



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



**RESPOSTAS TÉCNICO-ECONÔMICAS DA CANA-DE-
AÇÚCAR A NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO
NITROGENADA**

IÊDO TEODORO

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Novembro - 2011

IÊDO TEODORO

**RESPOSTAS TÉCNICO-ECONÔMICAS DA CANA-DE-
AÇÚCAR A NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO
NITROGENADA**

ORIENTADORES

Prof. Dr. José Dantas Neto

e

Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem. Linha de pesquisa: Manejo de irrigação.

Campina Grande – Paraíba.
2011.



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

T314r Teodoro, Iêdo.
Respostas técnico-econômicas da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e adubação nitrogenada / Iêdo Teodoro. - Campina Grande, 2011.
82 f.: il. col.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. José Dantas Neto, Prof. Dr. José Leonaldo de Souza.

Referências.

1. Irrigação por Gotejamento. 2. Produtividade Agrícola. 3. Função de Produção. I.Título.

CDU 631.674.6(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

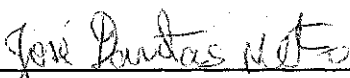


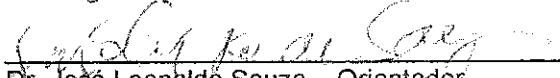
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

IÉDO TEODORO

**RESPOSTAS TÉCNICO-ECONOMICA DA CANA-DE-ACÚCAR A NÍVEIS DE
IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA**


BANCA EXAMINADORA


Dr. José Dantas Neto – Orientador


Dr. José Leonaldo Souza – Orientador


Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo – Examinador


Dr. Hugo Orlando Cavallô Guerra - Examinador


Dr. José Antonio Frizzone – Examinador


Dr. Carlos Henrique de A. Farias - Examinador

PARECER

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

NOVEMBRO DE 2011

A meus pais

José Frederico (*in memoriam*)

e

Maria de Oliveira (*in memoriam*)

A minha esposa

Luizete de Fátima Araújo de Oliveira Tombeiro

A meus filhos

Andréto e João Pereira de Alencar e Juliana

A meus irmãos

Neto, Henrique e José Roberto - Sr. Frederico

Dedico !

Aos meus orientadores:

Prof. Dr. José Carlos de Sá

e

Prof. Dr. José Carlos de Sá

Ofereço !

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de turma: **Evami, Rosalve, Roger, Josinaldo, Silvana, Joelma, Ana Cristina, José Carlos, Lêda, Keliane, Diva, Neto, Sebastião, Edvaldo Elói, Jerônimo e René** agradeço pelo companheirismo e pela boa convivência que tivemos durante o curso.

Aos professores do departamento de Meteorologia: **José Dantas, Hugo, Carlos Azevedo, Vera, Soahd, Máx,** agradeço pelos ensinamentos, pelos incentivos e apoio, principalmente durante a escrita desta dissertação.

Aos membros da banca avaliadora: **Prof. Dr. José Dantas Neto, Prof. Dr. José Leonaldo de Souza, Prof. Dr. José Antônio Frizzone, Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, Prof. Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra e ao Dr. Eng^o. Agrônomo Carlos Henrique Azevedo Farias,** agradeço pela paciência e boa vontade em contribuir com as correções e sugestões que serviram não só para melhorar meus textos e interpretações de dados mas também como aprendizado para o resto da minha vida profissional.

Aos bolsistas de iniciação científica (**Lucas Almeida de Holanda, Givaldo Dantas Sampaio Neto, Adolpho Emanuel Quintela da Rocha, Adriano Barboza Moura, Anderson Ravanny de Andrade Gomes, Arthur Vinicius Vieira e Silva Maia, Fellipe José Alexandre de Oliveira, Marlon da Silva, Ivanise Tavares Costa, Klebson Santos Brito, Leopoldo de Almeida Sá, Marcos Antonio Liodorio dos Santos, Marlon da Silva, Maurício Bruno Prado da Silva, Pedro Luã Vieira de Souza Sarmento, Rodolpho Artur de Souza Lima, Samuel Silva**) e ao Doutorando **Ricardo Araújo Ferreira,** agradeço pela ajuda na implantação, condução e colheita do experimento.

À equipe técnica do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da Universidade Federal de Alagoas – UFAL (Professores: **Geraldo Veríssimo de Sousa Barbosa e Marcelo de Menezes Cruz, Eng^{os}. Agrônômos Antonio José Rosário Sousa, Antonio Jorge de Araújo Viveiros, Antônio Maria Cardoso Rocha, Carlos Alberto Guedes Ribeiro, João Messias dos Santos, Paulo Pedro da Silva, José Lopes Cavalcante Ferreira e Francisco Sampaio Filho, Técnicos Agrícola Adeilson Mascarenhas de Oliveira Silva, Antônio Carlos Alves de Amorim, Edimundo Leobino da Silva, Edinaldo Martins da Silva, Gilmar Odilon da Silva, José Cícero Pereira, José Roberto Pedrosa Santiago e José Vinício Correa da Silva e Técnicos administrativos: **Petrônio Walquírio de Barros, Eduardo Jorge Gomes de Almeida e Sally Rose Barros Vieira, Eliene Lima****

dos Santos, Maura Cristina da Silva e Edileuza Cupertino da Silva agradeço pelo apoio técnico e financiamento de parte do experimento.

Ao diretor do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da UFAL, **Prof. Dr. Paulo Vanderlei Ferreira** e ao vice diretor **Gaus Andrade**, agradeço pela prestabilidade, não só durante esse experimento, mas sempre que deles precisei.

À Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, nas pessoas do **Prof. Dr. Josealdo Tonholo** e da **Téc. Administrativa Marineide de Almeida Coelho**, agradeço pelo apoio e ajuda de custo a mim concedida.

Ao Professor Dr. **Gilson Moura Filho**, agradeço pelas dicas e ajuda na análise estatística.

Aos tratoristas **Sr. Agnézio** e **Sr. Edvaldo** e ao motorista **Sr. Eleno**, agradeço pela contribuição imprescindível para a realização deste trabalho.

À empresa **Netafim**, agradeço pela doação da estrutura básica do sistema de irrigação.

À **Usina Santa Clotilde**, em especial aos **Eng^{os}. Agrônomos Dr. José Carlo Tavares de Andrade** e **Dr. José Roberto** e ao **Químico Dr. Davi**, agradeço pelo apoio técnico e execução das análises química do caldo da cana.

E por fim a todos que, de forma direta ou indireta, dedicam seus recursos e/ou trabalhos ao agronegócio brasileiro: eu agradeço e homenageio.

SUMÁRIO

	Pg.
SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Geral	3
2.2. Específicos	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Cana-de-açúcar	4
3.2. Balanço Hídrico	5
3.3. Necessidades hídricas e variáveis meteorológicas que influenciam a produtividade da cana-de-açúcar	6
3.3.1 Irrigação	7
Irrigação de salvação	8
Irrigação complementar	8
Irrigação Plena	9
3.3.2 Eficiência no uso da água	11
3.3.3 Radiação solar, temperatura do ar	13
3.4. Necessidades nutricionais	14
3.5. Crescimento da cana-de-açúcar	15
3.6. Produtividade agrícola e rendimento industrial	16
3.7. Qualidade da matéria prima (cana-de-açúcar)	17
3.8. Função de resposta ou função de produção	18
3.9. Produto físico marginal de fatores de produção	19
3.10. Taxa marginal de substituição	19

3.11. Região de produção racional	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1. Localização e caracterização da área experimental	21
4.2. Tratamentos e delineamento experimental	23
4.3. Plantio e manejo da cultura	25
4.4. Variáveis agrometeorológicas	27
4.5. Variáveis de produção	28
4.6. Função de produção da cana-de-açúcar em relação aos fatores irrigação e adubação nitrogenada	29
4.7. Análises física e econômica da produção	29
4.8. Taxa de crescimento de produção da cultura	31
4.9. Eficiência no uso da água (EUA)	31
4.10. Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada	32
4.11. Função de respostas para a análise conjunta dos fatores de produção água de irrigação e adubação nitrogenada	32
4.12. Produto físico marginal das lâminas de irrigação e doses de Nitrogênio	32
4.13. Taxa marginal de substituição de água por nitrogênio	33
4.14. Combinação de fatores para obtenção de custo mínimo	33
4.15. Região de produção racional	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Variáveis Meteorológicas	34
5.2. Balanço Hídrico	36
5.3. Lâminas de Irrigação	38
5.4. Produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação	40
5.5. Taxa de crescimento da produção da cana-de-açúcar	45
5.6. Eficiência no uso da água (EUA)	46
5.7. Produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio	50
5.8. Qualidade da matéria Prima	56
5.9. Rendimento Agroindustrial	60

5.10. Função de Produção	64
5.11. Taxa marginal de substituição e combinação de fatores que resultam no custo mínimo	67
5.12. Região de produção racional	70
6. CONCLUSÕES	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1 Localização do Município de Rio Largo, no Estado de Alagoas	21
Figura 2 Curvas das quantidades de água aplicadas na cultura da cana-de-açúcar durante a fase de máxima demanda hídrica, em função dos percentuais da ETo.	23
Figura 3 Croqui do experimento.	24
Figura 4 Esquema da distribuição espacial das fitas ou tubos gotejadores e espaçamento entre as linhas de plantas, utilizados no experimento.	25
Figura 5 Estação automática de aquisição de dados Micrologger, CR10X, instalada a 400 metros do experimento.	27
Figura 6 Temperaturas do ar, mínima (T_n), média (T_m) e máxima (T_x) diárias e umidade relativa do ar média diária (UR_m), na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011.	34
Figura 7 Precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (E_{To}) médias decendiais, na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011.	35
Figura 8 Balanço hídrico decendial da cultura da cana-de-açúcar, com ênfase para o excesso e a deficiência hídrica, em dois ciclos de produção, na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011	37
Figura 9 Precipitação pluvial e lâminas de irrigação aplicadas em função das frações da evapotranspiração de referência (E_{To}), durante os ciclos de cultivo da cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL.	40
Figura 10 Produtividade agrícola da cana-de-açúcar, em toneladas de cana por hectare, em função de lâminas de irrigação (curva de regressão raiz quadrada), em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011..	43
Figura 11. Produtividade agrícola física máxima e de máxima eficiência econômica em função de lâminas de irrigação em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	44

Figura 12	Taxa de crescimento total da produção da cana-de-açúcar, em toneladas de cana por mês ($t\text{ mês}^{-1}$) da cana-planta (planta) e da cana-soca (soca) e produtividade agrícola da cana-planta ($t\text{ ha}^{-1}\text{ planta}$) e cana-soca ($t\text{ ha}^{-1}\text{ soca}$), em função de lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	46
Figura 13	Eficiência do uso da água de irrigação (EUA) na cana-de-açúcar, na forma de consumo, em milímetros de água consumida por tonelada de cana produzida (mm t^{-1}), no ciclo de cana-planta (Planta) e cana-soca (Soca) e produtividade agrícola da cana-planta ($t\text{ ha}^{-1}\text{ planta}$) e cana-soca ($t\text{ ha}^{-1}\text{ soca}$), em função de lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	47
Figura 14	Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação nos diferentes níveis de adubação nitrogenada (curvas de regressão em raiz quadrada, desdobramento), em cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	49
Figura 15	Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função de doses de nitrogênio (curva de regressão raiz quadrada), em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	51
Figura 16	Produtividade agrícola física máxima e de máxima eficiência econômica, em função de doses de nitrogênio e dos valores do ATR e do kg de nitrogênio, em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	52
Figura 17	Relação entre a quantidade de cana produzida e a quantidade de nitrogênio aplicado por hectare (kg cana kg N^{-1}), índice “a” (cana-planta) e índice “b” (cana-soca). E a quantidade nitrogênio aplicado por hectare pela produtividade agrícola ($\text{kg de N ha}^{-1} / (t\text{ ha}^{-1})$), índice “c” (cana-planta) e índice “d” (cana-soca), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	53
Figura 18	Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função de doses de nitrogênio nas diferentes lâminas de irrigação (curvas de regressão em raiz quadrada, desdobramento), em cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	55

Figura 19	Qualidade da cana-de-açúcar, expressa em quilogramas de açúcares totais recuperáveis (ATR) por tonelada de cana, em função de lâminas de irrigação em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	58
Figura 20	Qualidade da cana-de-açúcar, expressa em quilogramas de açúcares totais recuperáveis (ATR) por tonelada de cana, em função de doses de nitrogênio em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	60
Figura 21	Rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar, expresso em tonelada de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$), estimada e observada, em função de lâminas de irrigação, em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	62
Figura 22	Rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar, expresso em tonelada de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$) estimado e observado, em função de doses de nitrogênio, em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	63
Figura 23	Isoquantas de produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, no ciclo de produção da cana-planta, na região de Rio Largo, AL, na safra 2009/2010.	64
Figura 24	Isoquantas de produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, no ciclo de produção da cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.	66
Figura 25	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 quilograma de nitrogênio (letras a, b, c e d) e quantidade de água e nitrogênio que resultam no custo de produção mínimo (\dagger) para as respectivas produtividades agrícola.	68
Figura 26	Isoquantas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar, ciclo de cultivo de cana-soca, na região de Rio Largo, AL, com detalhes da taxa de substituição de um milímetro de água por quilograma de nitrogênio (letras a, b, c, e d) e quantidade de água e nitrogênio que resultam no custo de produção mínimo (\dagger) para as respectivas produtividades agrícolas.	70

Figura 27	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 de nitrogênio.	71
Figura 28	Região de produção racional da cultura da cana-de-açúcar no ciclo de produção de cana-soca na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.	72

LISTA DE TABELAS

	Pg.
Tabela 1 Fase fenológica ou de desenvolvimento, tempo médio de duração das fases e coeficiente de cultura (Kc) da cultura da cana-de-açúcar	11
Tabela 2 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.	22
Tabela 3 Resultados da análise física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m	22
Tabela 4 Resultados da análise química da água utilizada na irrigação	26
Tabela 5. Parâmetros utilizados para o cálculo do custo do milímetro de água aplicado na cultura da cana-de-açúcar pelo sistema de irrigação por gotejamento.	30
Tabela 6 Preços dos adubos utilizados na adubação nitrogenada da cana-de-açúcar.	30
Tabela 7 Preço dos açúcares totais recuperáveis (ATR), no decorrer da safra, utilizados para calcular o preço da tonelada de cana-de-açúcar entregue na indústria.	31
Tabela 8 Normal climatológica da precipitação pluvial, média decendial, no Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL (período de 1972 a 1996).	36
Tabela 9 Precipitação pluvial total e efetiva, lâminas de irrigação brutas totais aplicadas em função dos respectivos tratamentos, a água total (precipitação pluvial efetiva mais irrigação: $P_{\text{efet}} + \text{Irrig.}$) e a produtividade agrícola da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) durante os ciclos de cultivo da cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL.	39
Tabela 10 Resumo da análise de variância da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, em cana-planta e cana-soca nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	41
Tabela 11 Resumo da análise de variância da qualidade da cana-de-açúcar, em função da quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) da cana-planta e cana-soca, nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	57
Tabela 12 Resumo da análise de variância do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar, em tonelada de açúcar por hectare (TAH) da cana-planta e cana-soca nas safras 2009/2010 e 2010/2011.	61

Tabela 13	Valores dos coeficientes da equação de respostas da cana-planta a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, com os respectivos erros, valores calculados do teste (T) e probabilidade (P).	65
Tabela 14	Valores dos coeficientes da equação de respostas da cana-soca às lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, com os respectivos erros, valores calculados do teste (T) e probabilidade (P).	67
Tabela 15	Valores da taxa marginal de substituição (TMa) 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.	68
Tabela 16	Valores da taxa marginal de substituição (TMa) de lâminas de irrigação bruta (L) por doses de nitrogênio (N) aplicadas na cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nas isoquantas, 120, 125, 130, 135 e 140, no ciclo de cultivo de cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.	70

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AL – Alagoas (Estado brasileiro);
Al – Alumínio;
ART - Açúcares redutores totais;
ATR - Açúcares totais recuperáveis;
ARC - valor dos açúcares recuperáveis da cana;
BE – Método do balanço de energia;
BERB – Método do balanço de energia pela razão de Bowen;
CECA - Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias;
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento;
CONSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool
COPERSUCAR - Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool;
cm dia⁻¹ – Centímetro por dia;
C R S - *commercially recoverable sucrose*;
CV – Coeficiente de variação;
Ds - Densidade do solo (Mg m⁻³).
Dag - Densidade da água (1,00 Mg m⁻³)
DAP - Dias após o plantio
E – Evaporação (mm dia⁻¹);
e - pressão do vapor d'água do ar (kpa);
e_s - pressão de saturação do vapor d'água do ar (kpa);
EUA - Eficiência no uso da água pelas plantas
ET – Evapotranspiração (mm dia⁻¹);
ETc – Evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹);
ETo – Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);
ETp – Evapotranspiração potencial (mm dia⁻¹);
ETr – Evapotranspiração real (mm dia⁻¹);
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations;
G – Fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);
GL - Graus de liberdade;
g dia⁻¹ – Gramas por dia;
g – Grama;
ha – Hectare (10.000 m²);
I - Irrigação;
IAF – Índice de área foliar;
K_c – Coeficiente de cultura;
kg m⁻³ – Quilograma por metro cúbico;
Kp – Coeficiente do tanque (m);
L – Lâmina de irrigação (mm);
Mg ML⁻¹ - Mega grama (tonelada) de matéria verde ou seca por mega litro de água;
MJ m⁻² – Megajoule por metro quadrado;
NM – *New México* (Estado Americano)
mm – Milímetro;
mm s⁻¹ – Milímetro por segundo;
mm t⁻¹ - Milímetro de água por tonelada de produto;
MS – Matéria seca (g);
N – Nitrogênio;
P - Precipitação pluvial;

Pef - Precipitação pluvial efetiva;
 PM – Método de evapotranspiração de referência de Penman-Monteith com R_n medido padrão da FAO;
 PMg - Produto físico marginal ;
 PMg L - Produto físico marginal da água;
 PMg N – Produto físico marginal do nitrogênio;
 RAS – Relação de adsorção de sódio;
 R_g - Radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 R_r - Radiação refletida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 R_s - Radiação da superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 R_a - Radiação da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 R_o - Radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 r - Albedo da superfície;
 r^2 – Coeficiente de correlação (%);
 R_n - Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 SINDAÇUCAR - Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool;
 SP – São Paulo (Estado brasileiro);
 STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil;
 t – Toneladas;
 $t \text{ mês}^{-1}$ – Tonelada de cana por mês;
 T – Temperatura média do ar;
 TAH – Tonelada de açúcar por hectare;
 TCH - Tonelada de cana por hectare;
 TPH - Tonelada de pol por hectare;
 $t \text{ ha}^{-1}$ – Tonelada por hectare;
 $\text{TMS}_{L/N}$ - Taxa marginal de substituição do fator lâmina de irrigação pelo fator quilograma de nitrogênio;
 $T_{\text{máx}}$ – Temperatura máxima do ar;
 $T_{\text{mín}}$ – Temperatura mínima do ar;
 U_2 – Velocidade do vento medido a dois metro de altura (m s^{-1} ou km hora^{-1});
 U_z - Velocidade do vento na altura z (m s^{-1} ou km hora^{-1});
 UFAL - Universidade Federal de Alagoas;
 UR – Umidade relativa do ar (%);
 USA – United Stat American;
 Y_c - Produtividade da cultura;
 Δ - Inclinação da curva da pressão de vapor saturado versus temperatura ($\text{kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
 δ - Declinação solar (graus);
 ϕ - Latitude local (graus);
 σ - constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ou $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia K}^{-4}$);
 γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
 λ - Calor latente de evaporação (MJ kg^{-1});
 λE – Fluxo de calor latente;
 $^\circ\text{C}$ – Graus Célcus;
 θ - Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
 ρ_a - Densidade do ar ($1,29 \text{ kg m}^{-3}$);
 z – Altitude local (m);
 c_p - Calor específico do ar ($1,013 \times 10^3 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$);

RESPOSTAS TÉCNICO-ECONÔMICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR A NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA

RESUMO

O conhecimento das relações água-solo-planta-atmosfera e as respostas da cana-de-açúcar à irrigação e adubação nitrogenada são fundamentais para melhorar os rendimentos agroindustriais dessa cultura agrícola no Nordeste brasileiro. Por isso, com o objetivo de avaliar as respostas da cana-de-açúcar a lâminas de irrigação (L) e doses de nitrogênio (N) foi instalado um experimento na região de Rio Largo - AL. As lâminas de irrigação foram 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 as doses de N foram: zero, 50, 100, 150 e 200 kg N por hectare. A temperatura do ar, durante a pesquisa, variou de 21,3 a 29,2°C, média de 25,2°C. No ciclo de cana-planta choveu 2.137 mm e a evapotranspiração da cultura (ET_c) foi 1.642 mm, na cana-soca choveu 1.976 mm e a ET_c somou 1.628 mm. Mesmo assim, houve déficit hídrico de 606 e 461 mm e excesso hídrico de 1.100 e 809 mm nos primeiro e segundo ciclos de produção, respectivamente. A produtividade agrícola média da cana-planta foi 160 t ha⁻¹ e da cana-soca 130 t ha⁻¹. As lâminas de máxima eficiência econômica (com o kg de açúcares totais recuperáveis (ATR) valendo R\$ 0,3985 e o milímetro de água aplicado R\$ 3,20) foram 610 mm, em cana-planta, e 213 mm em cana-soca, enquanto as doses de N economicamente mais viáveis foram 126 e 100 kg de N ha⁻¹, no ciclo cana-planta e na cana-soca, respectivamente. As quantidades médias de ATR por tonelada de cana foram 145,7 em cana-planta e 147,8 em cana-soca; o rendimento industrial, em tonelada de açúcar por hectare em cana-planta variou de 17,1 a 26,0 t ha⁻¹, nas lâminas de irrigação e de 21,7 a 23,7 t ha⁻¹ nas doses de nitrogênio; já em cana-soca foram de 16,3 a 20,8 t ha⁻¹ em relação a L e de 18,5 a 19,8 t ha⁻¹ em relação a N. A taxa de crescimento da produção variou de 9,3 a 14,4 toneladas de cana por mês (t mês⁻¹) e de 9,3 a 11,9 t mês⁻¹, nos primeiro e segundo ciclos de cultivo, respectivamente. A quantidade de N extraída por tonelada de cana produzida foi de 0,32 a 1,22 kg, em cana-planta e de 0,39 a 1,51 kg em cana-soca. Em relação à quantidade de cana produzida por kg de N aplicado no primeiro ciclo de produção, variou de 58,0 a 122,0 kg de cana e no segundo ciclo foi de 35,5 a 82,0 kg de cana. A cana-de-açúcar irrigada, nos dois ciclos de cultivo, com 150 % da ET_o produziu, em média, 51,0 t ha⁻¹ a mais do que a cana cultivada sem irrigação e em relação à adubação nitrogenada, o tratamento adubado com 50 kg de N produziu, em média, 8,5 t ha⁻¹ a mais do que o adubado sem nitrogênio. As lâminas de irrigação equivalentes a 190% e 165 % da ET_o e as doses de N de 167 e 157 kg de N ha⁻¹ foram as que maximizaram a produtividade agrícola, no primeiro e no segundo ciclo de cultivo, respectivamente. E, a lâmina de irrigação e a dose de N de maior eficiência econômica em cana-planta foram 610 mm 126 kg de N ha⁻¹ e em cana-soca, de 213 mm e 100 kg de N ha⁻¹. O rendimento agroindustrial final por hectare é mais dependente da produtividade agrícola do que da quantidade de ATR. As curvas de regressão do tipo raiz quadra e a superfície de resposta por polinômio de segundo grau, representaram bem a relação da produtividade agrícola da cana-de-açúcar com lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. A taxa marginal de substituição de água por nitrogênio e as combinações desses fatores que resultam no menor custo de produção variaram de acordo com a lâmina de irrigação, a dose de nitrogênio e a produtividade agrícola almejada. A região de produção racional da cana-de-açúcar em relação a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio é bastante ampla e disponibiliza uma grande faixa de opções de combinação desses fatores para os produtores da referida cultura agrícola.

