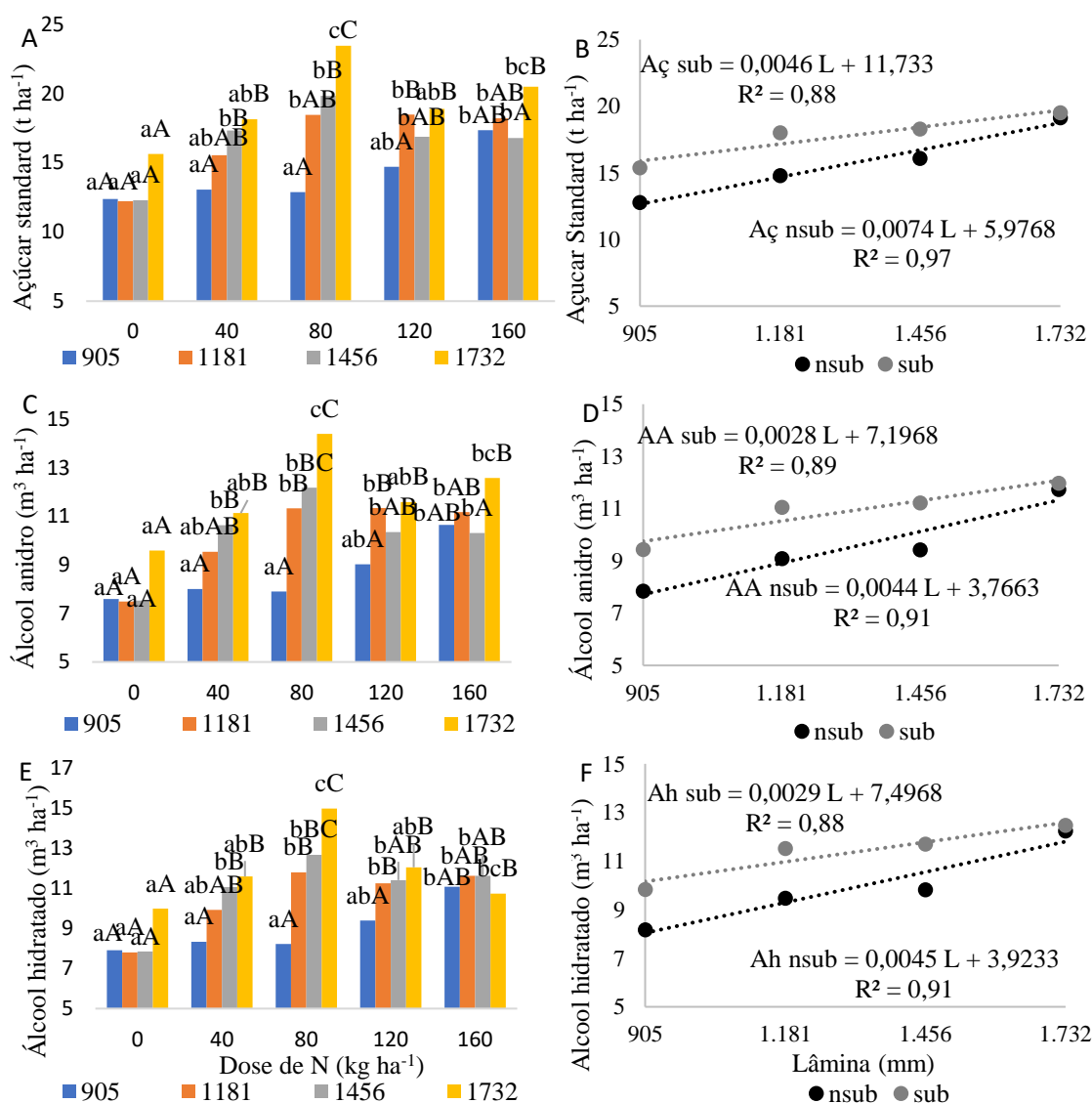
**Tabela 8.** Resumo da ANOVA do rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar em função das lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N).

