

ISOQUANTAS DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA.

IÊDO TEODORO¹; JOSÉ DANTAS NETO²; JOSÉ LEONALDO DE SOUZA³; GUILHERME BASTOS LYRA⁴; KLEBSON SANTOS BRITO⁵; LEOPOLDO DE ALAMEIDA SÁ⁶; MARCOS ANTÔNIO LIODORIO SANTOS⁷ e PEDRO LUÃ VIEIRA de SOUZA SARMENTO⁸.

- 1 Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, Maceió-Al. iedoteodoro@ig.com.br ;
- 2 Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande –Pb. zedantas@deag.ufcg.edu.br ;
- 3 Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, Maceió-Al. leonaldojs@yahoo.com.br ;
- 4 Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, Maceió-Al. gblyra@gmail.com ;
- 5 Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande –Pb. klebsombrito@yahoo.com.br ;
- 6 Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, Maceió-Al. leo_sa90@hotmail.com ;
- 7 Faculdade de Ciências Agronômicas UNESP. Botucatu – Sp. liodorio@hotmail.com ;
- 8 Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, Maceió-Al. Pedro.agronomia_ufal@hotmail.com .

1 RESUMO

Um experimento de campo com diferentes níveis de irrigação e nitrogênio foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas com o objetivo de determinar a função de produção e as isoquantas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar com base nas lâminas de irrigação e doses de nitrogênio (N). A precipitação pluvial efetiva durante o ciclo de produção foi 1.037 mm e a lâmina de irrigação bruta máxima foi 873 mm. A produtividade agrícola ficou entre 118 e 188 Mg ha⁻¹, média de 160 Mg ha⁻¹. Na isoquanta da produtividade agrícola média da cana-de-açúcar, a taxa marginal de substituição de água por N é 0,36 kg mm⁻¹ (na interseção das retas de 25 kg de N ha⁻¹ e 760 mm de irrigação) e infinita (na interseção das retas de 125 kg de N ha⁻¹ e 390 mm de irrigação). A quantidade de água e nitrogênio de menor custo para produzir 160 Mg ha⁻¹ foi 390 mm de irrigação e 112 kg de N ha⁻¹. A regressão polinomial de segundo grau apresentou ajuste médio ($r^2 = 62\%$) para a produtividade agrícola em relação às lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. A resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada aumenta em proporção direta com disponibilidade hídrica do solo.

Palavras-chave: variáveis meteorológicas, gotejamento, função de resposta.

TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, J. L. de; LYRA, G. B.; BRITO, K. S.; SÁ, L. de A.; SANTOS, M. A. L. e SARMENTO, P. L. V. de S.

YIELD ISOQUANTS FOR SUGAR CANE AS A FUNCTION OF IRRIGATION AND NITROGEN FERTILIZATION

2 ABSTRACT

A field experiment with different levels of irrigation and nitrogen was carried out at the Center of Agriculture Sciences of the Federal University of Alagoas in order to determine the production function and the isoquants of agricultural productivity of sugar cane based on levels of irrigation and nitrogen (N). Effective rainfall during the production cycle was 1,037 mm and maximum gross irrigation depth was 873 mm. Agricultural productivity ranged from 118 to 188 Mg ha⁻¹, mean level of 160 Mg ha⁻¹. The marginal rate of substitution of water by N is 0.36 kg mm⁻¹ (at the line intersection of 25 kg of N ha⁻¹ and 760 mm of irrigation) and infinity (at the line intersection of 125 kg of N ha⁻¹ and 390 mm of irrigation). The amount of water and nitrogen of minimum cost to produce 160 Mg ha⁻¹ is 390 mm of irrigation and 112 kg of nitrogen per hectare. The second degree polynomial regression showed medium adjustment ($r^2 = 62\%$) for sugar cane yield in relation to irrigation and nitrogen fertilization. The response of sugar cane to nitrogen fertilization increases directly proportional to soil humidity.

Keywords: meteorological variables, drip irrigation, response function

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica para várias regiões tropicais e subtropicais do mundo. Em Alagoas, estado brasileiro com aproximadamente três milhões de habitantes, o setor sucroalcooleiro gera 91,0 mil empregos diretos, sendo 70,0 mil empregos rurais e 21,0 mil empregos urbanos (SINDAÇUCAR-AL, 2011). Na safra 2010/2011, esse estado produziu 29,12 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 451,99 mil hectares, rendimento agrícola de 64,5 Mg ha⁻¹. Nessa safra, a produtividade média brasileira foi 77,4 Mg ha⁻¹ e no estado de São Paulo esse índice foi 83,0 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2011).

A radiação solar que rege as variações diária e anual da temperatura do ar juntamente com a precipitação pluvial e a umidade relativa do ar são as principais variáveis meteorológicas que influenciam o crescimento e desenvolvimento dos vegetais. Inman-Bamber & Smith (2005) analisaram os impactos das deficiências hídricas na produção de cana-de-açúcar e concluíram que a variabilidade temporal das condições hídricas do solo causada pela irregularidade das chuvas é, isoladamente, o fator que exerce maior peso na oscilação dos rendimentos agrônômicos da referida cultura agrícola. Teodoro et al. (2009), concluíram que a temperatura do ar na costa leste do Nordeste brasileiro é ideal para o cultivo da cana-de-açúcar mas a precipitação pluvial, devido a má distribuição no tempo, prejudica o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade dessa cultura.