Palavras chaves: gotejamento, produtividade agrícola, função de produção.

TECHNICAL AND ECONOMIC RESPONSES OF SUGARCANE TO IRRIGATION AND NITROGEN LEVELS

ABSTRACT

The Knowledge of the water-soil-plant-atmosphere relations and the responses of sugarcane crop to irrigation and nitrogen levels are essential to improve the yields of this crop in the Northeast region of Brazil. Therefore, in order to evaluate the responses of sugarcane to irrigation level (L) and rate of nitrogen manuring (N), an experiment was conducted in the region of Rio Largo, Brazil. The L was determined based on the reference evapotranspiration (ET_o): 0.00 ET_o, 0.25 ET_o, 0.50 ET_o, 0.75 ET_o, 1.00 ET_o, 1.25 ET_o, and 1.50 ET_o and the N rates were 0, 50, 100, 150 and 200 kg N per hectare. The air temperature during the evaluation ranged from 21.3°C to 29.2°C, with an average of 25.2°C. In the plant crop rained 2,137 mm and the crop evapotranspiration (ET_c) was 1,642 mm and in the first ratoon rained 1,976 mm and the Etc accumulated was 1,628 mm. Even so, there was water deficit of 606 and 461 mm and water excess of 1,100 and 809 mm in the first and second production cycles, respectively. The average agricultural productivity of the plant crop was of 160 t ha⁻¹ and in the first ratoon was 130 t ha⁻¹. The irrigation level of maximum economic efficiency (ATR worth R\$ 0.3985 and millimeter of water applied R\$ 3.20) was of 610 mm in the first and 213 mm in the second production cycle. In addition, the N rates more economically viable were of 126 and 100 kg of N ha⁻¹ in the plant crop and in the first ratoon, respectively. The commercially recoverable sucrose content (CRS) per ton of cane was of 145.7 kg in plant crop and in the first ratoon it was of 147.8 kg. The industrial yield in ton of sugar, in the first cycle was from 17.1 to 26.0 t ha⁻¹ in the irrigation levels and from 21.7 to 23.7 t ha⁻¹ in the nitrogen rates. And, in the first ratoon were from 16.3 to 20.8 t ha⁻¹ in relation at L and from 18.5 to 19.8 t ha⁻¹ in relation to N. The growth rate of sugarcane ranged from 9.3 to 14.4 tons per month and from 9.3 to 11.9 tons per month, in the first and second crop cycles, respectively. The amount of N extracted per ton of produced cane was from 0.32 to 1.22 kg in plant crop and from 0.39 to 1.51 kg in first ratoon. In relation to the quantity of produced cane per kg N applied in the first production cycle, ranged from 58.0 to 122.0 kg of sugarcane and in the second cycle it ranged from 35.5 to 82.0 kg of sugarcane. The sugarcane, in both crop cycles, irrigated with 150% of the ET_o, produced an average of 51.0 t ha⁻¹ more than the rainfed cane and, in relation to the nitrogen fertilization, the treatment fertilized with 50 kg of N ha⁻¹ produced an average of 8.5 t ha⁻¹ more than the fertilizer without nitrogen. The equivalent irrigation level to 190% and 165% of ET_o and the N rate of 167 and 157 kg N ha⁻¹ were the ones that maximize the agricultural productivity in the first and second crop cycle, respectively. And, the irrigation level and the N rate of the greater economic efficiency in the plant crop were 610 mm and 126 kg N ha⁻¹ and in the first ratoon it was 213 mm and 100 kg N ha⁻¹. The agro-industrial yield per hectare was more dependent on agricultural productivity than the amount of CRS and the regression curves of the square root type and response surface by second degree polynomial represented well the relation between the agricultural productivity of sugarcane with irrigation levels and nitrogen rates. The marginal rate of substitution of water for nitrogen and the combinations of these factors that result in lower production costs vary according to water depth, the nitrogen rate and agricultural productivity expected. The rational production region of sugarcane, in relation to the irrigation level and nitrogen rate, is very extensive and offers a big range of options for producers of this crop.

Key Words: drip irrigation, agricultural productivity, production function

1. 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, dos quais 70,0 mil empregos rurais e 21,0 mil urbanos (SANTOS, 2011). Apesar do cultivo da cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros alagoano se destacar pelo alto nível tecnológico utilizado, tanto no campo como na indústria, na safra 2010/2011, esse Estado produziu apenas 29,12 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 451,99 mil hectares, rendimento agrícola de $64,5 \text{ t ha}^{-1}$, considerado baixo se comparado com a produtividade média brasileira que, na mesma safra, foi $77,4 \text{ t ha}^{-1}$ e no estado de São Paulo esse índice foi $83,0 \text{ t ha}^{-1}$ (LIMA, 2011).

Na costa leste do Nordeste brasileiro os impactos das deficiências hídricas na produção de cana-de-açúcar causadas pela irregularidade das chuvas são, isoladamente, os fatores que exercem maior peso na oscilação dos rendimentos agrônômicos da referida cultura agrícola. SANTOS et al. (2011), concluíram que a temperatura do ar na zona canavieira alagoana é ideal para o cultivo da cana-de-açúcar mas a precipitação pluvial, devido à má distribuição no tempo, prejudica o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade dessa cultura. A solução agrônômica para eliminar ou reduzir os efeitos negativos da má distribuição de chuva e aumentar a produtividade agrícola e longevidade dos canaviais é a irrigação. No entanto, os custos para a implantação, manutenção e manejo de sistemas de irrigação aliados à falta de reservatórios (barragens, represas etc.) para armazenar água durante a estação seca impossibilitam a irrigação plena em toda a área cultivada com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

Durante as exposições de trabalhos técnicos relacionados com a irrigação da cana-de-açúcar nos simpósios e seminários da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB) têm surgido várias discussões sobre: qual o coeficiente de cultura (K_c) mais indicado para a cana-de-açúcar? Qual a lâmina economicamente mais viável? Quais os melhores sistema e manejo de irrigação? Entre vários outros questionamentos. Por isso, a determinação da real necessidade hídrica da cultura em suas diversas fases de desenvolvimento, assim como o conhecimento da eficiência das plantas em relação ao uso da água do solo, é imprescindível para se determinar a quantidade de água ou lâmina de irrigação de melhor custo/benefício e sustentabilidade ambiental para a cultura da cana-de-açúcar irrigada na região Nordeste do Brasil.

Outra prática agrônômica cuja eficiência é muito questionada no cultivo da cana-de-açúcar é a adubação nitrogenada. Diversos trabalhos científicos têm demonstrado que o nitrogênio é o macronutriente que mais limita o crescimento e a produtividade dessa cultura e, depois do potássio, é o mais extraído pela mesma (Ribeiro et al., 2007; Nóbilo et al., 2008). Dessa forma, para a cana-de-açúcar atingir a produtividade potencial os níveis de nitrogênio no solo devem ser suficientes para que as plantas cresçam e se desenvolvam sem deficiência nutricional.

A cultura da cana-de-açúcar responde positivamente à adubação nitrogenada até certo nível e, em seguida, o excesso de nitrogênio se torna tóxico para as plantas e as mesmas ficam com seus rendimentos prejudicados. Por isso, o conhecimento das curvas e superfícies de respostas da produtividade das culturas agrícolas em relação a fatores de produção, como irrigação e adubação nitrogenada, é essencial para determinar a quantidade desses fatores a ser utilizada nos cultivos de cana-de-açúcar de modo a torná-los economicamente viáveis porque nem sempre os maiores níveis são os mais rentáveis.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O objetivo dessa pesquisa é avaliar as respostas técnico-econômicas da cultura da cana-de-açúcar às lâminas de irrigação e doses de nitrogênio aplicadas em cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL.

2.2. Específicos

- Fazer o balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar para quantificar o déficit e o excesso hídrico durante o ciclo de produção da mesma;
- Medir a produtividade agroindustrial da cultura da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio;
- Determinar a quantidade de água ou lâmina de irrigação e a dose de nitrogênio que proporcionam a máxima eficiência econômica e a maior produtividade física da cana-de-açúcar;
- Calcular a taxa de crescimento da cultura e a eficiência no uso da água;
- Calcular a eficiência da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar;
- Obter as funções de produção, as curvas e as superfícies de resposta da cultura da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio;
- Calcular a taxa de substituição de lâminas de irrigação por doses de nitrogênio;
- Definir as combinações de quantidades de água e nitrogênio que resultam no menor custo produção para determinadas produtividades agrícola da cana-de-açúcar;
- Determinar a região de produção racional da cultura da cana-de-açúcar em função da quantidade de nitrogênio e lâmina de irrigação.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1- Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, originada do Sudoeste asiático, atualmente é cultivada em várias regiões tropicais e subtropicais do mundo e na maioria dessas regiões essa cultura tem limitações hídricas que reduzem sua produtividade agrícola. Na Austrália cerca 60% da cana produzida requer algum tipo de irrigação, 40% dos cultivos da África do Sul são feitos com irrigação e em alguns países como o Swaziland e o Sudão a cana não consegue crescer sem irrigação (BENTLEY, 1997).

O conhecimento das relações água-solo-planta-atmosfera é fundamental para melhorar o manejo da cultura de cana-de-açúcar nas regiões canavieiras, até mesmo naquelas em que não se pratica a irrigação. Assim, torna-se possível manejar a cultura de modo que os períodos críticos da lavoura, em relação à água, coincidam com a estação de maior disponibilidade hídrica da localidade a ser cultivada. Os períodos críticos para o crescimento da cana-de-açúcar, em relação à água, ocorrem no estabelecimento da cultura (emergência e perfilhamento) e no crescimento vegetativo (entre 120 e 240 dias após o plantio - DAP), quando também ocorre o alongamento dos colmos e do sistema radicular. Nesse período a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar atinge os valores máximos (BENTLEY, 1997). O ciclo de produção da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro fases de desenvolvimento ou fenológicas: estabelecimento (com duração de 30 a 60 dias), crescimento vegetativo (150 a 350 dias), formação da produção (70 a 200 dias) e maturação (50 a 70 dias).

Na fase de estabelecimento os rebolos semeados brotam, emergem e iniciam o perfilhamento; durante o crescimento vegetativo as plantas perfilham e alongam os colmos; na fase de formação da produção o crescimento vegetativo das plantas reduz um pouco e há um grande aumento no teor de sacarose no caldo da cana (seiva elaborada das plantas); e, durante a maturação os teores de açúcares totais (BRIX) atingem o valor potencial da cultura (BENTLEY & KERRAN, 1997). Alguns pesquisadores consideram que o perfilhamento faz parte da fase de estabelecimento da cultura e outros preferem dividir as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar em: fase de estabelecimento (até os 60 -73 dias após o plantio - DAP); fase de crescimento inicial (dos 61 -74 aos 114 - 120 DAP); fase de crescimento máximo (dos 115 - 121 aos 220 -240 DAP) e fase de acúmulo de sacarose (221 - 241 aos 360 - 420 DAP).

A quantidade de brotos primários, assim como o número de perfilhos por metro linear no final da fase de estabelecimento da cultura é uma variável importante para a análise do desempenho dos cultivos de cana-de-açúcar em virtude do número de colmos industrializáveis no momento da colheita ser proporcional ao número de perfilhos no final da fase de estabelecimento e, se houver deficiência hídrica nessa fase, o perfilhamento das plantas diminui e, conseqüentemente, os rendimentos agroindustriais do empreendimento também reduzem. Por outro lado, no período de maturação, o ideal é que haja restrições hídricas no intuito de frear o crescimento dos colmos e aumentar o acúmulo de sacarose nos mesmos (Lambertucci *et al.*, 1994).

A precipitação pluvial é a fonte natural que alimenta a umidade do solo nas áreas cultivadas. Dessa forma, a cultura da cana-de-açúcar é significativamente influenciada pelo regime de chuva e outros fatores climáticos como: temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, vento etc. (Lambertucci *et al.*, 2001) analisando os impactos das deficiências hídricas na produção de cana-de-açúcar, 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 agropecuários. O balanço hídrico climatológico aliado ao balanço hídrico das culturas são ferramentas utilizadas para descrever as características hidrológicas das regiões climáticas com as quais é possível determinar as melhores épocas de plantio ou cultivo (plantio, tratos culturais e colheita) de culturas agrícolas.

3.2. Balanço Hídrico

O balanço hídrico é a contabilidade da água no solo, resultante da aplicação do *Princípio da Conservação de Massa* em um volume de solo vegetado. A variação do armazenamento de água no volume considerado, por intervalo de tempo, representa o balanço entre a água que entrou e a que saiu do *volume de controle*. O volume de controle depende apenas da profundidade do sistema radicular das plantas e se admite que o mesmo seja representativo de toda a área em estudo que é representada pelo ponto de medidas dos elementos climáticos, principalmente a chuva.

Genericamente, o balanço hídrico de uma área vegetada é representado pelas entradas (precipitação pluvial, irrigação, orvalho, escoamento superficial (run in), drenagem lateral e ascensão capilar) e pelas saídas (evapotranspiração, escoamento superficial (run off), drenagem lateral e drenagem profunda) de água do volume de controle (Gentile *et al.*, 2002).

O balanço hídrico feito em um solo coberto por uma vegetação padrão (gramado), é denominado balanço hídrico climatológico mas, se as medidas forem feitas sobre uma área cultivada, ter-se-á então o balanço hídrico da cultura no qual são consideradas as fases de desenvolvimento e crescimento das plantas.

Quando a contabilidade entre o que entrou e o que saiu do volume de controle, num determinado período, apresenta resultados negativos, ocorre deficiência hídrica e ao contrário há excesso hídrico. Esses resultados podem ser correlacionados com as produtividades agrícolas para justificar os aumentos, reduções e, em casos extremos, frustrações de safras. *Almeida et al. (2009)* comparou dados de deficiência hídrica anual com a produtividade da cana-de-açúcar na Usina Porto Rico, localizada em São Miguel dos Campos, AL, e observou uma relação inversamente proporcional entre essas duas variáveis, sendo que, no período de 1977 a 1979, apesar de ter ocorrido um pequeno acréscimo de deficiência hídrica a produtividade também teve um pequeno aumento, explicado pelo fato de que, nesse período, a Usina começava a investir em irrigação e variedades mais adaptadas às condições climáticas da Região.

3.3 Necessidades hídricas e variáveis meteorológicas que influenciam a produtividade da cana-de-açúcar

A necessidade hídrica dos cultivos agrícolas, normalmente, é determinada em função da evapotranspiração da cultura (ETc) que é regida pelas condições atmosféricas locais e pela fase de desenvolvimento das plantas. A cana-de-açúcar possui necessidade hídrica de 1.500 a 2.500 mm durante a estação de crescimento, dependendo principalmente do tempo de cultivo ou da duração do ciclo de produção que pode variar de 12 a 18 meses (*Prudente e Araújo, 1979*). Para *Blancos (1982)* 1.200 mm de chuva anual, bem distribuída, é suficiente para a cana-de-açúcar atingir o crescimento e a produtividade potencial. *Associação de Desenvolvimento* afirmam que para isso são necessários 1.500 mm.

A evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar, na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, varia 2,6 a 6,0 mm dia⁻¹, nos meses de junho e outubro, respectivamente. E, durante 420 dias de cultivo, a ETc chega a somar 2.068 mm, média de 4,9 mm dia⁻¹ (*Carvalho et al., 2009*). *Carvalho et al. (2007)*, pesquisando a ETc da cana-de-açúcar, no período de agosto de 2000 a novembro de 2001, na mesma região climática, encontrou uma ETc de 2.050 mm em 450 dias, média de 4,6 mm dia⁻¹. Na região de Botucatu, SP, *Dioniz et al.*

2004) contabilizaram 1.758 mm de ETc que, num ciclo de cultivo com aproximadamente 16 meses de duração, dá 3,6 mm dia⁻¹.

A umidade do solo que alimenta as demandas de água das plantas é suprida naturalmente pela precipitação pluvial. Porém, nem sempre a quantidade de chuva é suficiente para atender às necessidades hídricas dos cultivos agrícolas com ciclos de produção superiores a seis meses, a exemplo da cana-de-açúcar. E por isso, esses cultivos, em alguma fase de desenvolvimento, sempre irão ter deficiências hídricas que comprometerão o crescimento e conseqüentemente a produtividade agrícola dos mesmos. Na zona canavieira alagoana e nordestina a precipitação pluvial é o principal fator limitante da produtividade agrônômica da cana-de-açúcar, não pelo total anual, mas por conta da irregularidade ou má distribuição das chuvas (Carvalho *et al.*, 2004). A precipitação pluvial, média anual, na microrregião litoral centro de Alagoas (Zona canavieira) é 1.800 mm. Porém, Carvalho *et al.* (2004) observaram que no período de abril a agosto há um grande excedente hídrico, enquanto nos meses de outubro a fevereiro, a probabilidade da chuva superar a evapotranspiração de referência é inferior a 20%, o que determina alta probabilidade de ocorrer deficiência hídrica. Nesse contexto, a irrigação é a prática mais recomendada para mitigar ou anular os efeitos danosos da deficiência hídrica sobre os cultivos agrícolas.

3.3.1 Irrigação

A irrigação é uma prática agrônômica que tem por objetivo fornecer água para as plantas em quantidade suficiente e no momento certo para, através do umedecimento do solo, garantir a produtividade máxima das culturas (Carvalho *et al.*, 2004). Os benefícios proporcionados pela irrigação podem ser considerados diretos e indiretos: os diretos são aqueles percebidos visualmente ou quantitativamente na lavoura logo após a aplicação da água ou no final das colheitas e os indiretos estão relacionados com as vantagens agrônômicas observadas após as colheitas ou nos ciclos de produção subsequentes das culturas e com os ganhos sociais como aumento de emprego e renda, sustentabilidade ambiental, melhorias na qualidade de vida etc.. Em cana-de-açúcar, a irrigação proporciona aumento da produtividade agrícola, longevidade dos canaviais, melhora a eficiência dos insumos agrícolas por todo o ciclo da cultura, melhora a qualidade da matéria-prima entregue na indústria, racionaliza a mão-de-obra empregada, garante a estabilidade de moagem das usinas de açúcar e álcool, entre outros benefícios (Carvalho *et al.*, 2004). A quantidade e o grau desses benefícios dependem, entre outros fatores, do método e do sistema de irrigação utilizado.

Os métodos de irrigação definem a forma como a água é aplicada nas plantas e os sistemas de irrigação representam os equipamentos, as estruturas e demais artificios utilizados nos respectivos projetos. No planejamento de um projeto de irrigação, usualmente, a primeira etapa consiste na escolha do método e do sistema de irrigação. Os métodos de irrigação podem ser divididos em três grandes grupos: irrigação por superfície, por aspersão e localizada, e cada um tem diversos sistemas que atendem às mais distintas situações, cuja escolha é baseada em parâmetros como: uniformidade da superfície do solo, tipo de solo, quantidade e qualidade da água, cultura, manejo da irrigação e clima, entre outros.