Fv	GL	QM AÇ	QM AA	QM AH	F
Bloco	2	5,58	2,10	2,28	0,36ns
N	4	118,24	44,49	48,27	7,70**
erro 1	8	15,34	5,77	6,26	
L	3	139,58	52,52	56,99	6,43*
erro 2	6	21,70	8,16	8,86	
Sub	1	155,10	58,36	63,32	206,14**
erro 3	2	0,75	0,28	0,30	
NxL	12	15,34	5,77	6,26	2,93*
NxS	4	13,46	5,07	5,50	2,57ns
LxS	3	16,02	6,03	6,54	3,06*
NxLxS	12	90,06	3,41	3,70	1,73ns
erro 4	23	5,22	1,97	2,13	
Total	119				

Na Figura 5 são apresentadas as análises dos desdobramentos das interações

entre as doses de N e as lâminas e entre as lâminas e o solo sem e com subsolagem.

**Figura 5.** Desdobramento da interação entre as doses de N e as lâminas (A, C e E) e entre as lâminas e o solo não subsolado (nsub) e subsolado (sub) (B, D, F) para o rendimento de açúcar standard (Aç), álcool anidro (AA) e Álcool hidratado (Ah).



Letras minúsculas para o desdobramento das lâminas dentro de cada dose e letras maiúsculas para o desdobramento das doses dentro de cada lâmina.

Na Figura 5A, 5C e 5E podem ser observados os desdobramentos das doses de N dentro de cada lâmina e das lâminas dentro de cada dose de N para o açúcar standard, álcool anidro e álcool hidratado, respectivamente.

O maior valor encontrado de rendimento de açúcar, álcool anidro e álcool hidratado ocorreu na interação entre a lâmina de 1732 mm com a dose de 80 kg de N ha<sup>-1</sup>. Com exceção da dose 0 kg ha<sup>-1</sup>, cujo

rendimento de açúcar foi menor para 1732 mm.

A lâmina de 905 mm dentro de todas as doses também apresentou rendimentos baixos que só se diferenciaram na dose de 160 kg de N ha<sup>-1</sup>. Onde a falta de água foi compensada por uma maior oferta de N.

A menor lâmina não foi suficiente para suprir todas as necessidades da planta, o que provocou a queda de rendimento. A deficiência hídrica não se limita apenas às



regiões áridas e semiáridas do mundo, em regiões consideradas úmidas a distribuição irregular das chuvas pode, em alguns períodos, limitar o desenvolvimento e prejudicar a produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2014).

O estresse hídrico afeta a planta de várias formas. A planta fecha os estômatos para diminuir a perda de água e acaba absorvendo menos CO<sub>2</sub> que seria usado na fotossíntese ocasionando diminuição da fotossíntese líquida. Somados aos efeitos na fase bioquímica da fotossíntese existem os danos aos fotossistemas responsáveis pela captura do fóton de luz, o que diminui também o desempenho da fase fotoquímica.

A falta de água também dificulta a absorção de nutrientes e esses efeitos somados resultam na diminuição de produtividade e rendimento de açúcar e álcool. Segundo Bastos *et al.* (2016) a água interage com N, de modo a influenciar o total de açúcar recuperável.

A falta de N também desempenha seu papel nos menores rendimentos encontrados. O N participa da composição de diversas moléculas na planta e a baixa disponibilidade desse nutriente provoca diminuição do crescimento, área foliar e menores teores de pigmentos fotossintéticos. Segundo Rhein *et al.* (2016) a produtividade e o rendimento açúcar aumentam linearmente com o incremento das doses de nitrogênio aplicadas.

Na Figura 5B pode ser observado o desdobramento da dose de N para os solos sem e com subsolagem para o rendimento açúcar standard. Quanto maior a lâmina de irrigação maior o rendimento de açúcar. Além disso, o solo subsolado proporcionou a obtenção de maiores rendimentos para a cultura em relação ao solo não subsolado. Um aumento médio de 13% no rendimento de açúcar.