O uso da irrigação durante a estação seca e veranicos é a alternativa para amenizar os efeitos da má distribuição da chuva e aumentar a produtividade e longevidade dos canaviais. Porém, os custos para a implantação, manutenção e manejo de sistemas de irrigação aliados à falta de água disponível na estação seca, impossibilitam a irrigação plena e em toda área cultivada com cana-de-açúcar nos Tabuleiros costeiros de Alagoas (TEODORO et al., 2007). A resposta dos cultivos agrícolas a diferentes níveis de irrigação depende das condições meteorológicas locais que resultam em diferentes condições de evapotranspiração e disponibilidades térmicas e hídricas associadas às características das variedades que influem diretamente na resistência aerodinâmica das plantas (COELHO et al., 2006). Outros

elementos, como pH, a composição química e o teor de matéria orgânica do solo também tem influência nas respostas das culturas agrícolas à irrigação, sobretudo o teor de matéria orgânica que é a principal fonte de ácidos húmicos e nitrogênio. Portanto, em casos de deficiências de alguns desses elementos, as correções dessas deficiências por meio de calagens e adubações são essenciais para se obter bons resultados com a prática da irrigação.

A adubação nitrogenada, no sentido de aumentar a produtividade agrícola e longevidade dos canaviais, se destaca entre as demais adubações. Sendo que as respostas da cana-de-açúcar ao nitrogênio, em geral, são mais frequentes nos ciclos de cana-soca do que em cana-planta (MAEDA et al., 2009). Na literatura existem muitas informações sobre as respostas e os benefícios do uso de nitrogênio em cana-de-açúcar, porém a maioria relata apenas como a eficiência da adubação nitrogenada é afetada por uma faixa estreita acima e abaixo do nível ótimo de umidade do solo (WIEDENFELD & ENCISO, 2008). Por isso, com o objetivo de determinar os níveis de irrigação e adubação nitrogenada ideal para otimizar os rendimentos agroindustriais da atividade canavieira, vários pesquisadores em diversas regiões do mundo estão estudando a eficiência da irrigação e do nitrogênio pela cultura da cana-de-açúcar (BASANTA et al., 2003; WATANABE et al., 2004; LECLER & JUMMAN, 2009 e MOROIZUMI et al., 2009). Contudo as informações sobre o custo desses manejos e a rentabilidade econômica para o produtor ainda é pouco discutida.

A rentabilidade econômica do agronegócio da cana-de-açúcar depende do custo de produção, do rendimento físico da cultura e do preço do produto (cana-de-açúcar), sendo que o custo de produção é o fator que o produtor tem controle mais efetivo. Nesse sentido, as funções de produção ou de respostas servem para orientar os agricultores nas tomadas de decisões em relação à quantidade de insumos a ser utilizada num determinado cultivo agrícola. E, as isoquantas ou linhas de isoproductos que relacionam a quantidade de dois fatores de produção com a produtividade agrícola dos empreendimentos agropecuários servem também para definir as quantidades desses fatores que proporcionam o menor custo de produção dos referidos empreendimentos. Sousa et al. (1999) concluíram que as curvas de regressão polinomial de segunda ordem ajustam satisfatoriamente a relação entre as produtividades de colmos e açúcar e às lâminas de irrigação total aplicadas. O objetivo desse trabalho foi avaliar as relações econômicas e hídricas da produção de cana-de-açúcar, com base nas: variáveis meteorológicas, isoquantas de produtividade agrícola, taxa marginal de substituição de água por nitrogênio, combinação da lâmina de irrigação e adubação nitrogenada que resultam no custo mínimo e a região de produção racional de cana-de-açúcar em função dos fatores de produção irrigação e nitrogênio.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Rio Largo – Al (09°28'S; 35°49'W; 127m), em um solo classificado por Carvalho (2003), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 1999), como Latossolo Amarelo Coeso Argissólico, de textura média / argilosa. A umidade do solo, em capacidade de campo e no ponto de murcha permanente é 0,2445 m³ m⁻³ e 0,1475 m³ m⁻³, respectivamente. A densidade volumétrica é 1,50 Mg m³, a porosidade total igual a 0,423 m³.m⁻³ e a velocidade de infiltração básica é 52 mm h⁻¹. O clima da região é caracterizado, pela classificação de Thornthwaite & Mather (1955), como quente e úmido

(B₁), megatérmico (A'), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w₂). A precipitação pluvial média anual é 1800 mm (CARVALHO, 2003).

4.2 Plantio e manejo da cultura

A variedade RB92579 foi plantada em 21/01/2009, em linhas duplas (1,40 m x 0,6 0m) com espaçamento médio de 1,0 m nas entre linhas, colocando-se 18,0 gemas por metro linear e a colheita foi realizada em 22/02/2010. A calagem e a adubação foram feitas de acordo com os resultados da análise química do solo (Tabela 1), aplicando-se 1.500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico 60 dias antes do plantio e concomitante ao plantio foram colocados 180 e 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Tabela 1. Resultados da análise química do solo da área experimental nas profundidades de 0,0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.

Determinações	Resultados		Determinações	Resultados	
	0 – 20 cm	20 -40 cm		0 – 20 cm	20 - 40 cm
pH em água	5,6	5,2	T (mmol _c dm ⁻³)	77,7	59,1
Fósforo (mg dm ⁻³)	2	2	V (%)	35,6	27,2
Potássio (mg dm ⁻³)	37	16	m (%)	0,7	8,5
Ca + Mg (mmol _c dm ⁻³)	26	15	M. O. (g kg ⁻¹)	18,9	10,7
Ca (mmol _c dm ⁻³)	16	8	Ferro (mg dm ⁻³)	167,4	277,5
Mg (mmol _c dm ⁻³)	10	7	Cobre (mg dm ⁻³)	0,86	0,73
Al (mmol _c dm ⁻³)	5,2	7,7	Zinco (mg dm ⁻³)	1,14	0,53
H + Al (mmol _c dm ⁻³)	50	43	Manganês (mg dm ⁻³)	4,58	3,29
SB (mmol _c dm ⁻³)	27,7	16,1			

Método EMBRAPA: Água (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn e Mn); KCl a 1N (Ca, MG e Al)