Em cana-de-açúcar o método mais utilizado ainda é a aspersão, através de sistemas convencionais de alta pressão portátil ou móvel, com deslocamento manual ou autopropelido. O sistema de pivô circular fixo e rebocável e o sistema linear também já são bastante utilizados. Nos últimos anos, o método de irrigação localizada por gotejamento subsuperficial vem sendo muito difundido com perspectiva de grande aumento de área, sobretudo na região Nordeste do Brasil. Em algumas localidades com características bem apropriadas como várzeas inundáveis, ainda se faz irrigação de cana por superfície por meio de inundação, sulco e elevação do freático, mas esses projetos tendem a acabar por conta de sua baixa eficiência de rega.

Dependendo da época e da quantidade de água aplicada (percentual da necessidade hídrica da cultura), a irrigação pode ser denominada de salvação, complementar e plena.

- Irrigação de salvação

A irrigação de salvação na cultura da cana-de-açúcar, assim como em outras culturas perenes e semiperenes, tem como objetivo a manutenção do estande (número de plantas por unidade de área) através da aplicação de lâminas de 30 a 60 mm por ciclo de cultivo. Os sistemas de irrigação mais indicados para esse fim são os autopropelidos e os canhões de alta pressão com montagem direta. Normalmente, os custos da irrigação de salvação são muito elevados e por isso não trazem ganhos econômicos diretos, no sentido de aumento de produtividade, tendo como vantagens apenas a longevidade do canavial e a manutenção da produção.

- Irrigação complementar

O objetivo dessa irrigação é completar o crescimento da cana com a aplicação de lâminas que variam de 180 a 300 mm no final de cada ciclo anual de cultivo. Em geral, essas lâminas são divididas em 3 ou 5 aplicações de 60 mm cada uma. Os sistemas de irrigação

mais indicados para essa irrigação são os pivôs (circular rebocável e fixo) e os sistemas lineares ou torres paralelas. No entanto, algumas empresas e produtores de cana-de-açúcar também utilizam canhões autopropelidos.

- Irrigação Plena

Nessa irrigação a necessidade hídrica da cultura é totalmente atendida. Em Alagoas, normalmente, são aplicados de 400 a 750 mm de água por ciclo de cultivo anual. Os sistemas de irrigação mais utilizados são sistemas paralelos, pivôs circulares fixos e rebocáveis e o gotejamento subsuperficial.

Os custos com a irrigação variam de acordo com o tipo de irrigação e lâmina aplicada. Basso et al. (1991) e Furlan et al. (1993) mostraram que para lâminas de 60 mm o método mais barato é o convencional seguido do carretel autopropelido, mas à medida que as lâminas vão aumentando os mesmos vão se tornando mais onerosos devido ao aumento na demanda de mão-de-obra e consumo de energia. Assim, quando a lâmina ultrapassa os 500 mm, os sistemas mais baratos são: o pivô rebocável e o gotejamento, na mesma ordem.

A quantidade de água a ser aplicada por irrigação depende de uma série de fatores atmosféricos, do solo e da cultura. Para uma determinada região climática, em épocas específicas, os fatores atmosféricos e do solo são relativamente invariáveis, com exceção da chuva. Dessa forma a necessidade de irrigação será regida pela demanda hídrica da cultura que varia de acordo com o estado de desenvolvimento e crescimento da mesma. E, a demanda hídrica de uma lavoura é representada pela evapotranspiração da cultura (ETc). Denomina-se evapotranspiração da cultura quando as medidas da evapotranspiração são feitas sobre uma grande área cultivada, livre de pragas e doenças, bem fertilizada, em ótimas condições de umidade e em pleno desenvolvimento vegetativo.

As medidas diretas do consumo de água pelas culturas são difíceis de serem conduzidas ou não são convenientemente obtidas. Por isso, a determinação da ETc em função dos elementos climáticos apresenta-se como uma técnica simples e prática. Para isso, é necessário primeiro calcular a evapotranspiração de referência (ETo).

A ETo é calculada ou medida sobre a superfície de um cultivo hipotético de grama verde ou alfafa em estado de desenvolvimento ativo, cobrindo completamente o solo, sem deficiência hídrica e livre de pragas e doenças. Assume-se que o cultivo hipotético ou superfície de referência tem altura de 0,12 m, com a resistência da superfície igual a 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23 (Allen et al., 1991). Nessas condições, os valores de ETo que representam o potencial evaporativo da atmosfera numa localidade específica em determinada época do

ano, sem levar em conta as características dos cultivos agrícolas e os fatores do solo, são afetados apenas pelos elementos meteorológicos e conseqüentemente a mesma é considerada uma variável climática e, portanto, pode ser estimada a partir de dados meteorológicos que servirão para obter um conjunto consistente de dados e coeficientes de cultura (K_c) para serem utilizados na determinação da evapotranspiração de culturas agrícolas (Santos et al., 2009). A ET_c difere da evapotranspiração de referência principalmente porque a cobertura do solo, as propriedades do dossel vegetativo e a resistência aerodinâmica das áreas cultivadas são diferentes da grama ou superfície de referência.

Os coeficientes de culturas, normalmente, são obtidos em experimentos científicos através dos quais se eliminam os efeitos de outras variáveis que possam interferir no crescimento e no desenvolvimento das plantas como pragas, doenças, deficiência nutricional etc.. Pois, o K_c é simplesmente uma razão entre a ET_c e a ET_o ($K_c = ET_c / ET_o$). No boletim de irrigação e drenagem n° 56 da FAO - *Food and Agriculture Organization*, (Allen et al., 1998) apresentam uma série de K_c 's tabelados para várias culturas em suas respectivas fases de desenvolvimento. Sendo que os autores recomendam a correção desses coeficientes de acordo com os elementos meteorológicos da localidade em cultivo. No mesmo boletim são apresentados dois métodos para corrigir o K_c , um linear, denominado de "único", e o dual. A correção do K_c pelo método linear é indicado para escalas de tempo acima de uma semana, mas os resultados apresentados para escalas diárias também são satisfatórios. E, o método "dual" é recomendado para o manejo de irrigação em tempo real ou na estimativa da ET_c , em que os impactos das variações diárias da umidade do solo são relevantes.

O K_c tabelado da FAO para a cultura da cana-de-açúcar varia de 0,4 a 0,60 na fase inicial, de 1,05 a 1,30 na fase intermediária e de 0,60 a 0,75 na fase final, dependendo da região climática e do modo e regime de umedecimento do solo cultivado. Na literatura são apresentados os valores do K_c da cana-de-açúcar em função das fases fenológicas da cultura, com seus respectivos tempos médios de duração, publicados por *Almeida e Costa (2009)*. Em um cultivo de cana-de-açúcar em regime de sequeiro, nos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas, *Almeida et al. (2009)*, corrigindo o K_c pelo método linear, no primeiro ciclo de cultivo (primeira folha ou cana-planta) de um plantio realizado em 16/08/2000, encontraram os valores de 0,9 na fase inicial, 1,3 na fase intermediária e 0,75 na fase final. Tais valores conduziram a uma estimativa de ET_c da ordem de 2.050 mm em 15 meses de cultivo. Esses resultados servirão para ajustar as lâminas de irrigação, principalmente em métodos de irrigação que molha a cultura de forma semelhante a uma chuva natural, como exemplo, a aspersão convencional. Contudo, é necessário avaliar se a água aplicada via

irrigação está sendo potencialmente aproveitada pelas plantas cultivadas porque os custos com irrigação oneram significativamente os cultivos agrícolas. Por isso, já existe uma linha de pesquisa no sentido de determinar a eficiência no uso da água pelas plantas (EUA).

Tabela 1. Fase fenológica ou de desenvolvimento, tempo médio de duração das fases e coeficiente de cultura (Kc) da cana-de-açúcar

FASE FENOLOGICA	Duração (dias)	Kc
Do plantio até 25 % de fechamento do dossel vegetativo	30 – 60	0,40 – 0,60
De 26 a 50 % de fechamento do dossel vegetativo	30 – 40	0,75 – 0,85
De 51 a 75 % de fechamento do dossel vegetativo	15 - 25	0,90 – 1,00
De 76 a 100 % de fechamento do dossel vegetativo	45 – 55	1,00 – 1,20
Pico de ETc (uso máximo)	180 – 330	1,05 – 1,30
Início da maturação	30 – 150	0,80 – 1,05
Maturação	30 – 60	0,60 – 0,75

Fonte: *Agropecuária*, p. 104 (1979).

3.3.2 Eficiência no uso da água

A eficiência no uso da água (EUA) é um índice definido como o saldo de matéria seca (MS) produzido por unidade de água consumida. Essa variável é fundamental para o desenvolvimento de modelos de manejo ou administração de irrigação, crescimento e produtividade de cultivos agrícolas e previsão de safras. Nas últimas duas décadas diversos pesquisadores em várias regiões do mundo têm pesquisado esse índice com a finalidade de definir a quantidade de água necessária para cada cultura agrícola em função da produtividade esperada (Baloch *et al.* (2006); Fambro *et al.* (2007); Al-Sayid *et al.* (2007); Baloch *et al.* (2007)). Esse índice também é analisado em cultivos de plantas de grande porte, a exemplo de Wang *et al.* (2007), que, trabalhando com Pecan (*Carya illinoensis* Wangenh.), no período de 2002 a 2005, na região Sul de Las Cruces - NM (32.2 N; 106.8 W e 1.180 m), observaram que durante a estação de crescimento (de maio a setembro) a evapotranspiração média anual foi 122,7 cm (48 polegadas), a produção de matéria seca das plantas inteiras foi 22.082,3 kg.ha⁻¹ (19.684,4 lb acre⁻¹), resultando numa eficiência média do uso da água pelas plantas de 179,7 kg de matéria seca.ha⁻¹.cm⁻¹ de água (406,5 lbs.acre⁻¹ polegada⁻¹).

As unidades mais usadas internacionalmente para EUA são mega grama (tonelada) de matéria verde ou seca por mega litro de água (Mg ML^{-1}) e o quilograma de produto, matéria verde ou seca, por metro cúbico de água consumida (kg m^{-3}). A EUA também pode ser expressa na forma de consumo de água (milímetro de água por quantidade de produto – mm t^{-1}) para facilitar a contabilidade dos custos com a água aplicada via irrigação. A unidade Mg ML^{-1} equivale a $10^{-2} \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ que é igual a kg m^{-3} ou a 100 mm t^{-1} . [Basson et al. \(2006\)](#) sugerem que a EUA seja calculada pela Equação 1:

$$EUA = \frac{Y_c}{ET_c} \dots\dots\dots (1)$$

em que Y_c é a produtividade da cultura e ET_c é a evapotranspiração da cultura.

A água consumida corresponde à evapotranspiração real (ETr) e total da cultura durante o ciclo de produção. A ETr pode ser obtida somando-se a precipitação pluvial efetiva mais a água aplicada via irrigação. A precipitação pluvial efetiva é a parte da chuva total que fica armazenada no solo para ser utilizada pelas plantas.

A EUA da cultura da cana-de-açúcar nos trópicos e subtropicais secos com irrigação, fica entre 5 e 8 kg m^{-3} se tratando de colmos e de 0,6 e 1,0 kg m^{-3} em termos de sacarose ([Basson et al. 2006](#)). Considerando esses valores, a cana-de-açúcar responde com 50 a 80 kg ha^{-1} de colmos e de 6 a 10 kg ha^{-1} de sacarose por milímetro de água utilizada, o que resulta em um consumo de 20,0 a 12,5 milímetros de água por tonelada de colmos e 166,6 a 100 milímetros por tonelada de sacarose, respectivamente. Para [Basson et al. \(2006\)](#), a relação entre o consumo de água e a produtividade na maioria das situações fica entre 8 e 12 mm t^{-1} . [Basson et al. \(2006\)](#), trabalhando com três variedades de cana-de-açúcar na região de Jaú, SP, encontraram uma EUA de 12,8 milímetro por tonelada de colmo (variedade RB867515, em cultivo de sequeiro) a 16,2 milímetro por tonelada de colmo (variedade SP80-3280, em cultivo de sequeiro). Isso indica que existem variedades mais responsivas e mais eficientes quanto ao uso da água.

Em cana-de-açúcar, [Basson et al. \(2006\)](#), citado por [Lima et al. \(2008\)](#) (LPS), encontrou EUA's de 8,37 a 20,94 Mg ML^{-1} , equivalente a uma faixa de 8,37 a 20,94 kg m^{-3} . Esses valores correspondem a um consumo de 11,94 e 4,77 mm t^{-1} respectivamente. Uma EUA, na forma de consumo, de 4,77 mm t^{-1} é considerada um valor muito baixo e muito bom para os cultivos irrigados. No Município de Capim, na Paraíba, no período de 2004 a 2005, [Barbosa et al. \(2006\)](#) trabalhando com a variedade SP791011 irrigada por pivô fixo encontraram

uma EUA de $7,12 \text{ kg m}^{-3}$ para produtividade de colmos e $0,67 \text{ kg m}^{-3}$ para produtividade de açúcar, correspondente ao consumo de 14 mm t^{-1} de colmos e $149,2 \text{ mm t}^{-1}$ de sacarose.

WATKINS & CO. (2006), na região semiárida do Sul do Texas, Estados Unidos da América, observaram uma eficiência no uso da água de 8,4 megagrama de cana por megalitro de água utilizada, correspondente a um consumo de 11,9 milímetros de água por tonelada de cana. E, com base nos dados apresentados por WATKINS & CO. (2006), a EUA da cultura da cana-de-açúcar na Usina Seresta localizada no Município de Teotônio Vilela, AL variou em função da lâmina de irrigação utilizada da seguinte forma: para a lâmina de 100 mm que apresentou o melhor resultado, a EUA foi $8,2 \text{ mm t}^{-1}$ e para a lâmina de 650 mm a EUA de $14,8 \text{ mm t}^{-1}$ foi a menos eficiente. A EUA média das lâminas de 50 a 650 mm foi $11,7 \text{ mm t}^{-1}$. Esses resultados mostram que quando a irrigação se aproxima das condições de cultivos sem deficiências hídricas a EUA é mais baixa e corrobora com as conclusões de WATKINS & CO. (2006).

A EUA depende de uma série de fatores naturais e agronômicos, dentre os fatores naturais, a temperatura e a radiação solar são os que exercem maior influência e em relação aos agronômicos, a nutrição mineral e os fatores genéticos das variedades merecem destaque.

3.3.3 Radiação solar e temperatura do ar

A radiação solar é a fonte de energia primária e dela depende a temperatura do ar e do solo. Portanto, essa variável meteorológica pode ser considerada o fator natural mais importante para os processos físicos e químicos essenciais para o desenvolvimento e crescimento das plantas. Na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, TAVELLA *et al.* (2010) observou valores diários médios de $20,9 \text{ MJ m}^{-2}$ (nos meses de fevereiro a abril), $14,9 \text{ MJ m}^{-2}$ (durante a estação chuvosa – de maio a agosto) e $23,3 \text{ MJ m}^{-2}$ (de setembro a dezembro) e concluiu que a cultura da cana-de-açúcar irrigada apresenta correlações positivas entre a produtividade agroindustrial e a radiação fotossinteticamente ativa acumulada que por sua vez tem relação diretamente proporcional com a radiação solar global.

A temperatura do ar, depois da radiação solar, talvez, seja o fator meteorológico de maior importância no contexto da produção agrícola. O efeito dessa variável climática é mais efetivo durante a germinação das plantas porque a mesma influencia de forma diretamente proporcional a temperatura do solo que estimula e serve com catalisador para as reações bioquímicas relacionadas ao desenvolvimento do embrião, nas sementes, e das células meristemáticas, nas propagações vegetativas. A temperatura do ar (T) na faixa de 28 a 32°C é

considerada ótima para a propagação vegetativa da cana-de-açúcar e com a temperatura do solo entre 20 e 32°C a cana-de-açúcar germina satisfatoriamente. Mas se a temperatura baixar de 20°C a taxa de germinação diminui e abaixo de 10° a cana não germina (Bryant, 1988). Para Dagnon & Kasari (1977) e Feghly & (1987) o crescimento e o desenvolvimento potencial da cana-de-açúcar acontecem em localidades em que a temperatura média do ar fica entre 22 e 30° C.

Perceira Junior (2010), na região de Rio Largo, AL, mediu temperaturas inferiores a 20°C no decorrer do ciclo de produção da cana-de-açúcar. Mas explica que esses baixos valores de T não ocasionaram perdas de eficiência dos processos de crescimento da cultura, tal como fotossíntese, uma vez que foram observados no período noturno, horas do dia em que as plantas praticamente não fazem fotossíntese. Pressupondo-se assim que as baixas temperaturas do ar ocorridas durante a noite ao invés de causar perdas proporcionaram ganhos, visto que temperaturas amenas só diminuem o metabolismo (respiração) das plantas, fazendo com que as mesmas reduzam o consumo de fotoassimilados.

3.4 Necessidades nutricionais

O conhecimento das necessidades nutricionais das plantas cultivadas é parâmetro básico para o planejamento de adubações e manejo de cultivos que visam à máxima eficiência econômica dos empreendimentos agropecuários. Entre os diversos elementos químicos requeridos pela cana-de-açúcar para atingir o crescimento e o desenvolvimento potencial, o nitrogênio se destaca por ser o quarto elemento encontrado em maior quantidade nas plantas, ficando atrás apenas do carbono, hidrogênio e oxigênio (Silva de Saugrande, 1983). Nos vegetais, o nitrogênio atua no alongamento dos caules e faz parte de enzimas, aminoácidos e proteínas. Por esses motivos vários autores pesquisaram e continuam pesquisando as influências das doses e forma de aplicação do nitrogênio em diversas culturas agrícolas, principalmente em cana-de-açúcar por se tratar de uma cultura que apresenta correlação altamente positiva com o aumento do nível de adubação nitrogenada (Dagnon & Kasari, 1977; Wikipédia & Brasil, 2014; Perceira Jr., 2010)

A resposta da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar varia de acordo com a época de aplicação, variedade cultivada, forma de aplicação e ambiente de cultivo. Azevedo (1977) observou que o nitrogênio ao ser aplicado é rapidamente absorvido e acumulado na parte aérea das plantas e proporciona melhor resposta quando aplicado em dose única do que aplicado de forma parcelada. Nesse mesmo trabalho o autor encontrou respostas

diferenciadas na produção de colmo para a aplicação de nitrogênio em dois tipos de solo (podzólico amarelo e cambissolo).

A identificação das quantidades de nutrientes extraídas pelas colheitas das culturas em função das retiradas de matérias secas e verdes é um parâmetro eficaz para a quantificação de adubos a serem utilizados com base na expectativa de produtividade. [LIMA \(1997\)](#) já trabalhavam nessa linha de pesquisa e encontraram as seguintes quantidades de nutrientes exportados por uma (1,0) tonelada de colmos de cana-de-açúcar produzida por hectare : 1,32 kg de N; 0,21 kg de P_2O_5 ; 1,31 kg de K_2O ; 0,36 kg de CaO; 0,32 kg de MgO; 0,14 kg de S e 0,93 kg de Si. Na região canavieira Centro-sul do Brasil, [COPERSUCAR \(2002\)](#) observaram uma remoção de 1,31 kg de N por hectare, em cana-planta e 1,11 kg de N em cana-soca.

Para [LIMA \(1997\)](#), o efeito da adubação nitrogenada no plantio não é conclusivo pois não existe resposta convincente a essa prática porque considerando-se uma extração de 0,92 a 1,2 kg de N por tonelada de colmos, o uso de 0 a 60 kg ha^{-1} de N não justificaria produtividades de 115 t ha^{-1} encontradas em 32 usinas por meio de um levantamento feito pelo COPERSUCAR em 2002. Isso sugere que a cultura pode obter o N por outros caminhos ou o solo pode fornecer o N por outros meios, como: mineralização dos restos culturais; mineralização da matéria orgânica do solo; nitrogênio armazenado no tolete de plantio; práticas agrícolas, como calagem e revolvimento do solo; fixação biológica etc..

A cana-de-açúcar cultivada em regiões situadas entre os meridianos de 35° de latitude norte e sul, sem restrições hídricas e nutricionais e livre de pragas e doenças, é uma cultura que consegue crescer e produzir grande volume de fitomassa por unidade de área (produtividade), com alta qualidade de matéria prima e bons rendimentos industriais.

3.5. Crescimento da cana-de-açúcar

O crescimento da cana-de-açúcar, nas regiões tropicais e subtropicais, pode acontecer durante todas as estações do ano. Por isso, em algumas localidades, as plantas dessa cultura crescem durante 24 meses ([LIMA, 1997](#)). [LIMA \(1997\)](#) observou que a curva de crescimento das plantas de cana-de-açúcar apresenta formato sigmoidal e, quando há restrições hídricas na fase inicial do desenvolvimento vegetativo, o crescimento dos colmos fica limitado, provocando também redução da produtividade da cultura.

A taxa de crescimento da cana-de-açúcar pode ser medida em função do comprimento do colmo ($cm\ dia^{-1}$) ou em função do peso da matéria seca ou fresca ($g\ dia^{-1}$).

Quando as medidas são realizadas sem coleta de plantas, a primeira opção é mais apropriada. *Almeida et al. (2008)*, em um canavial irrigado por gotejamento no sul do Texa, USA, observou uma taxa de crescimento de 0,78 a 2,09 cm dia⁻¹ e *Wilkens et al. (2007)* avaliando o crescimento da cana-de-açúcar em quatro ciclos de cultivo (da cana-planta até a terceira soca, irrigada por gotejamento) observaram uma altura média do colmo de 208 cm, com uma taxa de crescimento média de 1,50 cm dia⁻¹.