Aplicando-se as lâminas máximas nas equações que descrevem o comportamento do rendimento de açúcar encontramos 19,7 e 18,79 t de açúcar ha<sup>-1</sup>

para o solo com e sem subsolagem respectivamente. Isso representa um aumento de aproximadamente 5% nos rendimentos para o solo subsolado. Comparando-se os rendimentos de açúcar para 1456 mm (100% da ETC) essa diferença aumenta para aproximadamente 10% com 18,43 e 16,75 Mg ha<sup>-1</sup> para o solo com e sem subsolagem respectivamente.

O desdobramento do rendimento de álcool anidro em função da lâmina total no solo com e sem subsolagem pode ser observado na Figura 5D. O solo subsolado na lâmina máxima apresentou rendimento de 12,04 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> enquanto no solo não subsolado o rendimento foi de 11,37 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, uma diferença de 6% entre si.

Para o álcool hidratado (Figura 5F) os rendimentos nas lâminas máximas foram 11,71 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 13,07 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, resultando em aproximadamente 12% de diferença entre os solos. Notadamente essas diferenças se alteram quanto menor a lâmina aplicada, chegando a uma diferença média de 15% em ambos os casos.

## 6 CONCLUSÕES

A subsolagem do solo proporcionou menor aplicação de água em relação ao solo não subsolado para obtenção de produtividades semelhantes.

Doses de N entre 80 a 160 kg ha<sup>-1</sup> e lâminas totais entre 1456 e 1731 mm proporcionaram os maiores rendimentos de açúcar e álcool.

As combinações de doses de nitrogênio e lâminas de água escolhidas para o alcance de maiores produtividades de açúcar e álcool devem se situar dentro da região de produção racional.

A função 11 onde  $Z=X1.L+X2.N-X3.L^2-X4.N^2$  foi a que melhor se ajustou aos dados do experimento.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALAMEDA, N. P. R. D.; ANTEN, R. V. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v. 120, p. 121-129, 2012.
- BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 13, p. 3945-3958, 2015.
- BASTOS, A. V. S.; SILVA, M. V.; SILVA, E. C.; TEIXEIRA, M. B.; MURAOKA, T.; SOARES, F. A. L.; COELHO, R. D. Agroindustrial yield of sugarcane grown under different levels of water replacement and nitrogen fertilization. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 11, n. 29, p. 2623-2629, 2016.
- CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 1, n. 1, p. 17, abr. 2022. Safra 2022/23, Primeiro levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 01 maio 2022.
- CARDOZO, N. P.; BORDONAL, R. O.; SCALA JÚNIOR, N. L. Greenhouse gas emission estimate in sugarcane irrigation in Brazil: is it possible to reduce it, and still increase crop yield? **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, n. 5, p. 3988-3997, 2016.
- CAVALCANTI, F. J. A. (coord.). **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2a. aproximação**. 2. ed. rev. Recife: IPA, 2008.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. A. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS One**, São Francisco, v. 11, n. 3, p. e0150860, 2016.
- COSTA, A. R. F. C.; ROLIM, M. M.; BONFIM-SILVA, E. M.; SIMÕES NETO, D. E.; PEDROSA, E. R. M. Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane cultivated under different types of water management and doses of nitrogen. **Australian Journal of Crop Science**, Kenmore, v. 10, n. 3, p. 362-369, 2016.
- CUNHA, F. N.; SILVA, N. F.; SOUSA, A. E. C.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, F. A. L. Yield of sugarcane submitted to nitrogen fertilization and water depths by subsurface drip irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 9, p. 841-846, 2016.
- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.
- DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Dimensioning the Impact of Irrigation on Sugarcane Yield in Brazil. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 21, n. 1, p. 29-37, 2019.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013.

FAOSTAT. **Statistical databases**. Roma: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/>. Acesso em: 07 mar. 2022.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-Açúcar**. 3. ed. Piracicaba: STAB, 2011.