A irrigação foi feita por gotejamento superficial automatizado, com fita gotejadora de 16 mm e emissores com vazão nominal de 1,0 L h⁻¹, a cada 0,50 metros. As lâminas de irrigação de cada tratamento foram medidas com hidrômetro. A fonte de nitrogênio utilizada foi a uréia numa única aplicação em cobertura, colocada a 5,0 cm ao lado das plantas e coberta manualmente com enxada.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com sete lâminas de irrigação e cinco doses de nitrogênio. Nas parcelas ficaram as lâminas de irrigação determinadas com base na evapotranspiração de referência (ET_o): 0,0 ET_o, 0,25 ET_o, 0,50 ET_o, 0,75 ET_o, 1,00 ET_o, 1,25 ET_o, e 1,50 ET_o. E, nas subparcelas as doses de nitrogênio (0 (zero), 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). Logo após o plantio foram aplicadas duas lâminas de 30 mm, por aspersão convencional de baixa pressão, em todos os tratamentos para garantir a germinação, inclusive no tratamento 0,0 ET_o. As parcelas foram formadas por 10 linhas de cana-de-açúcar com 12 metros de comprimento e as subparcelas tinham duas linhas de cana com o mesmo comprimento das parcelas.

4.3 Variáveis agrometeorológicas

As variáveis agrometeorológicas como precipitação pluvial (P), temperatura do ar (T) e demais variáveis necessárias para o cálculo da evapotranspiração de referência foram obtidas em uma estação automática de aquisição de dados Micrologger, CR10X (Campbell Scientific, Logan, Utah) instalada a 400 m do experimento.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada pelo método de Penman – Monteith-FAO (ALLEN et al, 1998), conforme a equação 1.

$$ET_o (mm \text{ dia}^{-1}) = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left(\gamma \frac{600}{T+273} \right) U_2 (e_s - e)}{\Delta + [\gamma (1+0,34 U_2)]} \quad (1)$$

Em que, Δ = inclinação da curva da pressão de vapor d'água saturado versus temperatura do ar ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), R_n = Saldo de radiação ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G = fluxo de calor no solo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), γ = Coeficiente psicrométrico, T = temperatura média do ar, U_2 = velocidade média do vento a 2m de altura ($m \text{ s}^{-1}$), " e_s " = pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa) e " e " = pressão do vapor d'água do ar (kPa).

4.4 Produtividade agrícola e função de produção.

A produtividade agrícola foi estimada a partir da pesagem das duas linhas de cada subparcela. Essa pesagem foi feita com um dinamômetro de capacidade para pesar até 100 quilogramas com os feixes de colmos levantados por duas pessoas. E, a função de produção para as resposta da cana-de-açúcar à interação dos dois insumos, lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, que geraram as isoquantas ou linhas de mesma quantidade que representam a produtividade agrícola foi obtida pelo programa de computador "SURFER" que gerou os coeficientes da equação 2:

$$Y(L,N) = R_{00} + R_{01} \cdot L + R_{02} \cdot L^2 + R_{10} \cdot N + R_{20} \cdot N^2 + R_{11} \cdot L N \dots\dots\dots (2)$$

Em que L é a lâmina de irrigação total, em milímetro; N é a quantidade de nitrogênio, em $kg \text{ ha}^{-1}$ e R_{00} , R_{01} , R_{02} , R_{10} , R_{20} e R_{11} são os coeficientes da equação.

Os coeficientes da equação foram submetidos ao teste t ($p < 0,01$) para validar o uso da referida equação e para quantificar o ajuste da equação aos dados de origem foi utilizado o coeficiente de regressão (r^2).

4.5 Taxa marginal de substituição

A taxa marginal de substituição de lâmina de irrigação por dose de nitrogênio (TMS_{L/N}) indica as proporções entre a lâmina de irrigação que diminui e a quantidade de nitrogênio que deve ser acrescentada para manter o mesmo nível de produção de um determinado cultivo agrícola. Essa taxa foi calculada pela relação do produto físico marginal das doses de nitrogênio (N) e o produto físico marginal das lâminas de irrigação (L), conforme a equação 3. Com essa equação foi calculada a quantidade de nitrogênio, em quilograma, que substitui a lâmina de irrigação bruta de um milímetro, sem que a produtividade agrícola da cana-de-açúcar seja alterada.

$$TMS_{L/N} = \frac{PMg_L}{PMg_N} \quad (3)$$

Em que: $TMS_{L/N}$ é a taxa marginal de substituição do fator lâmina de irrigação (L) pelo fator dose de nitrogênio (N); PMg_L é o produto físico marginal do fator lâmina de irrigação e PMg_N é o produto físico marginal do fator dose de nitrogênio.

4.6 Produto físico marginal das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio

O produto físico marginal (PMg) dos fatores de produção, lâminas de irrigação (L) e doses de nitrogênio (N), foi obtido pela primeira derivada da função de produção em relação ao fator considerado através da equação 4.

$$PMg(f) = \frac{\partial Y}{\partial f} \quad (4)$$

Em que: $PMg(f)$ é o produto físico marginal do fator considerado; $\frac{\partial Y}{\partial f}$ é a derivada da função Y (produtividade) em relação ao fator de produção considerado (f).

4.7 Combinação dos fatores de produção que resultam em custo mínimo

As combinações dos fatores lâmina de irrigação (L) e adubação nitrogenada (N) que determinam o custo mínimo para cada curva de isoproducto foram determinadas pelo método gráfico que identifica os pontos em que a inclinação da reta da taxa marginal de substituição de água por nitrogênio ($TMS_{L/N}$) se iguala à inclinação da reta da razão (C_L/C_N). Em que: C_L é o custo do milímetro aplicado e C_N é o custo do quilograma do nitrogênio.