Além da sanidade, nutrição e suprimento hídrico e térmico das plantas, a fase de desenvolvimento da cultura também interfere na taxa de crescimento da cana-de-açúcar. *Tejedor et al. (2009)* observaram que a taxa de crescimento até os 140 dias após o plantio (DAP) é baixa, entre os 140 e 300 DAP essa taxa atinge os valores máximos e depois dos 300 DAP diminui lentamente até o momento da colheita. *Almeida et al. (2008)* em cultivo irrigado na região de Rio Largo, AL mediram taxas de crescimento no ciclo de produção de cana-planta de 0,66 cm dia⁻¹, na fase de crescimento inicial, 1,20 cm dia⁻¹ na fase intermediária (máximo crescimento) e 0,12 cm dia⁻¹ na fase final; e, no ciclo de produção de cana-soca essas taxas foram 0,88 cm dia⁻¹, 1,18 cm dia⁻¹ e 0,10 cm dia⁻¹, nas fases de crescimento inicial, intermediária e final, respectivamente.

3.6. Produtividade agrícola e rendimento industrial

Além de uma série de fatores naturais e agronômicos, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar (expressa em toneladas de cana por hectare – TCH), depende também da cultivar utilizada e da idade do canavial (ciclo de produção anual). E, o rendimento agroindustrial, calculado em toneladas de pol por hectare (TPH) ou em toneladas de açúcar por hectare (TAH), está relacionado com a produtividade agrícola e a qualidade da matéria prima, principalmente com os componentes: açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR) que também são conceituados *Tejedor et al. (2009)* como açúcares teóricos recuperáveis. *Almeida et al. (2008)*, em Piracicaba no Estado de São Paulo –Brasil, conseguiram produzir, em sistemas de sequeiro, 112 e 120 t ha⁻¹ em cana-planta e cana-soca, respectivamente. Na região de Pirassununga, SP (Brasil), *Almeida et al. (2008)* relataram que, ao usar as doses 0,0 e 3,0 quilogramas de zinco por hectare, produziram 141 e 138 toneladas de cana por hectare e 18,89 e 20,28 toneladas de açúcar por hectare, respectivamente. *Almeida et al. (2008)* no oeste paulista (Brasil) cultivaram as variedades RB867515 e RB72454, consideradas tardias (canas para serem colhidas em final de safras) e obtiveram produtividades de 79,1 e 74,8 t ha⁻¹, respectivamente. *Almeida et al. (2008)* plantaram as

variedades RB867515 e RB92579 na região de Rio Largo, AL (Nordeste brasileiro) e conseguiram produzir 126 e 129 toneladas de cana por hectare, na mesma ordem.

3.7. Qualidade da matéria prima (cana-de-açúcar)

A qualidade da cana-de-açúcar a partir de 1999 passou a ser avaliada pelo teor açúcares totais recuperáveis (ATR) em substituição à sistemática que atribuía ágio e deságio em relação a uma cana padrão. Logo o ATR, que é expresso em kg por tonelada de colmo fresco, passou a ser adotado como moeda de comercialização da matéria prima, cujo preço varia diariamente devido ao fato de estar atrelado aos preços dos principais produtos (açúcar e álcool). O ATR é calculado com base no percentual de açúcares redutores totais (ART), e esse percentual é modificado em função dos parâmetros de eficiência das unidades agroindustriais. Para o estado de São Paulo, inicialmente, foi adotado o percentual de 88,0 % do ART e posteriormente foi corrigido para 90,5 % do ART. Nos estados de Pernambuco e Alagoas o percentual adotado é 89,0 %. Com a criação do ATR surgiu uma dúvida entre os autores de trabalhos técnicos e científicos sobre que parâmetro adotar, ART ou ATR? [Bassani et al. \(2007\)](#) recomenda a adoção do ART porque o ATR depende da eficiência particular ou específica de cada unidade industrial.

A concentração de açúcares totais recuperáveis se eleva à medida que o grau de maturação da cana-de-açúcar aumenta porque nessa fase as plantas param de emitirem novas folhas e diminuem o crescimento vegetativo. Com isso, as folhas vão ficando velhas, com a capacidade fotossintética e de absorção de água reduzida, de modo que a seiva (o caldo da cana) vai tornando-se mais concentrada e aumenta a proporção da massa de ATR em relação à massa total dos colmos. Por outro lado, a maturação da cana está relacionada com o teor de umidade do solo porque enquanto esse teor se encontrar próximo da capacidade de campo as plantas tendem a permanecer na fase vegetativa adiando o início da maturação. Por isso, para a cana-de-açúcar irrigada amadurecer e aumentar a concentração de ATR, a irrigação deve ser suspensa alguns dias antes da colheita. Porém, para que o estresse hídrico provocado pelo corte da irrigação não cause prejuízo à cultura, é necessário determinar o tempo ideal entre a suspensão da irrigação e a colheita porque períodos curtos não darão tempo para as plantas completarem a maturação e períodos longos podem provocar desidratação excessiva da cepa (rizoma) e prejudicar a brotação das próximas socarias (reduz o número de plantas por hectare dos próximos ciclos de cultivo), além de reduzir o peso fresco dos colmos (reduz a

produtividade agrícola). *Blanco (1989)* recomenda o corte da irrigação (*dryng-off*) seis semanas antes da colheita para melhorar o teor de sacarose e conseqüentemente o ATR.

O balanço hídrico da cultura para determinar a deficiência de água no solo também pode ser utilizado para determinar o tempo ideal de *dryng-off*. *Barro-Árchez (2004)* observou que déficits de água no solo levemente superiores a 120 mm reduzem o acúmulo de biomassa e quando superiores a 145 mm o acúmulo de sacarose também é reduzido. *Barro-Árchez & Smith (2007)* sugerem monitorar a redução do número de folhas verdes, após o corte da irrigação, como indicativo para determinar o período de colheita e relatam que o *dryng-off* é mais benéfico ao aumento do rendimento agroindustrial quando a cana é colhida com três ou quatro folhas verdes a menos do que um cultivo sem déficit hídrico. O total de ATR por tonelada de colmo fresco nos estados de Pernambuco e Alagoas varia de 95,0 kg por tonelada de colmo fresco (cana muito verde) a um pouco mais de 160,0 kg (cana muito madura). A quantidade adotada para uma cana padrão é 114 kg por tonelada de colmo fresco, acima da qual a cana é considerada madura. A quantidade de ATR também varia com as variedades cultivadas.

3.8. Função de resposta ou função de produção

As funções de resposta das culturas com bases experimentais constituem fontes valiosas de informações a serem utilizadas para a tomada de decisões sobre os empreendimentos agropecuários. Essas funções, também conceituadas como função de produção, são obtidas através de conjuntos de dados levantados em experimentos científicos direcionados à quantificação da rentabilidade ou incrementos de produtividade de determinadas práticas agrícolas (*Brizzone 1953*). As funções de produção normalmente são feitas apenas para um fator de produção por gerar modelos matemáticos mais simples. Entretanto, funções de produção para o conjunto de até dois fatores de produção podem gerar superfícies de respostas de fáceis interpretações. *Faloutsos & Tziamis (1989)* simularam a função de produção da cana-de-açúcar em relação a lâminas de irrigação e concluíram que os modelos variam em função das características ambientais (solo e clima) das localidades e eficiência do sistema de irrigação. Por isso, o ideal é que sejam feitos modelos para cada tipo de solo e sistema de irrigação. *Barro-Árchez (1999)* na região de Campos dos Goytacazes, RJ, trabalhando com as variedades RB72454, RB765418 e SP 791011 irrigadas por aspersão concluíram que a equação polinomial de segundo grau representa bem a produção de cana em função das lâminas de irrigação aplicadas. *Barro-Árchez (2006)* obteve modelos matemáticos que

estimam a produtividade da cana-de-açúcar na região canavieira da Paraíba, em função de lâminas de irrigação aplicadas por pivô fixo e doses de zinco, com altos índices de significância estatística.

3.9. Produto físico marginal de fatores de produção

O produto físico marginal (PMg) de um determinado fator representa o incremento no rendimento agrícola da cultura ao se adicionar uma unidade a mais do fator considerado. O mesmo é obtido através da primeira derivada da função de produção, em relação ao fator considerado, como exemplo: milímetro de água de irrigação (PMg L) e quilograma de nitrogênio por hectare (PMg N).

3.10. Taxa marginal de substituição

A taxa marginal de substituição de um fator de produção "A" por outro fator de produção "B" corresponde à quantidade do fator "A" que pode ser substituída por uma unidade do fator "B", mantendo-se o mesmo nível de rendimento agrícola (BENTON, 1997). Essa taxa é obtida pela relação entre o produto físico marginal do Fator "A" e o produto físico marginal do fator "B". A exemplo da taxa marginal de substituição do fator lâmina de irrigação pelo fator quilograma de nitrogênio ($TMS_{L/N}$) corresponde à lâmina de irrigação que pode ser substituída por um quilo de nitrogênio ou quantos quilogramas de nitrogênio são necessários para substituir um milímetro de água aplicada na lavoura, com a cultura, mantendo a mesma produtividade agrícola. Para calcular a lâmina de irrigação a ser substituída por um quilo de nitrogênio, divide-se a produção marginal do nitrogênio pela produção marginal da água ($PMg N / PMg L$) e, para determinar a quantidade de nitrogênio a substituir 1,0 mm de água, divide-se a produção marginal da água pela do nitrogênio ($PMg L / PMg N$).

3.11. Região de produção racional

A região de produção racional demarca a parte dos gráficos de isoquantas na qual se visualizam as diversas combinações dos fatores e das respectivas produtividades em que a atividade é economicamente viável. Essa região é determinada pela análise das curvas de isoprodutos e seus limites correspondem às partes das curvas em que os fatores se comportam como substitutos, estando situada entre as duas linhas de fronteiras. As linhas de fronteiras são linhas que ligam pontos em que a inclinação das isoquantas é nula ou infinita (Azeiteiro, 2004).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias – CECA (09°28'02"S; 35°49'43"W; 127m) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Município de Rio Largo, AL (Figura 1). O plantio foi feito numa área de 0,50 hectares, em um solo classificado, por *Santos et al. (2002)*, como latossolo amarelo coeso argissólico, de textura média argilosa. As características hidrofísicas são: umidade em capacidade de campo igual a $0,2445 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e no ponto de murcha permanente $0,1475 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; densidade volumétrica de $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$; porosidade total de $0,423 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e velocidade de infiltração básica de 52 mm h^{-1} . O clima da região é caracterizado, pela classificação de Thornthwaite & Mather, como úmido (B_1), megatérmico quente (A^2), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w_2). A precipitação pluvial média anual é 1.800 mm (*Aguiar, 1990*). Os resultados das análises química e física do solo, da área experimental, são apresentados nas *Taboas 2 e 3*, respectivamente.

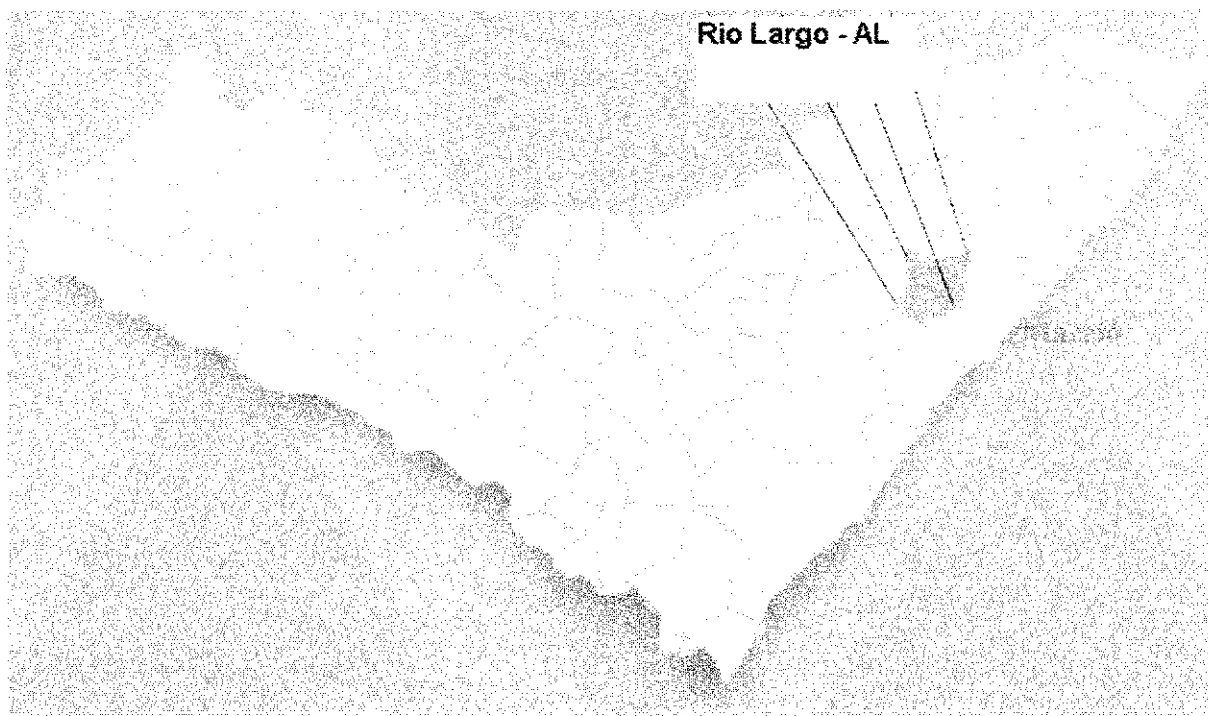


Figura 1. Localização do Município de Rio Largo, no Estado de Alagoas

Tabela 2. 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 (soma de bases)	27,7	16,1			

Tabela 3. Resultados da análise física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m

Características Físicas	Profundidade (m)		
	0,0 - 0,20	0,20 - 0,40	0,40 - 0,60
Granulometria (%)			
Areia	65,00	60,49	50,09
Silte	10,09	14,30	22,55
Argila	24,91	25,21	27,35
Classificação textural	Franco A. Arenoso	Franco A. Arenoso	Franco A. Arenoso
Densidade do solo	1,23	1,19	1,14
Densidade das partículas	2,68	2,68	2,67
Porosidade (%)	54,03	55,46	57,33
Umidade (%)			
Natural	0,91	2,09	2,46
0,33 atm	26,70	17,15	19,50
15,00 atm	11,06	9,31	10,57
Água disponível	15,64	5,84	8,93

4.2. Tratamentos e delineamento experimental

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_0): 0,0 ET_0 , 0,25 ET_0 , 0,50 ET_0 , 0,75 ET_0 , 1,00 ET_0 , 1,25 ET_0 e 1,50 ET_0 . E, nas subparcelas ficaram as doses de nitrogênio (0 (zero), 50, 100, 150 e 200 $kg\ ha^{-1}$). A cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, normalmente, é colhida no final da safra, época que coincide com o final da estação seca. De modo que em pouco tempo começa a estação chuvosa e a irrigação é suspensa por um período médio de cinco a seis meses. Com isso, ao reiniciar a irrigação a cultura já se encontra na fase de máximo crescimento e maior demanda evaporativa; então, nessas circunstâncias, os percentuais da ET_0 utilizados nessa pesquisa tem valores equivalentes ao coeficiente máximo da cultura ($K_{C\text{máximo}}$ ou K_C da fase média), semelhante à pesquisa conduzida por [Wiedefeld & Enciso \(2008\)](#). Na [Figura 2](#) se encontram as curvas das quantidades de água em função dos percentuais da ET_0 , aplicadas na cana-de-açúcar durante a fase de demanda máxima da referida cultura.

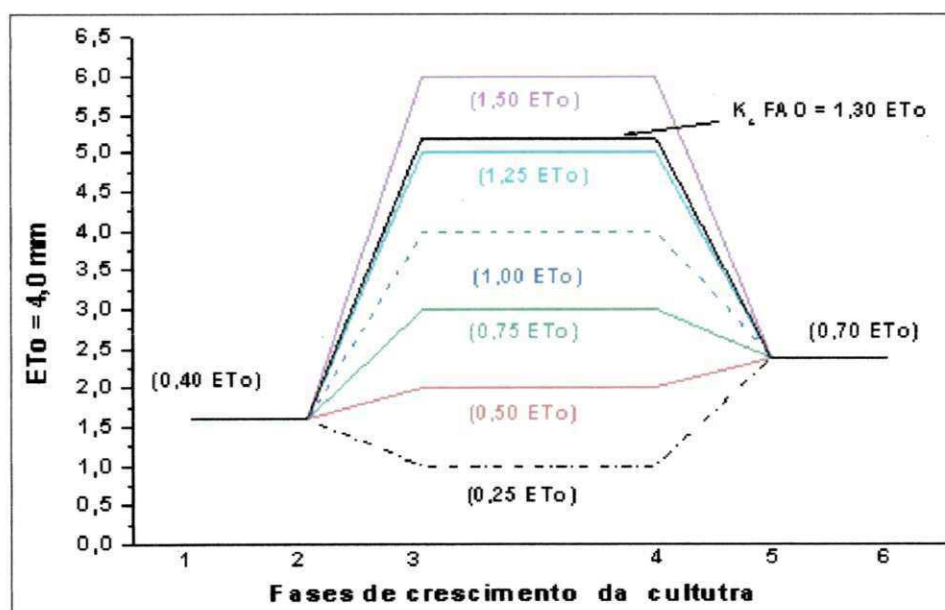


Figura 2. Curvas das quantidades de água aplicadas na cultura da cana-de-açúcar durante a fase de máxima demanda hídrica, em função dos percentuais da ET_0

Na **Figura 3** tem-se o croqui do experimento. 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. Os experimentos em parcelas subdivididas contêm todas as desvantagens que os experimentos fatoriais apresentam em

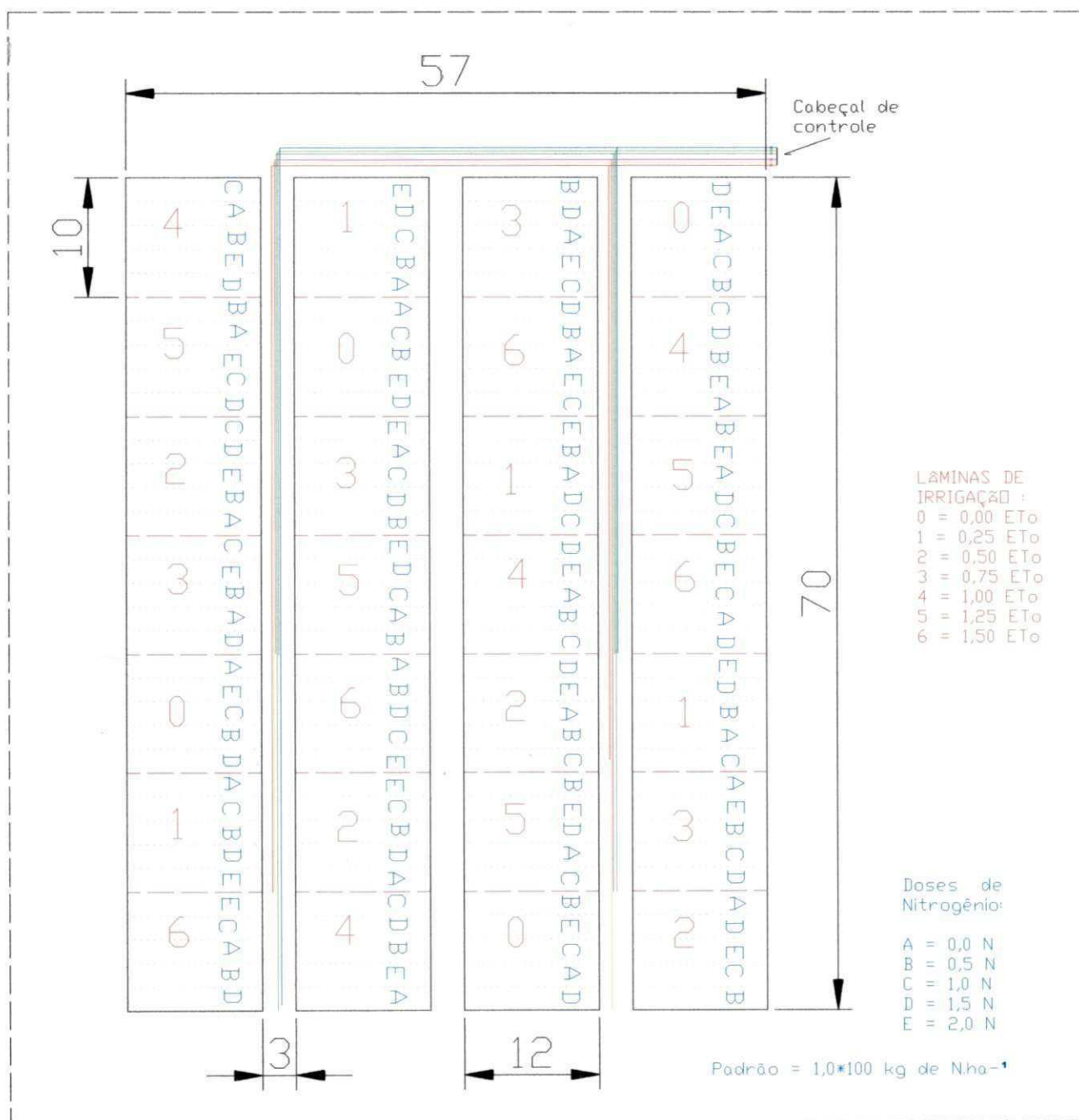


Figura 3. Croqui do experimento

relação aos experimentos simples. Além disso, eles apresentam a desvantagem de serem menos eficientes, do ponto de vista estatístico, que os fatoriais pois, enquanto nos experimentos fatoriais se tem um só resíduo para avaliar todos os efeitos, nos experimentos em parcelas subdivididas há dois resíduos: um para avaliar o efeito do fator colocado nas parcelas e outro para avaliar o efeito do fator colocado nas subparcelas, além do efeito da interação. Isso provoca a redução do número de graus de liberdade (GL) dos resíduos, pois o GL do resíduo do fatorial é igual ao GL Resíduo "a" mais o GL Resíduo "b" e, como consequência, ocorre aumento do erro experimental (Ferreira, 2000).