FERREIRA, D. F. **Sisvar** – sistema de análise de variância para dados balanceados. Lavras: UFLA, 1998.

HANKS, R. J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V. P.; WILSON, G. D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. **Soil science Society of American Journal**, Madison, v. 40, n. 2, p. 426-429, 1976.

HEADY, E. O.; DILLON, J. L. **Agricultural Production Functions**. Ames: Iowa State University Press, 1961.

HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. **Water Production Functions for Irrigated Agriculture**. Ames: Iowa State University Press, 1978.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field crops research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. A. Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 129-138, 2011.

LEITE, K. N.; COSTA, R. N. T.; CRISÓTOMO, J. R.; FRIZONNE, J. A.; MARINHO, A. B. Economic analysis of cashew early dwarf crop BRS – 189 depending on water levels and doses of potassium fertilization. **Engenharia**

**Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 739-747, 2013.

MENDONÇA, H. V.; MARTINS, C. E.; ROCHA, W. S. D.; BORGES, C. A. V.; OMETTO, J. P. H. B.; OTENIO, M. H. Biofertilizer replace urea as a source of nitrogen for sugarcane production. **Water, Air, & Soil Pollution**, Dordrecht, v. 229, n. 7, p 1-7, 2018.

MORAES, E. R.; DOMINGUES, L. A. S.; MEDEIROS, M. H.; PEIXOTO, J. V. M.; LANA, R. M. Q. Produtividade e características agrônômicas da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 3, n. 1, p. 27-32, 2016.

RHEIN, A. F.; PINCELLI, R. P.; ARANTES, M. T.; DELLABIGLIA, W. J.; KÖLLN, O. T.; SILVA, M. D. A. Technological quality and yield of sugarcane grown under nitrogen doses via subsurface drip fertigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 3, p. 209-214, 2016.

NASCIMENTO, F. N.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. A.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; LOPES, A. S. Agro-industry production of sugarcane grown using subsurface drip fertigation with nitrogen and potassium. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 53, n. 12, p. 1346-1354, 2018.

OLIVEIRA, J. T.; OLIVEIRA, R. A.; BRITO, O. A.; CUNHA, F. F.; GAVA, R. Increase in the irrigated area of sugarcane and its potential in the bioenergetic generation of Brazil. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 17, n. 3, p. 33-38, 2021.

ROBERTS, T. L. Improving nutrients use efficiency. **Turkish Journal of**

**Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 32, n. 3, p. 177-182, 2008.

SINGH, K.; BRAR, S. A. Effect of planting methods and irrigation schedules on cane yield, quality, economics and water productivity of spring sugarcane (*Saccharum officinarum*) in South Western Punjab. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v. 60, n. 4, p. 601-605, 2015.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241-249, 2014.

SILVA, M. A.; CATO, S. C.; COSTA, A. G. F. Produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar submetida à aplicação de biorregulador e fertilizantes líquidos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 774-780, 2010.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; SILVA, E. C.; COELHO, R. D.; CABRAL, F. F. Development and yield of irrigated sugarcane as affected by nitrogen sources and rate in Brazilian cerrado Oxisol. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 11, n. 3, p. 267-281, 2019.

SILVEIRA, L. C. I.; BARBOSA, M. H. P.; OLIVEIRA, M. W. Manejo de variedades de cana-de-açúcar predominantes nas principais regiões produtoras de cachaça de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 23, n. 217, p. 25-32, 2002.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; BARBOZA, R. S.; SOBREIRA, R. B.; SILVA, F. A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n. 1, p. 135-146, 2014.

STATSOFT, Inc. **STATISTICA**: data analysis software system. Versão 10. 0, Tulsa: StatSoft Inc., 2011.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. ver. e atual. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

VALE, D. W.; PRADO, R. M.; CANTARELLA, H.; FONSECA, I. M.; AVALHÃES, C. C.; CORREIA, M. A. R.; BARBOSA, M. P. Ammonium and nitrate in soil and ratoon sugarcane grown in function of nitrogen on Oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, n. 2, p. 201-213, 2013.