O preço do milímetro de água aplicado foi calculado com base em dados reais da Usina Seresta, localizada no Município de Teotônio Vilela – AL, computados na safra 2009 / 2010 (SILVA, 2009) e o custo do nitrogênio foi obtido em empresas comerciais de Maceió-AL. Os valores do milímetro e do kg de nitrogênio aplicados no ciclo de cultivo da cana-planta, safra 2009/2010, estão nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para o cálculo do custo do milímetro de água aplicado na cultura da cana-de-açúcar pelo sistema de irrigação por gotejamento.

R\$ ha ⁻¹	Custos fixos			Custos Operacionais (R\$ mm ⁻¹)	Custo Total (R\$ mm ⁻¹)
	Vida útil (anos)	Lâmina anual (mm)	R\$ mm ⁻¹		
7.200,00	10,00	600,00	1,20	2,00	3,20

Fonte : Silva 2009.

Tabela 3. Preços dos fertilizantes utilizados na adubação nitrogenada da cana-de-açúcar.

Adubo	Reais por tonelada de adubo	Reais por kg de Nitrogênio
S. de amônio	450,00	2,50
Uréia	723,00	1,61
Média		2,05

Fonte: Usifétil (Consulta por telefone – Julho/2010).

Tomando-se como base os preços médios do kg de nitrogênio (R\$ 2,05) e do milímetro de água (R\$ 3,20) aplicados, a relação custo do milímetro de água (C_L) pelo custo do kg de nitrogênio (C_N) é 1,56.

4.8 Região de produção racional da cana-de-açúcar para lâminas de irrigação e adubação nitrogenada

A região de produção racional da cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação bruta total e doses de nitrogênio aplicadas por hectare, foi determinada pela marcação dos pontos nas linhas de fronteiras onde as inclinações das isoquantas são nulas ou infinitas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis Meteorológicas

A temperatura média do ar (T_m) na região de Rio Largo – AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2010, ficou entre 23,2 e 27,8°C, com média geral de 25,6°C. A precipitação pluvial (P) em 2009 foi 1.994 mm, desse total, 69,2 % (1.380 mm) choveu entre os meses de abril e agosto. Esse percentual ocorreu em apenas cinco meses do ano caracteriza a má distribuição das chuvas na região estudada. O terceiro decêndio de maio desse ano foi o mais chuvoso, com 246 mm (Figura 1). A chuva total nos 397 dias de duração do experimento foi 2.137 mm, porém mal distribuídos. No primeiro e terceiro decêndio de fevereiro e primeiro decêndio de março de 2009 aconteceram anomalias positivas nas médias pluviométricas da região com precipitações decendiais de 102, 105 e 154 mm, respectivamente. Nesses decêndios a normal climática é 24,9, 25,6 e 50,4 mm, na mesma ordem (SOUZA et al., 2004). A precipitação pluvial, média decendial, do Tabuleiro Costeiro de Maceió – AL, região em que está inserido o Município de Rio Largo, encontra-se na Tabela 4.

A evapotranspiração de referência (ET_o) total, entre o plantio e a suspensão da irrigação aos trinta dias que antecederam a primeira colheita (de janeiro de 2009 ao primeiro decêndio de janeiro de 2010) foi 1.498 mm, variando de 22,8 a 58,0 mm, no segundo decêndio de junho e terceiro decêndio de outubro de 2009, média de 2,3 a 5,3 mm dia⁻¹ e no ciclo de cultivo total a ET_o somou 1.707 mm (Figura 1). Souza et al. (2004) publicaram que na região dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas, costa leste do Nordeste brasileiro, a umidade relativa do ar média é 82 %, a temperatura do ar média das mínimas é 20,9 °C e a média das máximas é 29,8 °C. Essas variáveis climáticas são propícias para o cultivo da cana-de-açúcar. A precipitação pluvial anual média nessa região é 1.800 mm, sendo que 70 % desse total chove no período de abril a agosto (estação chuvosa) e por isso, entre os meses de outubro a fevereiro, há uma grande probabilidade de ocorrer deficiência hídrica.

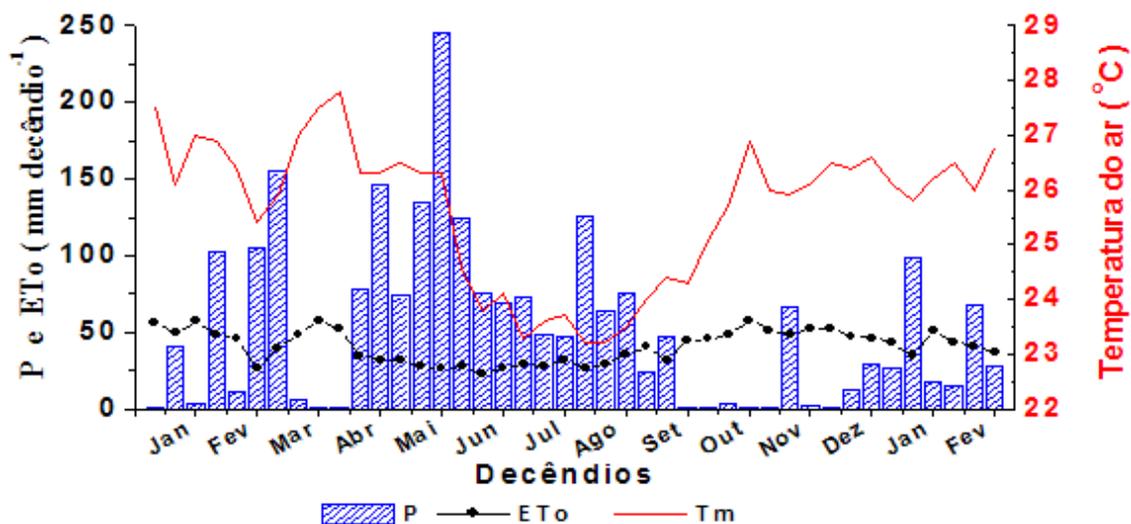


Figura 1. Precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ETo) e temperatura média do ar (Tm), médias decendiais, na região de Rio Largo – AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2010.