4.3. Plantio e manejo da cultura

A variedade utilizada foi a RB92579 que tem as seguintes características: Alta produtividade agrícola, alto teor de sacarose, maturação média, baixo florescimento, plantio de inverno e colheita para meio e final de safra (Barbosa et al., 2003).

O plantio foi realizado no período de 12 a 21 de janeiro de 2009, em linhas duplas, com espaçamento de 0,60 m nas entre linhas mais estreitas e 1,40 m na entre linhas mais largas (Figura 4). Foram colocadas 18,0 gemas por metro linear para garantir um mínimo de 12 brotos primários por metro. A primeira colheita foi realizada em 22/02/2010 e a segunda em 28/02/2011

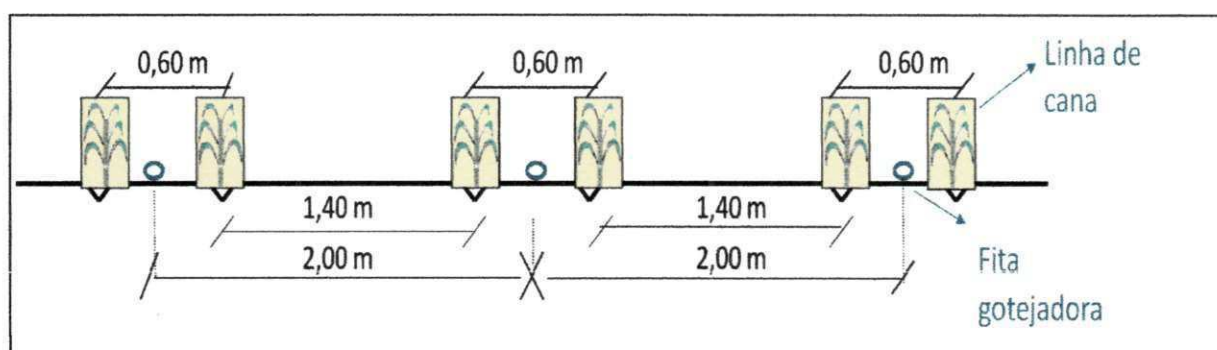


Figura 4. Esquema da distribuição espacial das fitas ou tubos gotejadores e espaçamento entre as linhas de plantas utilizados no experimento

- Calagem e adubação

A calagem e a adubação foram feitas de acordo com os resultados da análise química do solo (Tabela 2). Na adubação de fundação (cana-planta) foram colocados 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 200 kg ha⁻¹ de K₂O e aos 66 dias após o plantio foi feita a adubação de

cobertura com as respectivas doses de nitrogênio de cada tratamento. A cana-soca foi adubada trinta dias após o corte com 120 kg de P_2O_5 , 160 kg de K_2O e as doses de nitrogênio correspondentes aos tratamentos. A fonte de nitrogênio utilizada nos dois ciclos de produção foi a uréia.

- Irrigação

A irrigação foi feita por gotejamento superficial, com fita gotejadora de 16 mm e emissores a cada 0,50 m. A vazão nominal dos emissores é $1,0 L h^{-1}$. As lâminas de irrigação foram determinadas em função da evapotranspiração de referência semanal, obedecendo-se aos percentuais de cada tratamento e o tempo de aplicação foi realizado por um sistema automático de controle de irrigação.

O cálculo do volume a ser aplicado em cada parcela foi feito multiplicando-se os valores da ETo, em milímetros, pela área total da parcela (12,0 m X 10,0 m) e turno de rega adotado foi de dois dias para manter a umidade do solo nas parcelas, sem restrição hídrica, sempre próxima da capacidade de campo.

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 e emergência da cultura, inclusive no tratamento 0,0 ETo. As características químicas da água utilizada na irrigação se encontram na [Tabela 4](#).

O controle das plantas nativas foi executado com herbicidas (Diuron e 2,4D nas doses de 3,0 e 2,0 $L ha^{-1}$, respectivamente) e enxada manual sempre que necessário. A incidência de pragas e doenças foi monitorada em escalas máximas de 10 dias e só houve necessidade de controle para saúvas. O controle das formigas (saúvas) foi feito com iscas.

Tabela 4. Resultados da análise química da água utilizada na irrigação

Determinações	Resultados	Determinações	Resultados
pH	8,57	Carbonatos ($mg dm^{-3}$)	0,00
Cálcio ($mg dm^{-3}$)	0,29	Cloretos ($mg dm^{-3}$)	0,06
Magnésio ($mg dm^{-3}$)	0,60	Condutividade elétrica ($\mu S Cm^{-1}$)	687,00
Sódio ($mg dm^{-3}$)	0,33	Ferro ferroso ($mg dm^{-3}$)	0,17
Potássio ($mg dm^{-3}$)	0,12	Ferro total ($mg dm^{-3}$)	0,74
RAS	0,49		

CLASSIFICAÇÃO GERAL: (C₂ S₁) Médias restrições.

4.4. 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 (Figura 5).

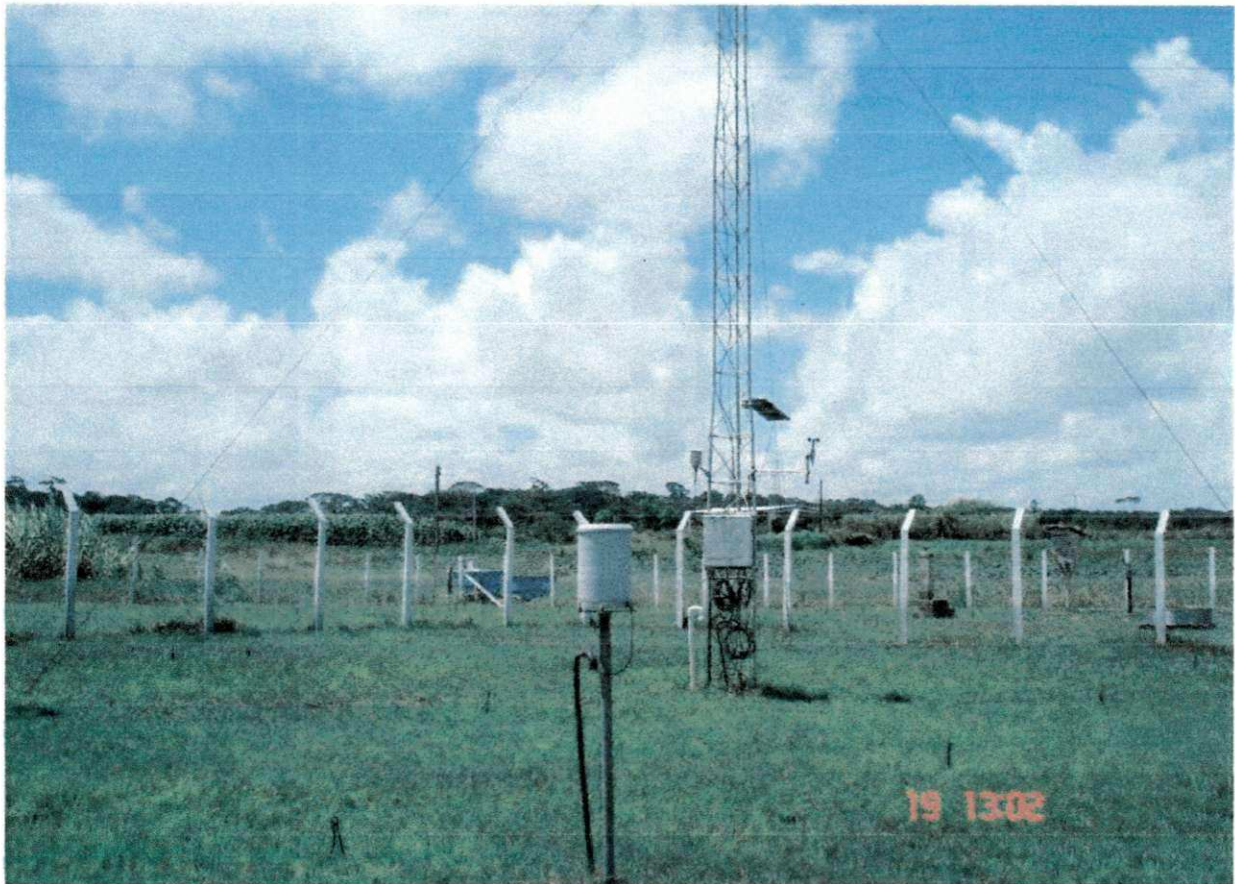


Figura 5. Estação automática de aquisição de dados Micrologger, CR10X, instalada a 400 metros do experimento

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada pelo método de Penman – Monteith-FAO, conforme a [Equação 2](#).

$$ET_o \text{ (mm dia}^{-1}\text{)} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T+273}\right) U_2 (e_s - e)}{\Delta + [\gamma (1+0,34 U_2)]} \dots\dots\dots (2)$$

em que, Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor d'água saturado versus temperatura do ar (kPa °C⁻¹); R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ é o Coeficiente psicrométrico; T é a temperatura média do ar; U_2 é a velocidade média do vento a 2,0 m de altura (m s⁻¹); “ e_s ” é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa) e “ e ” é a pressão do vapor d'água do ar (kPa).

O balanço hídrico da cultura foi feito pelo método de Thornthwaite & Mather, conforme a metodologia recomendada por [Pereira et al. \(2002\)](#). E, a evapotranspiração da cultura (ETc) foi calculada multiplicando-se a ETo pelo coeficiente de cultura (Kc) e o Kc utilizado foi o tabelado da *Food Agriculture Organization* (FAO), cujo valor da fase inicial (0,40) foi corrigido pelo método gráfico proposto por [Allen et al. \(1998\)](#), em função do intervalo de tempo entre os eventos de chuva e a magnitude da ETo.

Os valores do Kc das fases intermediária e final foram corrigidos pela [Equação 3](#),

$$Kc = Kc_{\text{tabelado}} + [0,04(U_2 - 2) - 0,004(UR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \dots\dots\dots (3)$$

em que: Kc é o coeficiente de cultura; Kc _{tabelado} é o Kc tabelado para cana-de-açúcar; U₂ é a velocidade do vento a 2,0 m de altura da grama; UR_{min} é a umidade relativa do ar mínima e h é a altura do dossel vegetativo da cultura.

4.5. Variáveis de produção

As variáveis de produção analisadas foram: produtividade agrícola, os açúcares totais recuperáveis (ATR) e o rendimento agroindustrial. Apesar de [Stupiello \(2009\)](#) recomendar o uso do ART (Açúcares Redutores Totais) para avaliar a qualidade da matéria prima, nesse trabalho foram utilizados os valores dos ATR calculados pela fórmula adotada pelo CONSECANA de Alagoas e Pernambuco, conforme a [Equação 4](#) porque o ATR regional representa melhor o valor financeiro da produção.

$$ATR_{AL,PE} = 9,36814 \times PC + 8,9 \times ARC \dots\dots\dots (4)$$

em que: PC é o pol da cana e ARC é o valor dos açúcares recuperáveis da cana.

A produtividade agrícola foi medida a partir da pesagem das duas linhas de cada subparcela. Essa pesagem foi feita com um dinamômetro com capacidade para pesar até 100 kg com os feixes de colmos levantados manualmente por duas pessoas, por fim, as análises das características agroindustriais dos colmos, necessárias para o cálculo do ATR, foram feitas no laboratório da Usina Santa Clotilde, localizada em Rio Largo, AL.

4.6. Função de produção da cana-de-açúcar em relação aos fatores irrigação e adubação nitrogenada

A função de produção para as respostas da cana-de-açúcar às lâminas de irrigação e às doses de nitrogênio utilizadas no experimento foi obtida por curvas de regressão polinomial de segundo grau e por raiz quadrada. As duas variáveis independentes (lâmina de irrigação e dose de nitrogênio) foram analisadas individualmente e geraram polinômios semelhantes aos das [Equações 5 e 6](#).

$$Y = b_0 + b_1x - b_2x^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Y = b_0 + b_1x - b_2\sqrt{x} \quad \dots\dots\dots (6)$$

em que: Y é a produtividade agrícola da cana-de-açúcar (t ha⁻¹); x é a lâmina de irrigação total ou a dose de nitrogênio utilizada e b₀, b₁ e b₂ são os coeficientes da equação. O tipo de regressão foi escolhido com base na que melhor representou os resultados, sendo o coeficiente de correlação (r²) o principal parâmetro de decisão.

A análise conjunta dos referidos fatores de produção também foi feita de acordo a descrição do subitem 4.11.

4.7. Análises física e econômica da produção

A análise física da produção para a estimativa da lâmina de irrigação e dose de nitrogênio que proporcionam a produtividade máxima foi feita igualando-se a zero a primeira derivada da [Equação 5](#), conforme as [Equações 7, 8 e 9](#).

$$Y = b_1 - 2b_2x \text{ (primeira derivada da equação 5)} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{igualando-a a zero, tem-se: } b_1 - 2b_2x = 0,0 \quad \therefore \quad -2b_2x = -b_1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$X_{\text{máx.}} = \frac{b_1}{2b_2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

em que: X_{máx.} é a quantidade de insumo (lâmina total de irrigação ou dose de nitrogênio) que proporciona a produtividade máxima.

A produtividade máxima (Y_{máx.}) foi calculada com base em X_{máx.} pela [Equação 10](#).

$$Y_{\text{máx.}} = b_0 - \frac{b_1^2}{4b_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

A análise econômica da produção da cana-de-açúcar foi realizada com base nos preços dos insumos (milímetro de água e quantidade de nitrogênio aplicada por hectare) e o

preço do produto (cana-de-açúcar entregue na esteira da indústria); a lâmina de irrigação e a dose de nitrogênio de máxima eficiência econômica foram calculadas pela [Equação 11](#).

$$W^* = \frac{C_w - P_i b_1}{2 P_i b_2} \dots\dots\dots (11)$$

em que: W^* é a quantidade de insumo (lâmina de irrigação ou dose de nitrogênio) que proporciona a produtividade de máxima eficiência econômica; C_w é o custo do insumo; P_i é o preço da cana-de-açúcar na esteira da indústria e b_1 e b_2 são os coeficientes da equação de produção. Considerando-se que a água não é fator restritivo e a terra é fator limitante.

O preço do milímetro de água aplicado foi calculado com base em dados reais obtidos na literatura ou em empresas que utilizam sistemas de irrigação por gotejamento e tem os custos monitorados por programas de computadores. A exemplo da Usina Seresta, localizada no Município de Teotônio Vilela, AL, que na safra 2008 / 2009 teve os custos apresentados na [Tabela 5](#). Nas [Tabelas 6 e 7](#) constam os valores do kg do nitrogênio e da tonelada de cana-de-açúcar entregue na indústria, respectivamente. O preço da tonelada de cana-de-açúcar entregue na esteira da Usina foi calculado multiplicando-se o valor do ATR pela quantidade de ATR por tonelada de cana obtida pela análise química do caldo.

Tabela 5. 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 6. Preços dos adubos 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 : [Usifertil \(Consulta por telefone em junho 2010\)](#)

Tabela 7. Preços dos açúcares totais recuperáveis (ATR), no decorrer da safra, utilizados para calcular o preço da tonelada de cana-de-açúcar entregue na indústria

ATR (MÉDIO)	Valor do ATR (R\$ kg ⁻¹)			Preço da cana-de-açúcar (R\$ t ⁻¹)		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
145,74	0,35	0,39825	0,4465	51,01	58,04	65,07

Fonte : [FAEG \(2010\)](#).

4.8. Taxa de crescimento de produção da cultura

A taxa de crescimento de produção da cultura foi determinada em valores de toneladas de cana produzidas por mês. Para isso, a produtividade agrícola (t ha⁻¹) foi dividida pelo número de meses de cultivo.

4.9. Eficiência no uso da água (EUA)

A eficiência no uso da água, expressa na forma de consumo, foi calculada dividindo-se a lâmina de irrigação aplicada mais a precipitação pluvial efetiva pela produtividade agrícola. Dessa forma, os resultados da EUA estão apresentados em milímetro de água por tonelada de colmo por hectare (mm t⁻¹ ha⁻¹). A precipitação pluvial efetiva foi calculada subtraindo-se o excesso hídrico (determinado pelo balanço hídrico da cultura) da chuva total; logo, a EUA foi calculada pela [Equação 12](#).

$$EUA = \frac{P_{ef} + I}{t \text{ ha}^{-1}} \dots\dots\dots (12)$$

em que: P_{ef} é a precipitação pluvial efetiva; I é a irrigação e t ha⁻¹ é a produtividade da cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectare.

4.10. Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada

A resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada foi avaliada com base na quantidade de cana produzida pela quantidade de nitrogênio aplicado por hectare (kg de cana kg de N⁻¹) e na quantidade de nitrogênio aplicado por tonelada de cana produzida por hectare (kg de N t⁻¹ ha⁻¹). No primeiro caso, a quantidade de cana produzida por hectare utilizada no cálculo foi obtida subtraindo-se a quantidade de cana produzida pelos tratamentos adubados com nitrogênio menos a quantidade de cana produzida pelo tratamento sem adubação nitrogenada.

4.11. Função de respostas para a análise conjunta dos fatores de produção água de irrigação e adubação nitrogenada

A função de produção para as respostas da interação dos dois insumos, lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, na cana-de-açúcar que geraram isoquantas ou linhas de mesmo valor da produtividade agrícola da cultura estudada, é semelhante à [Equação 13](#).

$$Y(L, N) = R_{00} + R_{01} \cdot N + R_{02} \cdot N^2 + R_{10} \cdot L + R_{20} \cdot L^2 + R_{11} \cdot L N \quad \dots \dots \dots (13)$$

em que L é a lâmina de irrigação total, em milímetro; N é a quantidade de nitrogênio, em kg ha⁻¹ e R₀₀, R₀₁, R₀₂, R₁₀, R₂₀ e R₁₁ são os coeficientes da equação. Esses coeficientes foram obtidos pelo programa de computador "SURFER". As análises de variância dos modelos foram feitas pelos programas SISVAR e SIGMAPLOT.

4.12. 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 14](#).

$$PMg(f) = \frac{\partial Y}{\partial f} \quad \dots \dots \dots (14)$$

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

4.13. Taxa marginal de substituição de água por nitrogênio

A taxa marginal de substituição do fator de produção lâmina de irrigação pelo fator dose de nitrogênio ($TMS_{L/N}$), foi calculada pela relação entre o produto físico marginal das doses de nitrogênio (N) e o produto físico marginal das lâminas de irrigação (L), conforme a Equação 15. 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.

$$TMS_{L/N} = \frac{PMg L}{PMg N} \dots\dots\dots (15)$$

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.

4.14. Combinação de fatores para obtenção de custo mínimo

As combinações dos fatores lâmina de irrigação (L) e adubação nitrogenada (N) que resultam no custo de produção mínimo para cada curva de isoproducto ou isoquanta, foram determinadas graficamente locando-se os pontos em que a reta da razão C_L/C_N tangencia a isoquanta da produtividade considerada. Em que, C_L é o custo do milímetro e C_N é o custo do quilograma do nitrogênio aplicado por hectare. Considerando-se também que os preços dos insumos, para efeito da análise, não variam no período do estudo, então as retas da razão supracitada são paralelas.

4.15. Região de produção racional

A região de produção racional foi determinada pela marcação dos pontos nas linhas de fronteiras onde a inclinação das isoquantas é nula ou infinita.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas analisadas nessa pesquisa foram a temperatura e a umidade relativa do ar, a precipitação pluvial e a evapotranspiração de referência. A temperatura mínima diária do ar (T_n) na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011, variou de 17,3°C (31 de agosto de 2010) a 24,5°C (06 de abril de 2010), média de 20,9°C (Figura 6). É importante ratificar que as temperaturas mínimas diárias abaixo de 18°C ocorreram pouco antes das 6 horas da manhã, momento em que as plantas ainda não apresentam altas taxas de fotossíntese. As temperaturas amenas reduzem o metabolismo dos vegetais e, em consequência, o consumo de fotoassimilados. Portanto, o crescimento da cultura ao invés de prejudicado foi favorecido pelas baixas temperaturas do ar ocorridas no início das manhãs. Nesse mesmo período a temperatura máxima (T_x) foi de 23,8°C a 35,0°C, nos dias 16 de janeiro de 2010 e 31 de março de 2009, respectivamente, com média de 29,4°C. A temperatura média do ar (T_m) ficou entre 21,3 e 29,2°C, com média geral de 25,2°C. Esses resultados indicam que a temperatura do ar na região estudada se situa dentro da faixa ótima para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar em, que de acordo com Magalhães (1987), a média geral deve ficar entre 22 e 30° C.