Tabela 4. Normal climatológica da precipitação pluvial, média decendial, no Tabuleiro Costeiro de Maceió – AL (período de 1972 a 1996).

DECÊNIO	MESES											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1º	18,9	24,9	50,4	64,3	97,3	106,8	104,3	69,1	42,8	37,8	20,4	18,7
2º	15,0	27,4	55,3	73,1	91,5	101,2	109,5	50,3	31,7	15,3	13,4	8,3
3º	20,2	25,6	47,1	113,6	67,2	93,2	76,1	64,4	33,4	17,1	21,5	16,2

Fonte: Souza et al. (2004)

5.2 Lâminas de Irrigação

As lâminas de irrigação bruta totais aplicadas na cana-de-açúcar, no experimento em análise, variaram de 157 a 873 mm, nos tratamentos irrigados com 25 e 150 % da ETo, respectivamente (Tabela 5). Nesses valores não foram contabilizadas as duas regas de 30 mm, aplicadas por aspersão de baixa pressão, imediatamente após o plantio, para a germinação e emergência da cultura. Entre o terceiro decêndio de março e primeiro decêndio de abril de 2009 foram aplicados 35, 51, 67, 79, 94 e 106 mm de irrigação bruta nos tratamentos de 25, 50, 75, 100, 125 e 150 % da ETo porque nesse período, como pode ser visto na Figura 1, só houve um pequeno evento de chuva (6,1 mm) e a ETo chegou a 158 mm. Nessa época a cultura estava na fase de crescimento inicial e o dossel vegetativo do plantio ainda não se encontrava totalmente fechado por isso o coeficiente da cultura ainda estava inferior a 1,0 e também ainda havia água armazenada no solo da chuva ocorrida no primeiro decêndio de março (154 mm). O restante das lâminas totais foi aplicado entre o terceiro decêndio de setembro de 2009 e o primeiro decêndio janeiro de 2010, nesse período ainda choveu 142 mm e a ETo total foi 537 mm. Machado et al. (2009) não observaram alterações na eficiência intrínseca do uso da água (EUA) por conta do déficit hídrico ocorrido na fase de desenvolvimento inicial, mas, verificaram redução da EUA nas fases de crescimento máximo e de acúmulo de sacarose.

Tabela 5. Lâminas de irrigação brutas totais aplicadas em função dos tratamentos.

Tratamento	Lâmina de irrigação
0,00 ETo =	0 mm
0,25 ETo =	157 mm
0,50 ETo =	312 mm
0,75 ETo =	447 mm
1,00 ETo =	585 mm
1,25 ETo =	741 mm
1,50 ETo =	873 mm

5.3 Função de produção agrícola da cana-de-açúcar com base em lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.

A análise conjunta ou integrada da resposta da cana-de-açúcar aos fatores de produção, irrigação e adubação nitrogenada, apresentada na forma de curvas de isoproducto ou isoquantas de produtividade agrícola da cultura, gerada pela equação 5 (Figura 2), teve os coeficientes R_{00} e R_{10} significativos a 1 % de probabilidade, o R_{11} significativo a 5 % de probabilidade e o R_{01} e R_{02} não foram significativos (Tabela 6).

$$Y(L, N) = 120,1941 + 0,06765 \cdot L - 0,000426L^2 + 0,10907 \cdot N - 0,00005 N^2 + 0,00016 \cdot L \cdot N \quad (5)$$

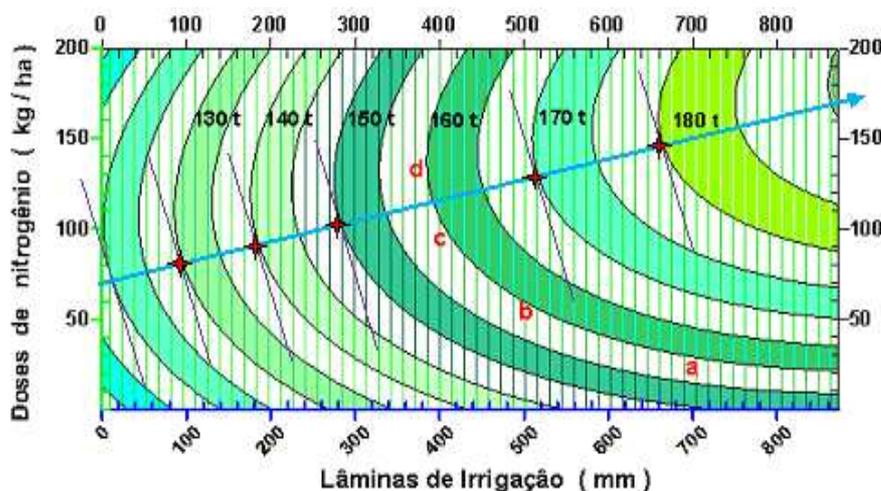


Figura 2. Isoquantas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar, ciclo de cultivo de cana-planta, na região de Rio Largo – AL, com detalhes da taxa de substituição de um milímetro de água por quilogramas de nitrogênio (letras a, b, c e d) e pontos nos quais a quantidade de água e nitrogênio resultam no custo de produção mínimo (+) para as respectivas produtividades agrícola.

Tabela 6. Valores dos coeficientes da equação de respostas da cana-de-açúcar a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, com os respectivos erros, valores calculados do teste (t) e probabilidade (P).