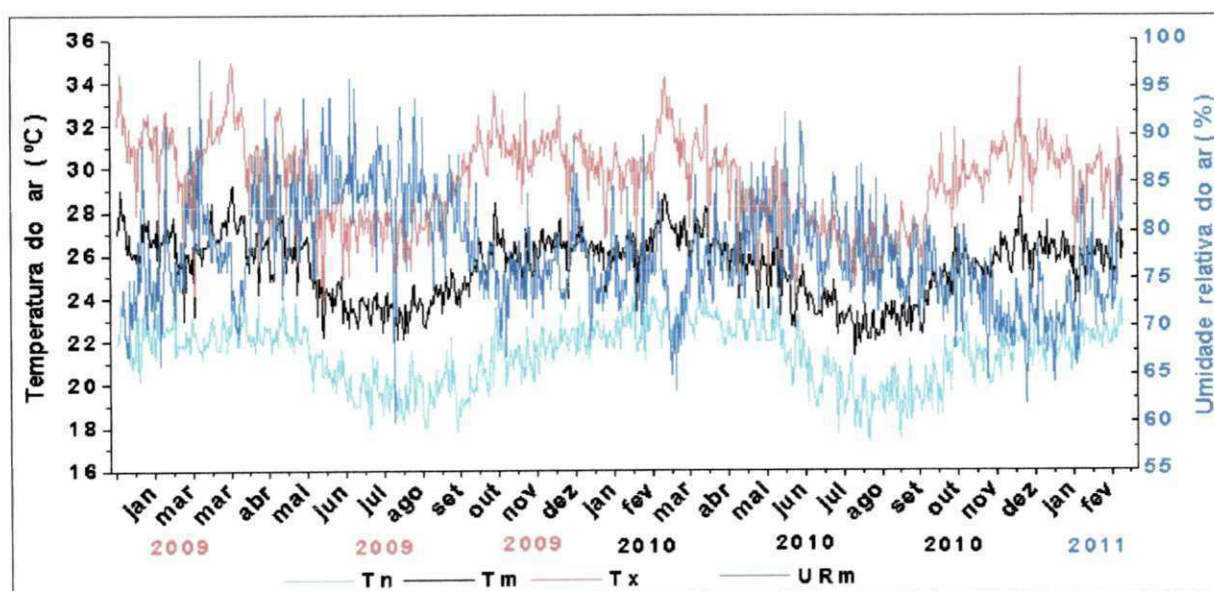


Figura 6. Temperaturas do ar, mínima (T_n), média (T_m) e máxima (T_x) diárias e umidade relativa do ar média diária (UR_m), na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011

A umidade relativa do ar (UR) média diária variou de 60 a 98%, média geral de 78%. Na [Figura 6](#) também é possível ver que a UR foi mais baixa entre os meses de novembro e março, período que coincide com a estação seca da região.

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. O terceiro decêndio de maio desse ano foi o mais chuvoso, com 246 mm ([Figura 7](#)). No ano 2010 a chuva total foi 1.879 mm, porém 1.206 mm, correspondentes a 64,2 % do total, ocorreram durante a estação chuvosa (de abril a agosto). O primeiro decêndio de junho de 2010 foi o mais chuvoso do período da pesquisa, com 283 mm, o dia 04/06/2010 se destacou pela ocorrência da chuva mais intensa dos últimos anos, 186 mm (9,9% do total anual). Nos anos 2009 e 2010, em média 66,7 % da chuva precipitou entre os meses de abril e agosto, caracterizando má distribuição da precipitação pluvial. No primeiro e segundo decêndio de fevereiro e no terceiro decêndio de março de 2009 aconteceram anomalias positivas nas médias pluviométricas da região com precipitações decenciais de 102, 105 e 246 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 decencial normal, do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, região em que está inserido o Município de Rio Largo, se encontra na [Tabela 8](#).

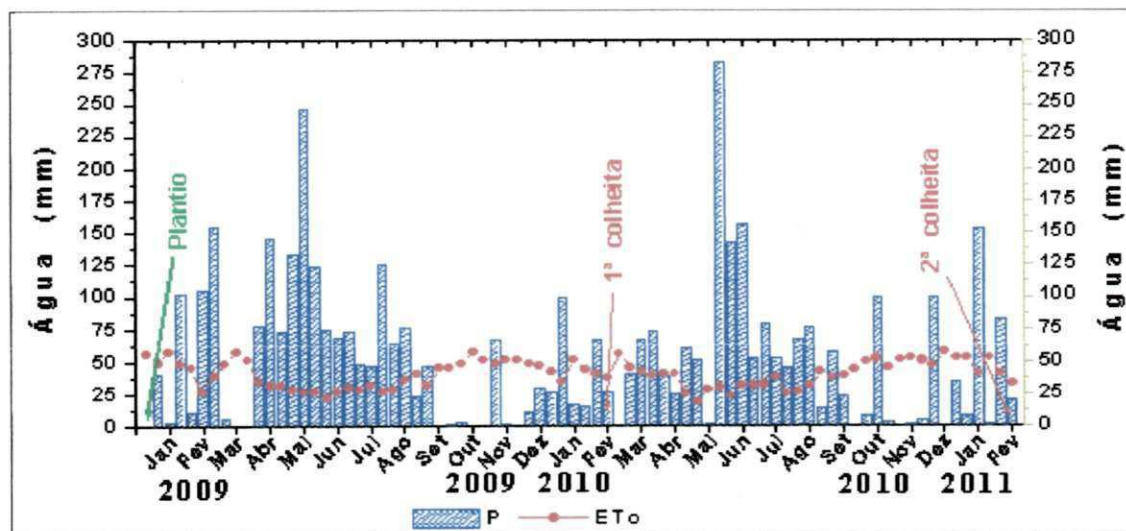


Figura 7. Precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ETo), médias decenciais, na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011

A evapotranspiração de referência (ETo) total nos anos de 2009 e 2010 foi 1.456 e 1.427 mm, respectivamente. E, entre o plantio e a suspensão da irrigação aos trinta dias antes da primeira colheita (do terceiro decêndio de janeiro de 2009 ao primeiro decêndio de janeiro de 2010 – 355 dias de duração) foi 1.393 mm e variou de 22,8 a 58,0 mm, no segundo

decêndio de junho e no terceiro decêndio de dezembro de 2009, média de 2,3 a 5,3 mm dia⁻¹, respectivamente (Figura 7). Durante o segundo ciclo de cultivo, do terceiro decêndio de fevereiro de 2010 ao primeiro decêndio de janeiro de 2011 (quando foi encerrada a irrigação), a ETo totalizou 1.353 mm em 323 dias, com o valor decencial mínimo de 19,7 mm no segundo decêndio de maio e máximo de 57,1 mm no terceiro decêndio dezembro de 2010, em torno de 2,0 e 5,2 mm dia⁻¹, respectivamente. Os maiores valores de ETo foram registrados no período de setembro a fevereiro e os menores entre abril e julho; sempre em ordem inversa à intensidade da precipitação pluvial.

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.

Tabela 8. Normal climatológica da precipitação pluvial, média decencial, no Tabuleiro Costeiro de Maceió – AL (período de 1972 a 1996)

DECÊNDIO	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. Balanço Hídrico

A evapotranspiração da cultura (ETc) da cana-de-açúcar nos 397 dias do primeiro ciclo de cultivo variou de 2,5 a 6,3 mm dia⁻¹, total de 1.642 mm (média de 4,13 mm dia⁻¹), no mesmo período choveu 2.137 mm. Dessa chuva total, 1.100 mm, correspondente a 51,5 % se perdeu na forma de excesso hídrico (escoado superficialmente ou percolado para as camadas mais profundas do solo). No balanço hídrico apresentado na Figura 8, observa-se que o excesso hídrico foi dividido em dois períodos: do primeiro decêndio de fevereiro ao primeiro decêndio de março 213 mm e do terceiro decêndio de abril ao terceiro decêndio de

agosto, 887 mm. Com isso, subtraindo-se o excedente hídrico da precipitação pluvial total chega-se a uma chuva efetiva de 1.037 mm. Dessa forma, sendo a precipitação pluvial efetiva a quantidade de água que, de fato, fica disponível para as plantas cultivadas, deduz-se que houve deficiência hídrica de 605 mm e ainda na [Figura 8](#) também pode ser visto que essa deficiência foi dividida em dois períodos. Nesse contexto, ratifica-se que a evapotranspiração real (ET_r) do ciclo de cultivo da cana-planta (cultivada sem irrigação) foi 1.037 mm.

O segundo ciclo de cultivo ou ciclo de produção da cana-soca durou 371 dias (de 23/02/2010 a 28/02/2011), nesse período choveu 1.976 mm e a ET_c somou 1.628 mm, variando de 1,9 mm dia⁻¹, no segundo decêndio de maio, a 6,45 mm dia⁻¹ no terceiro decêndio de dezembro (média geral de 4,4 mm dia⁻¹). A deficiência hídrica no início do ciclo de cultivo da cana-soca foi somente 23 mm e no final, entre os meses de setembro de 2010 a fevereiro de 2011, foi 438 mm, total de 461 mm. O excedente de água, tal como na cana-planta, também foi dividido em duas épocas: de fevereiro até agosto de 2010, 765 mm, e 44 mm no terceiro decêndio de janeiro de 2011, acumulando 809 mm.

O déficit e o excesso hídrico no cultivo da cana-soca foram menores que no cultivo da cana-planta e isso é um indicativo de que a distribuição das chuvas no período de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011 foi melhor do que no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2010. Por isso, apesar de ter chovido menos no segundo ciclo de produção, a precipitação pluvial efetiva, que também corresponde à ET_r do tratamento de sequeiro, somou 1.167 mm no cultivo da cana-soca e foi maior que no cultivo da cana-planta.

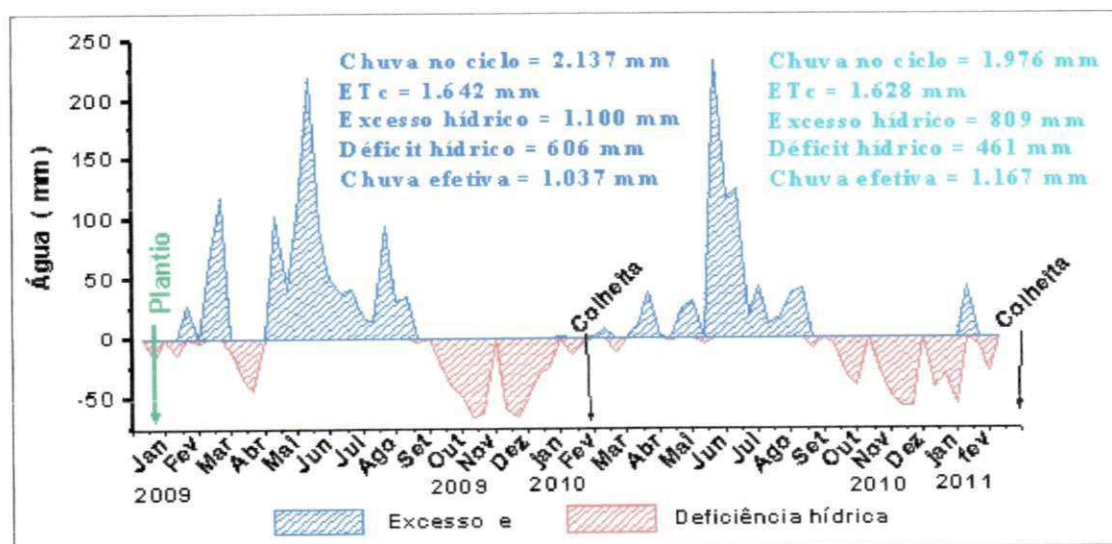


Figura 8. Balanço hídrico decendial da cultura da cana-de-açúcar, com ênfase para o excesso e a deficiência hídrica, em dois ciclos de produção, na região de Rio Largo, AL, no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011

Os valores médios da precipitação pluvial e da ETc da cana-de-açúcar nos dois ciclos de cultivo discutidos nesse trabalho foram: 2.056 mm e 1.635 mm (5,37 e 4,25 mm dia⁻¹), respectivamente. Mas devido à irregularidade da chuva, no tempo, ocorreu um déficit hídrico médio de 533 mm e um excedente hídrico médio de 954 mm. A precipitação pluvial efetiva média foi 1.102 mm, em um período médio de 383 dias. [Watanabe et al. \(2004\)](#), no nordeste da Tailândia, utilizando o método do balanço de energia da razão de Bowen (BERB) em cana-de-açúcar observaram que a ETc média varia de 2,0 a 6,0 mm dia⁻¹. [Inman-Bamber & Smith \(2005\)](#), usando também a técnica do BERB, encontraram ETc máxima de 8,0 mm dia⁻¹ na Austrália e 7,0 mm dia⁻¹ em Swaziland mas também relatam medidas lisimétricas máximas de 6,8 mm dia⁻¹, na Austrália. [Singh et al. \(2007\)](#), em solo areno limoso, contabilizou o uso de água médio de 1.362 e 1.161 mm por ano em cana-planta e cana-soca, respectivamente. [Moroizumi, et al. \(2009\)](#), trabalhando com cana-de-açúcar e arroz no nordeste da Tailândia, observaram que a evapotranspiração média nas áreas de baixio é 3,7 mm dia⁻¹ e nas encostas ou terras altas é 4,2 mm dia⁻¹. [Lyra et al. \(2007\)](#), pesquisando a ETc da cana de açúcar, no período de agosto de 2000 a novembro de 2001, na região climática de Maceió, AL, encontraram uma ETc total de 2.050 mm, em 450 dias, média de 4,6 mm dia⁻¹.

[Teodoro et al. \(2009\)](#), na mesma região dessa pesquisa, no período de setembro de 2005 a novembro de 2006 (420 dias de cultivo), contabilizaram 869 mm de déficit hídrico e 837 mm de excesso hídrico. Portanto, com base nos resultados desse balanço hídrico de dois ciclos de produção da cultura da cana-de-açúcar na região de Rio Largo, AL e nos dados de [Teodoro et al. \(2009\)](#) é possível afirmar que a má distribuição das chuvas é responsável pela deficiência hídrica no cultivo de cana-de-açúcar na referida região. No entanto, como o excesso hídrico é maior que o déficit hídrico, então se forem construídas estruturas para armazenamento de água, como represas ou barragens, haverá água suficiente para irrigar plenamente todo canavial da região.

5.3. Lâminas de Irrigação

As lâminas de irrigação bruta totais aplicadas em cana-planta variaram de 157 a 873 mm e em cana-soca de 127 mm a 734 mm, nos tratamentos irrigados com 25 e 150 % da ETo, respectivamente ([Tabela 9](#)). Nos valores das lâminas de irrigação aplicadas em cana-planta 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 o primeiro decêndio de abril de 2009, foram aplicados 94 mm de irrigação bruta em todo experimento, exceto no tratamento de sequeiro, porque nesse período, como pode ser visto na [Figura 7](#), 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). As lâminas totais analisadas nesse estudo foram aplicadas entre o terceiro decêndio de setembro de 2009 e o primeiro decêndio de janeiro de 2010, nesse período ainda choveu 142 mm e a ETo total foi 537 mm. Na [Figura 9](#) observam-se a precipitação pluvial e as lâminas de irrigação aplicadas em cada tratamento, em função das frações da ETo, durante os dois ciclos de cultivo do experimento em discussão.

Tabela 9. Precipitação pluvial total e efetiva, lâminas de irrigação brutas totais aplicadas em função dos respectivos tratamentos, a água total (precipitação pluvial efetiva mais irrigação: $P_{\text{efet.}} + \text{Irrig.}$) e produtividade agrícola da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) durante os ciclos de cultivo da cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL

Ano	Ciclo	Dias	Tratamento		Precipitação pluvial (ciclo)			t ha^{-1}
			(% ETo)	Total	Efetiva	Irrigação	$P_{\text{efet.}} + \text{Irrig.}$	
2009	Planta	397	0,00	2.137	1.035	0	1.035	118,94
			0,25		1.035	157	1.192	140,02
			0,50		1.030	312	1.342	157,89
			0,75		986	448	1.434	167,89
			1,00		904	585	1.489	173,64
			1,25		776	741	1.517	176,41
			1,50		776	873	1.649	188,96
			2010		Soca	371	0,00	1.976
0,25	1.164	127	1.291	119,78				
0,50	1.153	240	1.393	127,56				
0,75	1.116	346	1.462	133,63				
1,00	1.037	473	1.510	138,21				
1,25	944	587	1.531	140,30				
1,50	807	734	1.541	141,28				

No ciclo de produção da cana-soca, as lâminas de irrigação brutas totais ([Tabela 9](#)) foram aplicadas entre o primeiro decêndio de outubro de 2010 e o primeiro decêndio de janeiro de 2011 (102 dias). Nesse período a evapotranspiração de referência somou 504 mm e também choveu 99,1 mm no terceiro decêndio de outubro e 98,8 mm no segundo decêndio de dezembro de 2010. Em relação ao pequeno déficit hídrico (23 mm) verificado na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar, [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. [Singh et al. \(2007\)](#), na Índia subtropical, utilizaram a *evaporação do*

tanque classe "A" (EV) como referência para determinar as lâminas de irrigação em cana-de-açúcar e observaram que, no ciclo de produção de cana-planta, a produtividade máxima foi obtida com a lâmina de irrigação total aplicada correspondente a 100 % EV, sendo que a eficiência no uso da água (EUA) foi maior no tratamento de apenas 25 % da EV.

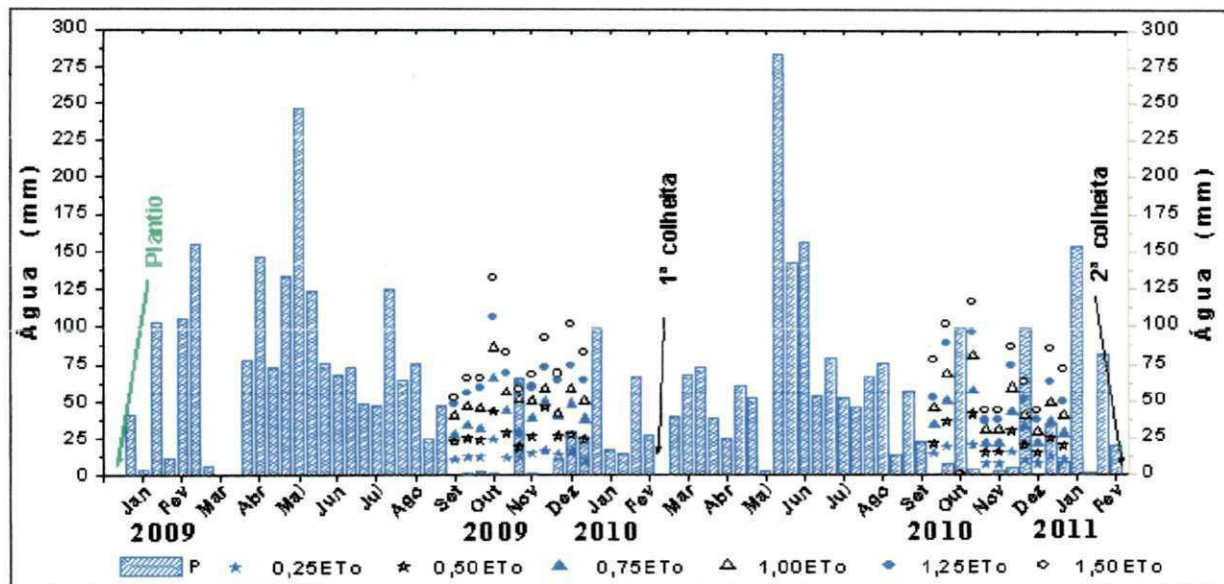


Figura 9. Precipitação pluvial e as lâminas de irrigação aplicadas em função das frações da evapotranspiração de referência (ETo), durante os ciclos de cultivo da cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL

5.4. Produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação

A análise de variância da produtividade agrícola dos primeiro e segundo ciclos de produção (cana-planta e cana-soca), apresentada na [Tabela 10](#), mostrou que as lâminas de irrigação e as doses de nitrogênio aplicadas em cana-planta foram significativas a nível de 1 e 5 %, respectivamente. Mas a interação entre esses dois fatores não foi significativa. Em cana-soca, apenas a lâmina de irrigação teve significância a nível de 1 % e os demais parâmetros (doses de nitrogênio e a interação entre os dois fatores de produção) não foram estatisticamente significativos.

Os coeficientes de variação (CV) das parcelas (lâminas de irrigação) foram 14,35 e 14,57 % e os das subparcelas (doses de nitrogênio) foram 10,60 e 13,25 % em cana-planta e cana-soca, na mesma ordem. Esses valores de CV indicam que a precisão estatística do experimento foi boa. [Ferreira \(2000\)](#) escreveu que para melhorar a eficiência dos

experimentos em parcelas subdivididas, os pesquisadores deverão colocar o grupo de tratamentos de maior importância, nesse caso as lâminas de irrigação, nas subparcelas, tendo em vista que o erro experimental das subparcelas é, geralmente, menor que o da parcela porque o grau de liberdade (GL) do resíduo "b" (subparcela) é maior ou igual ao GL do resíduo "a" (parcela), ou aumentar o número de repetições do experimento. Mas, por conta da limitação de área e de recursos financeiros, não foi possível adotar esse procedimento no experimento em discussão.

Tabela 10. Resumo da análise de variância da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, em cana-planta e cana-soca nas safras 2009/2010 e 2010/2011

	FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Cana - Planta	L	6	70.465,571429	11.744,261905	22,117	0,0000***
	BLOCO	3	4.302,135714	1.434,045238	2,701	0,0763
	Erro 1	18	9.557,914286	530,995238		
	N	4	3.893,785714	973,446429	3,363	0,0133**
	L x N	24	6.271,714286	261,321429	0,903	0,5977 ^{ns}
	Erro 2	84	24.317,700000	289,496429		
	Total corrigido	139	118.808,821429			
	CV 1 (%) =	14,35				
	CV 2 (%) =	10,60				
	Média geral (t ha ⁻¹) =	160,53	Número de observações : 140			
Cana - Soca	L	6	15.408,713857	2.568,118976	7,106	0,0005***
	BLOCO	3	10.546,781929	3.515,593976	9,728	0,0005
	Erro 1	18	6.504,861571	361,381198		
	N	4	1.726,018286	431,504571	1,445	0,2263^{ns}
	L x N	24	4.367,269714	181,969571	0,609	0,9152 ^{ns}
	Erro 2	84	25.079,224000	298,562190		
	Total corrigido	139	63.632,869357			
	CV 1 (%) =	14,57				
	CV 2 (%) =	13,25				
	Média geral (t ha ⁻¹) =	130,45	Número de observações: 140			

*** Significativo a 1%; ** Significativo a 5% e NS não significativo

A produtividade agrícola, média geral, no primeiro ciclo de produção foi 160,53 t ha⁻¹ e no segundo ciclo 130,45 t ha⁻¹, uma diferença de aproximadamente 30,0 t ha⁻¹. Parte dessa diferença pode ser atribuída ao tempo de cultivo que, no primeiro ciclo, foi 13 meses e no segundo 12 meses. Pois, considerando-se que a produção da cana-de-açúcar irrigada cresce de 10 a 15 toneladas por mês, pode-se afirmar que, em média, 12,5 t ha⁻¹ de cana produzida a menos na cana-soca foram por conta do menor tempo de cultivo. O restante da diferença pode ser atribuído ao menor vigor vegetativo da socaria e à incidência de pragas e doenças que

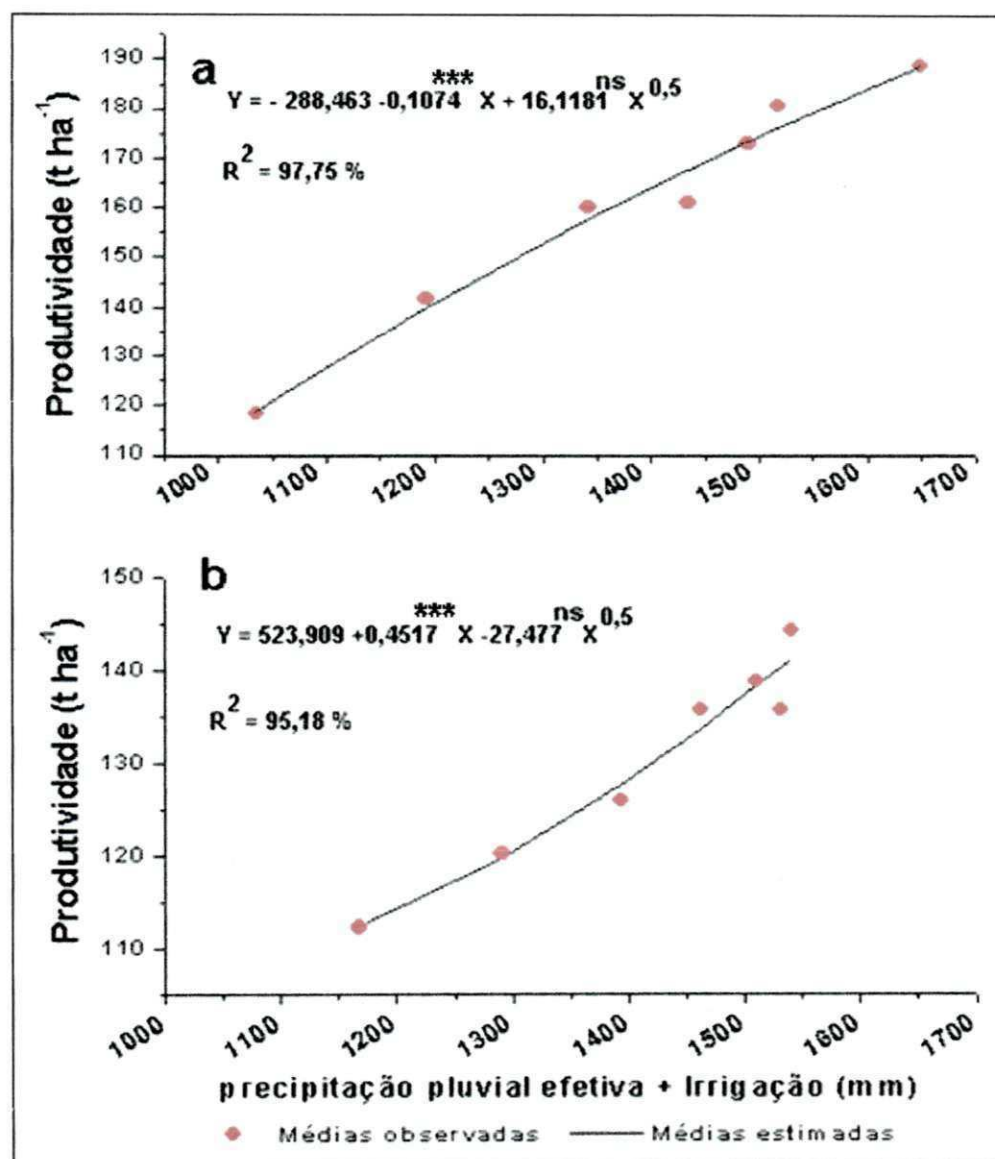
umentam com a idade do canavial provocando falhas de brotação e redução no crescimento das plantas.

A produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação bruta total, apresentada na [Figura 10](#), variou de 118,0 t ha⁻¹ a 188,0 t ha⁻¹, em cana-planta e de 112,0 t ha⁻¹ a 144,0 t ha⁻¹, em cana-soca. A diferença entre a produtividade agrícola do tratamento sem irrigação (sequeiro) e o tratamento com a maior lâmina de irrigação bruta (1,50 ETo), em cana-planta, foi 70,0 t ha⁻¹ e em cana-soca somente 32,0 t ha⁻¹, média de 51,0 t ha⁻¹. Essas diferenças na produção da cana-planta e da cana-soca correspondem, respectivamente, a 59,3 e 28,6 % a mais, em relação à produtividade do tratamento de sequeiro. Nessa Figura se observa, também, que a curva de regressão por raiz quadrada teve uma boa relação entre as produtividades estimadas e observadas, com coeficientes de regressão (r^2) de 97,71 % no primeiro e 95,18 % no segundo ciclo de produção.

Outros pesquisadores também confirmaram ganhos de produtividade agrícola ao utilizarem irrigação e fertirrigação na cana-de-açúcar. [Dalri & Cruz \(2008\)](#) constataram que a fertirrigação aumenta a produção de colmos em 43,5 e 67,2%, com lâminas de irrigação de 520 e 740 mm no segundo e no terceiro ciclo de produção, respectivamente. Em cultivos de sequeiro, ainda é possível encontrar alguns resultados nos periódicos especializados. [Basanta et al. \(2003\)](#), na região de Piracicaba no Estado de São Paulo, Brasil, conseguiram produzir 112 e 120 t ha⁻¹ em cana-planta e cana-soca, respectivamente. Na região de Pirassununga-SP (Brasil), [Franco et al. \(2009\)](#) relataram produções de 138 e 141 toneladas de cana por hectare (TCH) e 18,89 e 20,28 toneladas de açúcar por hectare, respectivamente e [Marques et al. \(2007\)](#) cultivaram no oeste paulista (Brasil), em regime de sequeiro, as variedades RB867515 e RB72454, consideradas tardias (canas para serem colhidas em final de safras), e obtiveram produtividades de 79,1 e 74,8 t ha⁻¹, respectivamente.

Os resultados obtidos nesse estudo indicam que a resposta da cana-de-açúcar à irrigação é maior quando a quantidade de água aplicada fica em torno de 25 % da ETo pois, ainda na [Figura 10](#), é possível ver que o coeficiente de inclinação da curva no primeiro intervalo (entre a lâmina de irrigação bruta igual 0,00 ETo e 0,25 ETo) é maior que no restante da curva (entre 0,25 ETo e 1,50 ETo), cujos valores no primeiro intervalo são 0,16 e 0,09 e no segundo intervalo 0,06 e 0,04 respectivamente para cana-planta ([Figura 10a](#)) e cana-soca ([Figura 10b](#)). A redução da resposta dos cultivos agrícolas com o aumento das lâminas de irrigação pode ser explicada pela Lei dos Mínimos de Liebig (1840) porque, quando o teor de umidade do solo deixa de ser limitante para o crescimento das plantas outros fatores de produção, como nutrientes, temperatura do ar, luz etc., começam a limitar a produtividade

agrícola. Frizzone (1993), também já escreveu que “a irrigação é tão menos eficiente quanto mais a quantidade de água aplicada se aproxima da irrigação sem déficit.”

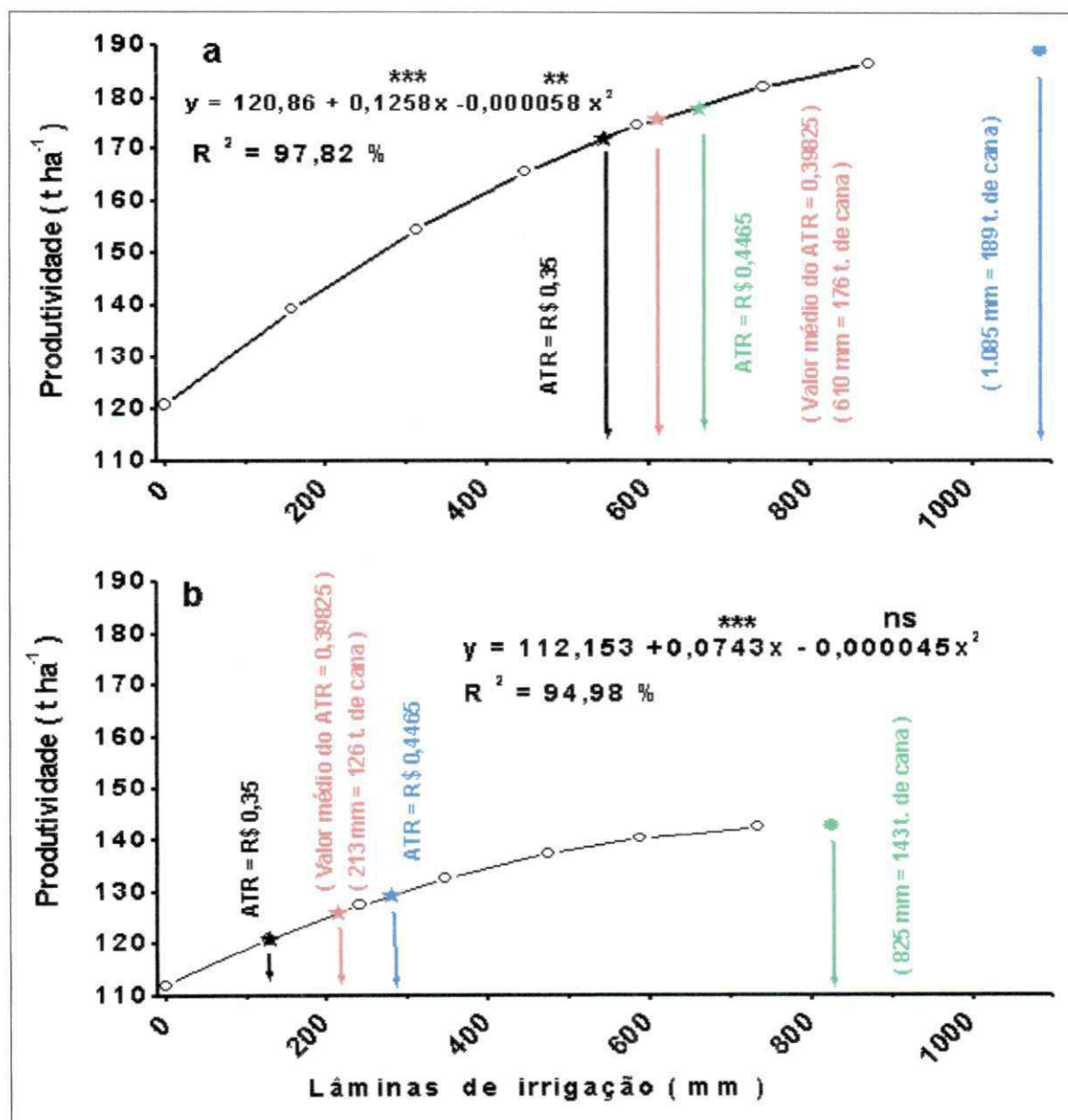


*** Significativo a 1% e NS não significativo

Figura 10. Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em toneladas de cana por hectare, em função de lâminas de irrigação (curva de regressão raiz quadrada), em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

As curvas de regressão calculadas por polinômio de segundo grau e apresentadas na Figura 11 indicam que as produtividades física máxima em função da quantidade total de água aplicada seriam 189,0 e 146,0 t ha⁻¹ se fossem aplicadas lâminas de irrigação de 1.085 e 825 mm, em cana-planta (Figura 11a) e cana-soca (Figura 11b), respectivamente. Essas lâminas de irrigação não foram utilizadas porque as mesmas corresponderiam a 190 e 165 % da ETo e os tratamentos de irrigação propostos nessa pesquisa foram planejados para repor

somente até 150 % da evapotranspiração de referência. No modelo obtido por [Farias \(2006\)](#) para a produtividade agrícola em função da lâmina total aplicada, observa-se que a cana-de-açúcar também responderia a irrigações superiores a 100 % da ETc.



***Significativo a 1%; **Significativo a 5% e NS não significativo

Figura 11. Produtividade agrícola física máxima e de máxima eficiência econômica em função de lâminas de irrigação em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

A produtividade agrícola de máxima eficiência econômica varia de acordo com o custo do insumo e o preço do produto. Nessa análise foram considerados o preço dos açúcares totais recuperáveis (ATR) e o custo por milímetro de água aplicada. Na [Figura 11](#) observa-se que a produtividade de máxima eficiência econômica no primeiro ciclo de produção, com o

preço médio do ATR de R\$ 0,39825 e o milímetro aplicado custando R\$ 3,20, é 176 t ha⁻¹, seria obtida com 610 mm de irrigação. Na [Figura 11a](#) é possível observar que, para os valores de ATR de R\$ 0,35 e R\$ 0,4466, as produtividades de máxima eficiência econômica seriam 172 e 179 t ha⁻¹, conseguidas com 544 e 661 milímetros de irrigação, respectivamente.

Para o cultivo da primeira soca da cana-de-açúcar, a lâmina de máxima eficiência econômica, com o ATR valendo R\$ 0,39825, é 213 mm e proporcionaria a produção de 126 t ha⁻¹. Com o ATR valendo R\$ 0,35 e R\$ 0,4466, as lâminas de irrigação economicamente mais viáveis seriam 128 e 279 mm e as respectivas produtividades obtidas seriam 121 e 129 t ha⁻¹ ([Figura 11b](#)). Nota-se, no ciclo de produção da cana-soca, que as respostas financeiras às lâminas de irrigação são menores do que no de cana-planta. Isso aconteceu porque, durante o cultivo da cana-soca, as chuvas tiveram distribuição melhor que no cultivo da cana-planta. Outro motivo para essa redução de resposta à irrigação é o fato do crescimento e do desenvolvimento das socarias serem mais limitados devido à maior incidência de pragas e doenças e à diminuição do vigor vegetativo das soqueiras. Esses resultados diferem dos observados por [Farias \(2006\)](#) que, trabalhando com pivô fixo na região de Capim, Paraíba, concluiu que a lâmina de irrigação de máxima eficiência econômica (maior lucro bruto) foi 832,1 mm.

5.5. Taxa de crescimento da produção da cana-de-açúcar

A taxa de crescimento da produção da cana-de-açúcar no primeiro ciclo de cultivo variou de 9,3 a 14,4 toneladas de cana por mês (média de 12,3 t mês⁻¹) e no segundo ciclo foi de 9,3 a 11,9 t mês⁻¹ (média 10,8 t mês⁻¹) em cultivo de sequeiro e irrigado com 150 % da evapotranspiração de referência, respectivamente ([Figura 12](#)). O aumento da taxa de crescimento da produção da cana-de-açúcar tem relação direta com o aumento da lâmina de irrigação e o declínio do aumento dessa taxa no intervalo entre o tratamento irrigado com 1,25 ETo e 1,50 ETo também é explicado pela Lei dos Mínimos de Liebig (1840) e pela citação de [Frizzone \(1993\)](#).

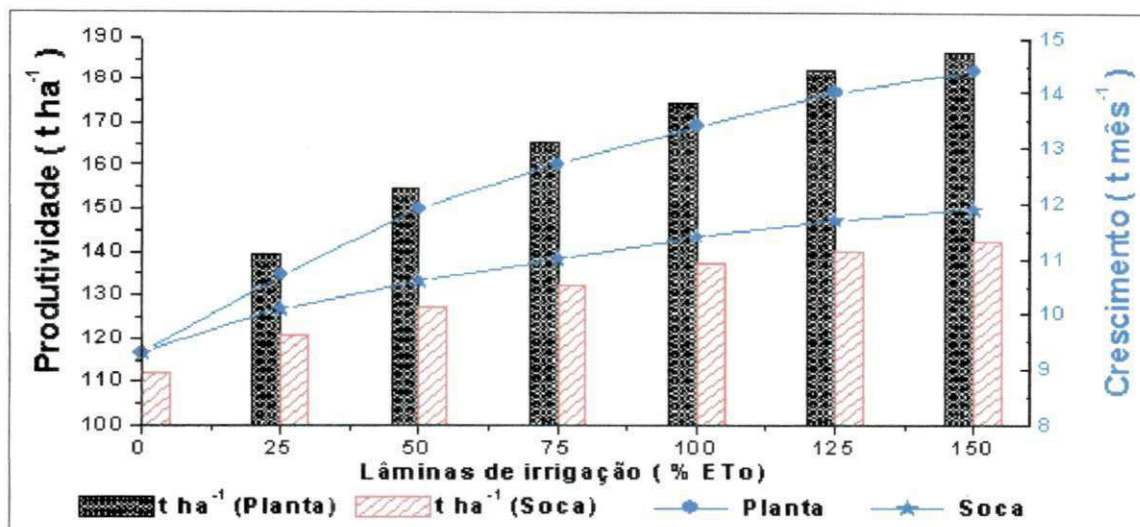


Figura 12. Taxa de crescimento total da produção da cana-de-açúcar em toneladas de cana por mês ($t\ mês^{-1}$) da cana-planta (planta) e da cana-soca (soca) e produtividade agrícola da cana-planta ($t\ ha^{-1}$ planta) e cana-soca ($t\ ha^{-1}$ Soca), em função de lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

5.6. Eficiência no uso da água (EUA)

Nos resultados apresentados na [Figura 13](#) observa-se que a quantidade de água consumida por tonelada de cana produzida no primeiro ciclo de produção foi menor que no segundo e a mesma aumenta, nos dois ciclos, numa relação direta com a quantidade de água aplicada porque, quando a irrigação elimina a deficiência hídrica, o crescimento das plantas passa a ser limitado por outros fatores de produção como deficiência nutricional, luminosidade, pragas, doenças etc., de modo que a EUA média, tanto da cana-planta como da cana-soca, coincide com os valores observados nos dois ciclos de cultivos irrigados com a lâmina de irrigação média (tratamentos irrigados com 75 % da ETo).

A eficiência no uso da água na cana-de-açúcar, na literatura internacional, normalmente é analisada em toneladas de cana por mega litros de água utilizada ($t\ ML^{-1}$) e em kg de cana por metro cúbico de água utilizada ($kg\ m^{-3}$). Mas, para facilitar a análise econômica da irrigação, os dados de EUA também podem ser interpretados com base no consumo de água, expresso em milímetros de água consumida por tonelada de cana produzida ($mm\ t^{-1}$). A EUA, no cultivo da cana-planta, variou de $8,6\ mm\ t^{-1}$ ($11,63\ kg\ m^{-3}$), no tratamento sem irrigação, a $10,3\ mm\ t^{-1}$ ($9,71\ kg\ m^{-3}$), no tratamento com irrigação equivalente a 1,50 ETo ([Figura 13](#)); a média de $9,1\ mm\ t^{-1}$ ficou próxima do consumo observado no tratamento de 0,75 ETo que foi de $9,0\ mm\ t^{-1}$ ($11,11\ kg\ m^{-3}$).