Coefficiente		Valor	Erro	T	Prob. >P
R ₀₀	Constante	120,1941	5,7351	20,958	< 0,0001
R ₀₁	Lâmina	0,06765	0,0845	0,8010	0,4246
R ₀₂	Lâmina ²	-0,00042	0,0004	-1,1497	0,2523
R ₁₀	Nitrogênio	0,10907	0,0206	5,2862	< 0,0001
R ₂₀	Nitrogênio ²	-0,000058	0,00007	2,2426	0,0266
R ₁₁	Lâm. * Nitro.	0,0000169	0,00002	-2,7654	0,0065

O teste F da equação foi significativo a 1% de probabilidade e o coeficiente de regressão (r^2) da referida equação com valor de 62%, indica que essa função de produção tem ajuste médio para a produtividade de cana em relação a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. O coeficiente R₀₂ que rege a parte final das curvas de resposta da produtividade de culturas agrícolas a fatores de produção, de equações do tipo polinomiais do segundo grau, normalmente, não representa bem a realidade porque à partir de um determinado ponto essa curva decresce rapidamente e isso não acontece na prática (GOMES & CONAGIN, 1987). Portanto, é comum esse coeficiente não ser significativo.

Para análise da água total consumida pela cultura no decorrer do ciclo de cultivo, em todos os tratamentos de irrigação, somou-se a lâmina de irrigação total aplicada mais a precipitação pluvial efetiva ocorrida do plantio até a colheita, calculada pelo método do balanço hídrico proposto por Thornthwaite & Mather (1955), que foi de 1.037 mm. Através dessas curvas é possível determinar as quantidades de água e nitrogênio a serem aplicadas para se conseguir qualquer rendimento agrícola pretendido, dentro do intervalo de produtividade agrícola observado nos resultados dessa pesquisa. Na Figura 2 encontram-se as isoquantas da produtividade agrícola, em tonelada de cana por hectare (TCH) do ciclo de cultivo de cana-planta irrigada por gotejamento na região de Rio Largo – AL, e, nessas isoquantas observa-se que a produtividade média de 160 Mg ha⁻¹ pode ser obtida com as combinações: 700 mm de irrigação e 30 kg ha⁻¹ de N; 540 mm de irrigação e 50 kg ha⁻¹ de N; 440 mm de irrigação e 80 kg ha⁻¹ de N ou com 390 mm de irrigação e 130 kg ha⁻¹ de N. Nesses casos, a água total consumida (irrigação mais chuva efetiva) seria 1.737, 1.577, 1.477 e 1.427 mm, respectivamente. Nesse caso a eficiência no uso da água (EUA), na forma de consumo, foi 10,85, 9,85, 9,23 e 8,92 mm t⁻¹ e para cada quilograma de nitrogênio aplicado por hectare foram produzidos 200, 100, 75 e 46 quilos de cana.

Ainda na Figura 2 é possível observar que: com uma irrigação total de 700 mm (irrigação mais chuva efetiva = 1.737 mm), nessa localidade, é possível produzir de 150 a 180 toneladas de cana por hectare, desde que se aplique de 0,0 (zero) a 125 quilogramas de nitrogênio por hectare. Singh et al. (2007), na Índia subtropical, no ciclo de produção de cana-planta observou que a produtividade máxima foi obtida quando a lâmina de irrigação total aplicada correspondeu a 100 % da evaporação do tanque classe “A” (EV.), sendo que a eficiência no uso da água (EUA) foi maior no tratamento com apenas 25 % da EV. (78 kg ha⁻¹ mm⁻¹ = 12,8 mm t⁻¹) e no tratamento com 125% da EV. a EUA baixou para 59 kg ha⁻¹ mm⁻¹ equivalente a 16,9 mm t⁻¹. Em relação ao uso do nitrogênio, Kwong & Deville (1994) não observaram diferenças significativas a 10 % de probabilidade em relação à forma de aplicação do nitrogênio (N), mas, a produtividade agrícola variou de 66,9 Mg ha⁻¹, no tratamento sem

N, a 142,6 Mg ha⁻¹ no tratamento fertirrigado por gotejamento com 120 kg de N por hectare. Wiedenfeld & Enciso (2008) observaram produções de 62 a 85 kg de cana por kg de N aplicado em cana-planta.

A produtividade agrícola da cana-de-açúcar também varia em função da variedade, do método de irrigação, dos recursos naturais (solo, umidade relativa do ar, chuva etc.) da região e principalmente com o ciclo de produção da cultura. Por isso, o correto é que sejam feitos experimentos para se obter as isoquantas de produtividade agrícola de cada ciclo de produção e para os diversos fatores de produção possíveis.

5.4 Taxa marginal de substituição e combinação de fatores que resultam no custo mínimo

A taxa marginal de substituição apresentada em quilogramas de nitrogênio aplicados por hectare a mais no cultivo da cana-de-açúcar, para substituir um milímetro de água reduzido, com a finalidade de manter a produtividade de 160 toneladas de cana por hectare no ciclo de cana-planta irrigada por gotejamento, na região de Rio Largo – AL, nos pontos “a”, “b”, “c” e “d” da Figura 2 são em média 0,49, 1,71, 28,3 e infinita (∞), respectivamente. Esses valores indicam que a taxa marginal de substituição não é fixa e aumenta com a redução da quantidade de água aplicada até um ponto em que esse valor é nulo ou infinito. O ponto de cada isoquanta em que a taxa marginal de substituição é nula ou infinita delimita a região de produção racional. Os valores da TMa_(L/N) para se obter as produtividades de 130, 140, 150, 160 e 170 t ha⁻¹, em função das doses de nitrogênio e lâminas de irrigação bruta total aplicadas na cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, no ciclo de cultivo de cana-planta, na região de Rio Largo – AL, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7. Valores da taxa marginal de substituição (TMs) de lâminas de irrigação bruta (L) por doses de nitrogênio (N) aplicadas na cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nas isoquantas de 130, 140, 150, 160 e 170 t ha⁻¹, no ciclo de cultivo de cana-planta, na região de Rio Largo – AL, na safra 2009/2010.

Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	130 (t ha ⁻¹)		140 (t ha ⁻¹)		150 (t ha ⁻¹)		160 (t ha ⁻¹)		170 (t ha ⁻¹)	
	L (mm)	(L/N)								
25	200	1,48	320	1,12	480	0,79	760	0,36	--	--
50	140	2,38	250	2,10	380	1,51	550	1,09	--	--
75	100	6,36	200	5,09	320	3,41	450	2,78	650	1,49
100	85	∞	185	58,74	285	9,56	400	35,37	560	17,20
125	--	--	175	∞	175	∞	390	∞	520	46,70
150	--	--	--	--	--	--	--	--	510	∞

∞ = infinita

O ponto em que a reta da razão do custo da lâmina de irrigação (C_L) dividido pelo do custo da adubação nitrogenada (C_N) tangencia a isoquanta de produtividade agrícola da cultura determina a combinação das quantidades de água e nitrogênio que resultam nos menores custos de produção para as respectivas produtividades agrícolas esperadas. Esses pontos (\star) também se encontram na Figura 2 e são ligados por uma reta que possibilita a estimativa das quantidades de água e nitrogênio a serem aplicadas em qualquer isoquanta de produtividade agrícola. Nessa pesquisa a razão C_L / C_N foi igual a 1,56 e para produzir 130 t

ha⁻¹ a melhor combinação é 95 mm de água e 79 Kg de N, para produzir 160 e 180 t ha⁻¹ o ideal é utilizar 390 mm de água e 112 Kg de N e 660 mm de água e 145 Kg de N, na mesma ordem. Vale et al. (2009), com o preço da tonelada de cana na esteira da usina igual a R\$ 26,69 reais e a tonelada de uréia valendo R\$ 1.719,47 reais, calcularam que a dose nitrogênio de maior retorno econômico foi 50 kg de N por hectare e Oto (2007), com a cana valendo R\$ 35,60 e a uréia R\$ 1.278,73 por tonelada, verificou que 75 kg de N ha⁻¹ era a dose economicamente mais viável para a cultura da cana-de-açúcar. Isso indica que a lâmina de irrigação e dose de nitrogênio economicamente mais viável depende do preço da cana na esteira da usina e do insumo analisado que nesse trabalho são água de irrigação e nitrogênio.

5.5 Região de produção racional da cana-de-açúcar com base na lâmina de irrigação e adubação nitrogenada.

Os fatores de produção que geram as curvas de isoprodutos ou isoquantas são considerados insubstituíveis nos pontos em que a inclinação dessas curvas é nula, igual a 0,0 (zero), ou infinita e a área limitada pelas retas que ligam esses pontos é denominada de região de produção racional. A concepção de região de produção racional é a de que dentro da mesma qualquer combinação de quantidades dos fatores de produção é economicamente viável e fora dela há desperdício de insumos. Contudo, para otimizar o lucro líquido do empreendimento não se deve deixar de usar a relação entre os insumos que resultam nos menores custos de produção.

A região de produção racional da cana-de-açúcar, no ciclo de cultivo de cana-planta, na região de Rio Largo – AL (Figura 3) é limitada pelas retas que iniciam na dose de 79 kg de nitrogênio por hectare e na lâmina de 939 mm e se uniriam no centro da isoquanta da produtividade máxima estimada, que seriam 214 toneladas de cana por hectare, a qual seria obtida com 375 kg de nitrogênio por hectare e 1.487 mm de irrigação. Mas, no experimento em discussão a lâmina de irrigação bruta total máxima utilizada foi 837 mm e por isso, a reta que limita a quantidade de água máxima da região de produção racional não aparece na respectiva figura. O fato da reta que limita a quantidade de água da região de produção racional iniciar em 939 mm de irrigação indica que a cana-de-açúcar responde a lâminas de irrigação superiores à lâmina máxima utilizada nessa pesquisa. Nessa figura ainda é possível vê que, com base nas quantidades de insumos utilizados no experimento em discussão, a produtividade agrícola máxima observada foi 180 Mg ha⁻¹ e que pode ser obtida com 700 mm de irrigação e 125 kg de N por hectare. A reta que limita a dose de N ha⁻¹ racionalmente recomendada tem coeficiente positivo e maior que 1,0 (um), indicando que a mesma aumenta em relação direta com o aumento da lâmina de irrigação.

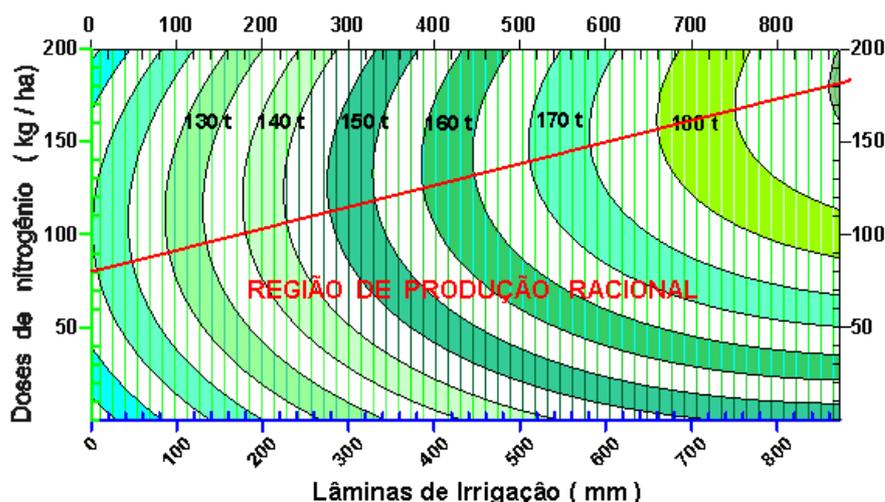


Figura 3. Região de produção racional da cultura da cana-de-açúcar, no ciclo de produção de cana-planta na região de Rio Largo – AL, na safra 2009/2010, em função de lâminas de irrigação e doses nitrogênio.

6 CONCLUSÕES

A precipitação pluviual, na região de Rio Largo – AL, é superior a à evapotranspiração de referência. Mas devido a maior concentração das chuvas no período de abril a agosto, a irrigação por gotejamento da cana-de-açúcar no período de setembro a março é economicamente viável e o menor custo para produzir 160 Mg ha⁻¹ de colmos é obtido com 390 mm de irrigação e 112 kg de nitrogênio por hectare.

A função de produção do tipo polinomial do segundo grau dos fatores de produção integrados (lâminas de irrigação e doses de nitrogênio) gera isoquantas que se ajustam bem com a produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Nessas isoquantas, a taxa marginal de substituição da água de irrigação por nitrogênio não é fixa, aumenta à medida que diminui a lâmina de irrigação até um ponto no qual esse valor passa a ser nulo ou infinito e a resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, com base na reta que limita a região de produção racional, aumenta em relação direta com a disponibilidade hídrica do solo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO.1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

BASANTA, M. V.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; OLIVEIRA, J. C. M.; TRIVELIN, P. C. O.; TIMM, L. C.; TOMINAGA, T. T.; CORRECHEL, V. CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F. ; MACEDO, J. R. de. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 235 – 248, 2003.

CARVALHO, O.M: **Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio-largo, cultivados com cana-de-açúcar**. 2003. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2003

COELHO, E.F.; COSTA, E.L.; LEDO, C.A.S.; SILVA, S.O.; Produtividade e Eficiência do Uso de Água das Bananeiras Prata Anã e Grand Naine Sob Irrigação no Terceiro Ciclo no Norte de Minas Gerais. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 4, p. 460-468, 2006.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento 2011. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2011/2012**. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conabweb/safra.pdf>. Acessado em 12/06/2011.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro – RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Embrapa solos produção e informação. Rio de Janeiro – RJ, 1999, 412p.

GOMES, F. P.; CONAGIN, A. **Experimentos de adubação: planejamento e análise estatística**. Londrina – PR. Departamento de matemática aplicada – UEL, 1987, 97p.

INMAN-BAMBER, N.G., SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p. 185-202, 2005.

KWONG, K. F. Ng. K.; DEVILLE, J. Application of ¹⁵N-labelled urea to sugarcane through a drip-irrigation system in Mauritius. **Fertilizer Research**. Netherlands, v. 39. P. 223 – 228, 1994

LECLER, N. L.; JUMMAN, A. Irrigated sugarcane production functions. **South African Sugar Technologists' Association**, Mount Edgecomb, v. 82, p. 604 – 607, 2009

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. de A. Respostas biométrica e fisiológica ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575 – 1582, 2009.

MAEDA, A. S.; BUZETTI, S.; BOLONHEZI, A. C. Adubação nitrogenada e potássica na qualidade e produtividade da cana-soca. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB**, Piracicaba, v. 27 n. 4, p. 40 – 45, 2009.

MOROIZUMI, T.; HAMADA, H.; SUKCHAN, S.; IKEMOTO, M. Soil water content and water balance in rainfed fields in northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 160 – 166, 2009.

OTO, R. **Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada**. 2007. 119f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SILVA, A. B. P. Avaliações do Projeto de Gotejamento em Cana-de-açúcar da Usina Seresta. In: XXVI SIMPÓSIO DA AGROINDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS, 2009, Maceió-AL. **Anais da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB – Regional Leste)**, Maceió, (CD-ROM), 2009.

SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato do Açúcar e do Alcool do Estado de Alagoas) disponível em <http://www.sindaçucar.al.com.br/prodagricmedia.htm>, acessado em 03 de setembro de 2011.

SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum spp.* Hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, p. 95 – 100, 2007.

SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação a água para três variedades, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 28 - 42, 1999.

SOUZA, J.L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R.F.F. TEODORO, I.; SANTOS, E.A.; SILVA, J.L.; SILVA, P.R.T.; CARDIM, A.H.; AMORIN, E.C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 131-141, 2004.

TEODORO, I.; SOUZA, J. L. de; SILVA, C. B.; ABREU, M. L. de; COSTA, L. S. ARAÚJO, S. I. de A.; RAMOS, R. P. Balanço hídrico real de um cultivo de cana-de-açúcar em regime de sequeiro na região de RIO LARGO - AL. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 17., 2007. Mossoró. **Anais do XVII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**. CDROM, Brasília : Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem – ABID, 2007.

TEODORO, I.; SOUZA, J. L.; BARBOSA, G.V.; MOURA FILHO, G.; DANTAS NETO, J.; ABREU, M. L. de. Crescimento e produtividade da cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB**, Piracicaba, v. 27, n. 4, p. 46 – 49, 2009

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publication in climatology, New Jersey: Drexel Inst. of technology, 1955, 104p.

VALE, D. W. do; PRADO, R. de M.; PANCELLI, M. A. Análise econômica da adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB**, Piracicaba, v. 28 n. 2, p. 32 – 34, 2009.

WATANABE, K.; YAMAMOT, T.; YAMADA, T.; SAKURATANI, T.; NAWATA, E.; NOICHANA, C.; SRIBUTTA, A.; HIGUCHI, H. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content and crop coefficients in sugarcane, cassava and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 67, p. 133 – 143, 2004.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 3, p. 655 – 671, 2008.