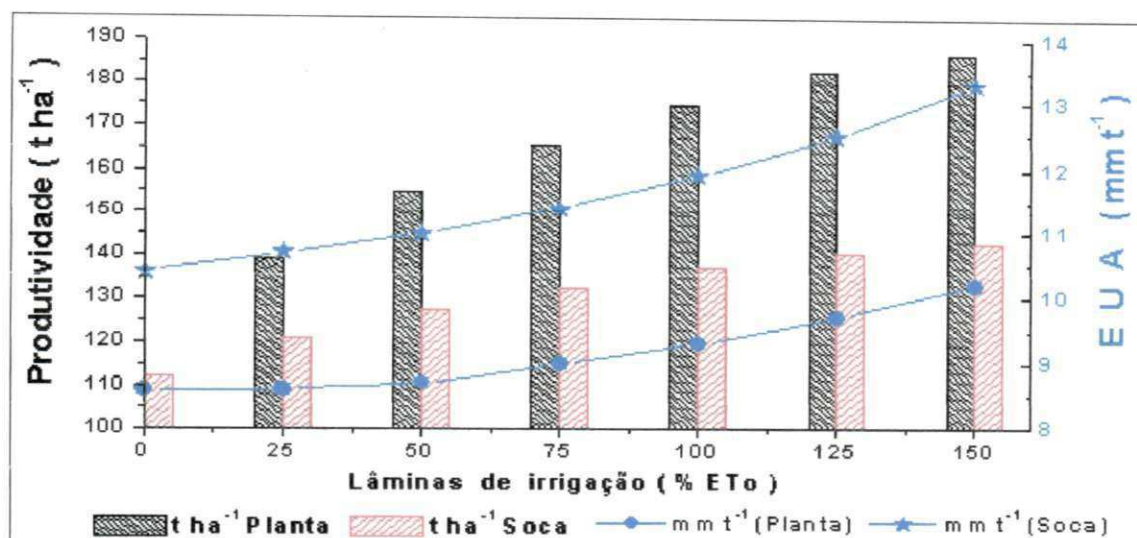


Figura 13. Eficiência do uso da água de irrigação (EUA) na cana-de-açúcar, na forma de consumo, em milímetros de água consumida por tonelada de cana produzida (mm t^{-1}), no ciclo de cana-planta (Planta) e cana-soca (Soca) e produtividade agrícola da cana-planta (t ha^{-1} Planta) e cana-soca (t ha^{-1} Soca), em função de lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

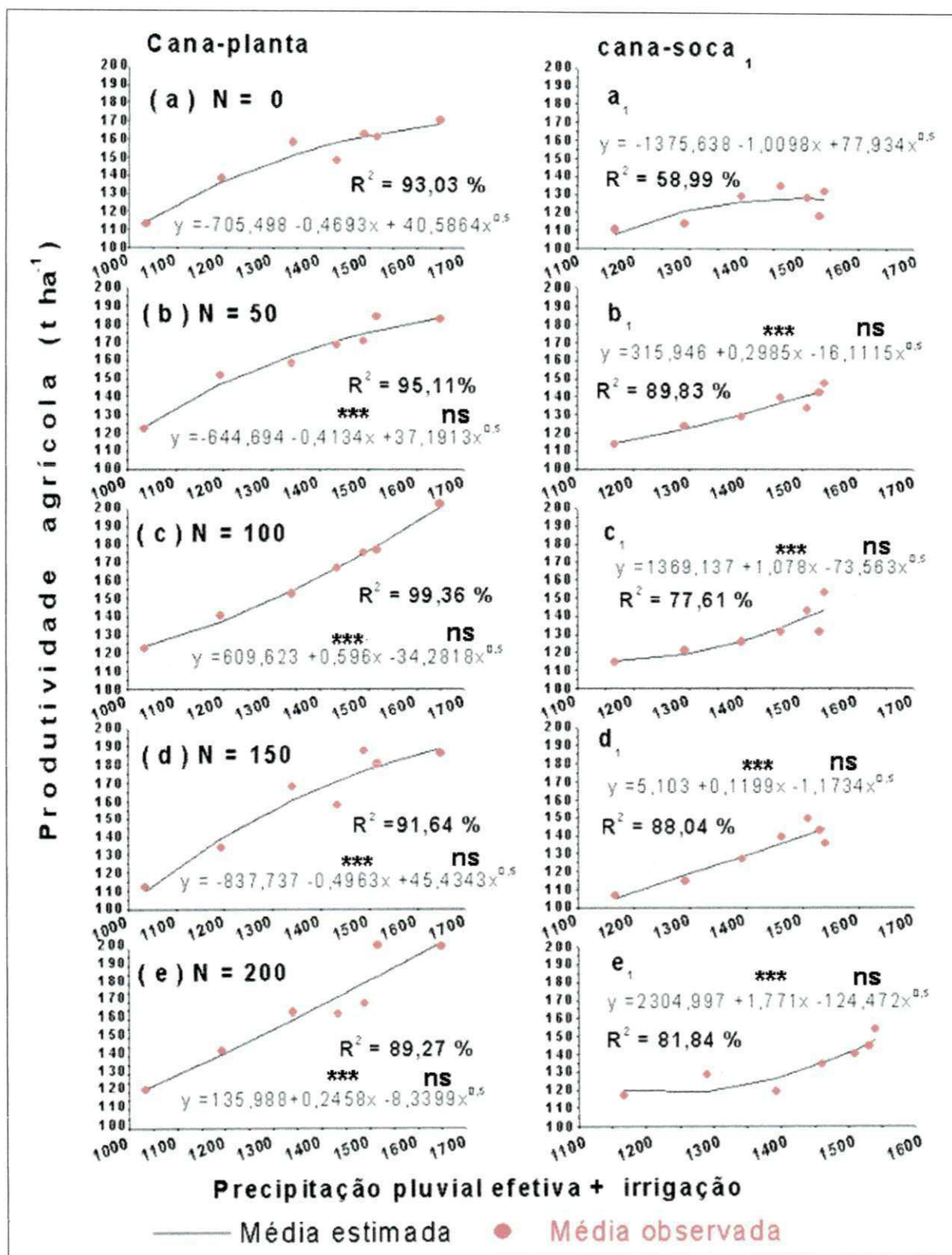
No cultivo da cana-soca, a EUA foi de $10,4 \text{ mm t}^{-1}$ ($9,61 \text{ kg m}^{-3}$) no tratamento de sequeiro e $13,3 \text{ mm t}^{-1}$ ($7,52 \text{ kg m}^{-3}$) no tratamento 1,50 ETo, com média de $11,6 \text{ mm t}^{-1}$ ($8,62 \text{ kg m}^{-3}$) que também ficou próxima dos $11,4 \text{ mm t}^{-1}$ ($8,77 \text{ kg m}^{-3}$) consumidos pelo tratamento irrigado com 75 % da ETo. Esses resultados indicam que a EUA diminui com o aumento da quantidade de água aplicada via irrigação. Tendência semelhante também foi observada por Singh et al. (2007), na Índia subtropical, ao constatarem que a cana-de-açúcar irrigada com apenas 25% da evaporação do tanque classe “A” (EV) produziu $78 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ($12,8 \text{ mm t}^{-1}$) e, ao irrigar com 125 % da EV, a EUA baixou para $59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, equivalente a $16,9 \text{ mm t}^{-1}$. Wiedenfeld & Enciso (2008), avaliaram os valores de 1,00, 1,25 e 1,50 para o kc máximo (equivalente a 100, 125 e 150 % da ETo) da cana-de-açúcar no sul do Tera – USA e observaram uma EUA em cana-planta de 8,0, 7,5 e 6,0 Mg ML^{-1} (equivalente a 12,50, 13,33 e $16,67 \text{ mm t}^{-1}$), respectivamente e em cana-soca a EUA foi 9,4, 8,1 e 7,7 Mg ML^{-1} (equivalente a 10,64, 12,34 e $12,99 \text{ mm t}^{-1}$).

Farias et al. (2008), ao contrário dos resultados relatados nessa pesquisa, observaram que a EUA aumenta em relação direta com o acréscimo das lâminas de irrigação, saindo de $3,99 \text{ kg m}^{-3}$ ($25,06 \text{ mm t}^{-1}$), em cana sem irrigação, para $7,22 \text{ kg m}^{-3}$ ($13,85 \text{ mm t}^{-1}$) em cana irrigada com 100 % da evapotranspiração da cultura, no entanto, em outro experimento, Farias et al. (2011) também concluíram que a EUA é maior na cana-de-açúcar cultivada em regime de sequeiro. Gava et al. (2008), trabalhando com variedades de cana-de-açúcar na região de Jaú, SP, encontraram valores de EUA de 12,8 milímetros por tonelada de

colmo (variedade RB867515) e 16,2 milímetros por tonelada de colmo (variedade SP80-3280), ambas em cultivo de sequeiro; isso indica que existem variedades mais responsivas e mais eficientes quanto ao uso da água.

A interação das lâminas de irrigação bruta com as doses de nitrogênio utilizadas nessa pesquisa não foi estatisticamente significativa, indicando que não houve efeito sinérgico entre os dois fatores de produção avaliados, mas, ao desdobrar as curvas da produtividade agrícola em função da quantidade de água aplicada nas diferentes doses de nitrogênio, são observadas tendências como: ao se usar zero de nitrogênio (Figura 14a e 14a₁), a cana responde bem somente até 250 mm, em cana-planta e 150 mm em cana-soca. E, à medida que aumenta a adubação nitrogenada, a cana responde a maiores lâminas de irrigação, de modo que na dose de 200 kg de nitrogênio por hectare (Figura 14e e 14e₁) o aumento é praticamente linear e tende para o infinito.

A produtividade agrícola da cana-de-açúcar adubada sem nitrogênio variou de 112 a 108,2 t ha⁻¹ no tratamento 0,00 ETo (sequeiro) da cana-planta e da cana-soca, respectivamente. E, de 168 a 127,5 t ha⁻¹ no tratamento irrigado com 150 % da ETo em cana-planta e cana-soca, na mesma ordem. No tratamento com 200 kg de nitrogênio por hectare a cana produziu de 122 a 202 t ha⁻¹ e 119,6 a 147,8 t ha⁻¹ ao se irrigar com 0,00 ETo e 1,50 ETo nos primeiro e segundo ciclos de cultivo, respectivamente (Figuras 14e e 14e₁). Os coeficientes de regressão (r^2) apresentaram boa correlação entre os dados estimados e os observados, exceto o r^2 da equação da Figura 14a₁ que foi 58,99 %; os demais variaram de 77,61 a 99,36 %.



***Significativo a 1% e ns não significativo

Figura 14. Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação nos diferentes níveis de adubação nitrogenada (curvas de regressão em raiz quadrada, desdobramento), em cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

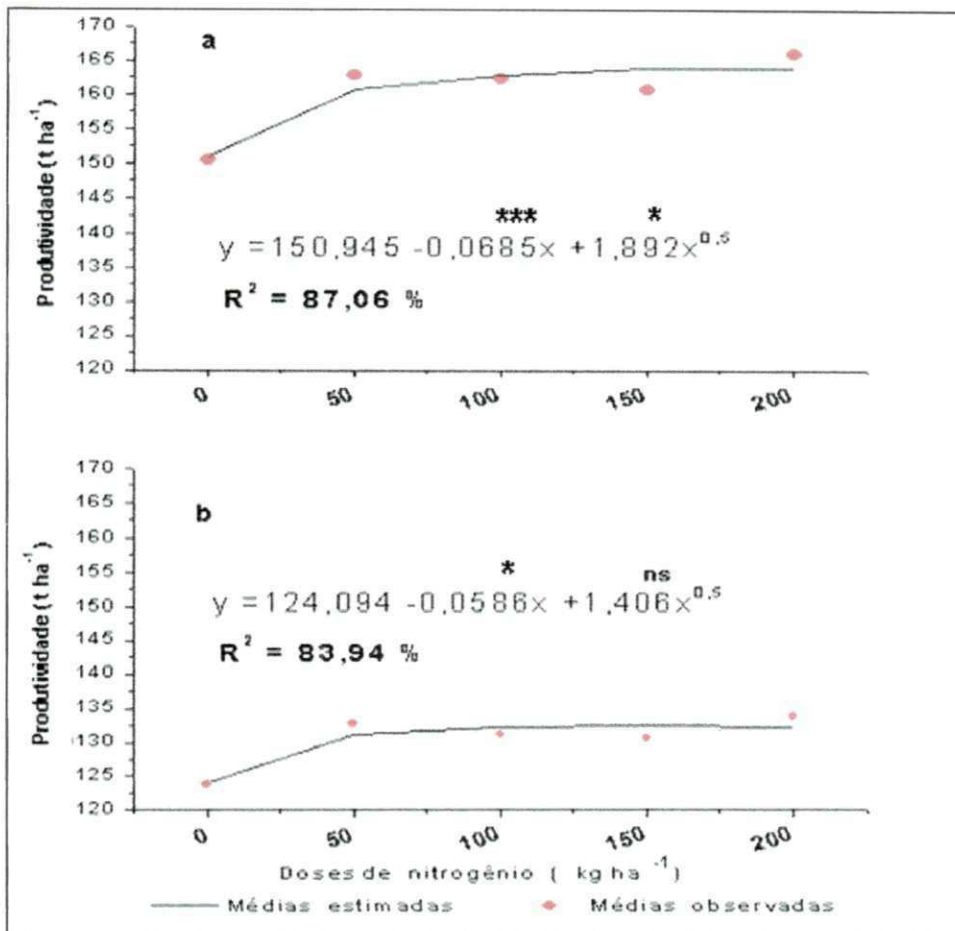
5.7. Produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar, em função das doses de nitrogênio

Na [Figura 15](#) constam as curvas de regressão, por raiz quadrada, de produtividades agrícola, médias estimadas e observadas, expressas em toneladas de cana por hectare (TCH), da cana-planta e cana-soca, em função das doses de nitrogênio (N), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011. As correlações de produtividade estimadas com as observadas em função das doses de nitrogênio foram boas, $r^2 = 87,06\%$ e $r^2 = 83,94\%$, no primeiro e no segundo ciclo de produção. Considerando apenas as variações das doses de N, a produtividade agrícola da cana-planta variou de 151,0 a 164,0 t ha⁻¹ e da cana-soca foi de 124,0 a 132,5 t ha⁻¹. Nessas curvas é possível notar grande diferença de produtividade entre o tratamento com 0,0 (zero) e 50,0 kg de N por hectare (9,95 e 7,01 t ha⁻¹ em cana-planta e cana-soca) mas entre os tratamentos adubados com 50 e 200 kg de N por hectare, a diferença é muito pequena (de 3,10 t ha⁻¹, em cana-planta e de 1,15 t ha⁻¹ em cana-soca).

Os coeficientes de inclinação das curvas entre a dose zero e 50 kg ha⁻¹ de nitrogênio são 0,20 e 0,14, em cana-planta e cana-soca, respectivamente e no intervalo entre 50 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ de N são 0,02 e 0,01 em cana-planta e cana-soca, na mesma ordem. Isso é mais um indicativo de que a resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada é mais significativa até a dose de 50 kg de N por hectare. Em relação à forma de aplicação do nitrogênio (N) na cana-de-açúcar, [Kwong & Deville \(1994\)](#) não observaram diferenças significativas nem a 10 % de probabilidade mas publicaram que a produtividade agrícola variou de 66,9 t ha⁻¹, na cana adubada sem N, a 142,6 t ha⁻¹ na cana adubada com 120 kg de N por hectare (diferença de 53,1 t ha⁻¹). [Vitti et al. \(2007\)](#), observaram que a adubação do canavial com 200 kg de N ha⁻¹ não influenciou a produtividade agrícola da primeira soca mas na segunda e na terceira soca os tratamentos que receberam 200 kg de N ha⁻¹ foram mais produtivos.

A dose de nitrogênio que proporcionou a produtividade física máxima da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, considerando-se a média das lâminas de irrigação utilizada nesse experimento, foi 167 e 157 kg de nitrogênio por hectare que proporcionaram produções de 164,6 e 133 toneladas de cana por hectare, em cana-planta ([Figura 16a](#)) e cana-soca ([Figura 16b](#)), respectivamente. [Wiedenfeld \(2000\)](#) detectou um aumento quadrático na produtividade de cana e de açúcar com o aumento das doses de nitrogênio, entre as segunda e quarta socas,

ee modo que, esse pesquisador obteve as máximas produtividades agrícolas com 140,7, 162,2 e 175,8 kg de N ha⁻¹, na segunda, na terceira e na quarta soca, respectivamente.

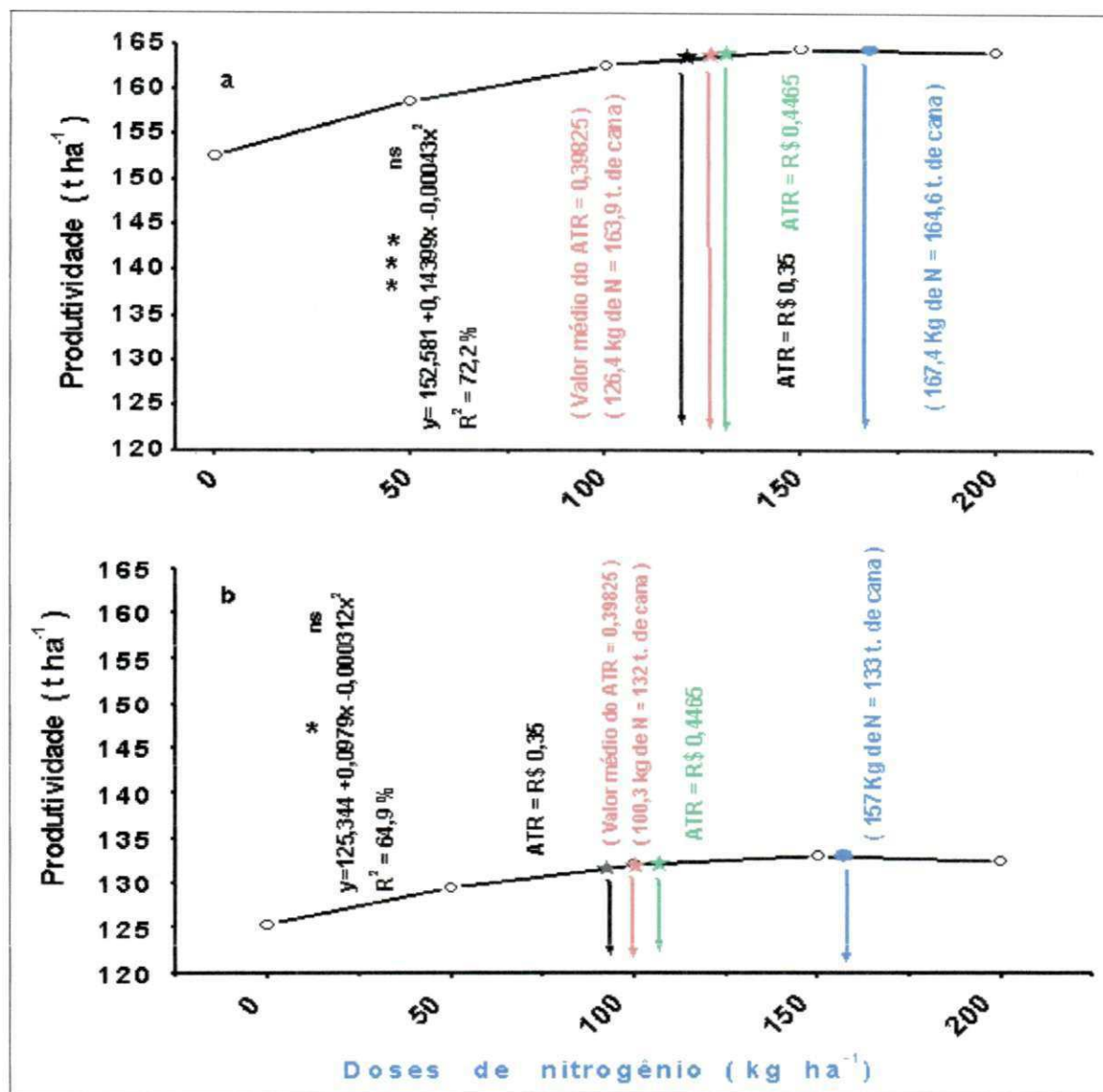


***Significativo a 1%; *Significativo a 10% e NS não significativo

Figura 15 Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função de doses de nitrogênio (curva de regressão raiz quadrada), em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

Na [Figura 16](#) observa-se, também, que a dose de máxima eficiência econômica, considerando-se o preço médio do ATR de R\$ 0,39825 e o kg de nitrogênio igual a R\$ 2,05, é 126 e 100 kg de N ha⁻¹ e as respectivas produtividades agrícola obtidas com esses níveis de adubação são 164 e 132 t ha⁻¹, em cana-planta e cana-soca, na mesma ordem. Se o preço do ATR baixar para R\$ 0,35, as doses e produtividades economicamente mais rentáveis para o primeiro e segundo ciclos de cultivo também baixariam para 121 e 93 kg de N ha⁻¹ e 164 e 132 t ha⁻¹, e, se o ATR aumentar para R\$ 0,4465 as doses de nitrogênio e as produtividades passariam para 131 e 107 kg de N por hectare e 164 e 133 t ha⁻¹, respectivamente. A produtividade agrícola da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento de máxima eficiência

econômica, com o ATR valendo R\$ 0,4465 reais é praticamente igual à produtividade física máxima, tanto em cana-planta como em cana-soca.



*** Significativo a 1%; * Significativo a 10% e NS não significativo

Figura 16. Produtividade agrícola física máxima e de máxima eficiência econômica em função de doses de nitrogênio e dos valores do ATR e do kg de nitrogênio, em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

Vale et al. (2009), com o preço da tonelada de cana na esteira da usina igual a R\$ 26,69 e a tonelada de uréia valendo R\$ 1.719,47, calcularam que a dose de 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, indicando que a lâmina de

irrigação e a dose de nitrogênio economicamente mais viáveis dependem do preço da cana e do insumo analisado (nesse caso, lâmina de irrigação e adubo nitrogenado).

A eficiência da adubação nitrogenada geralmente é avaliada com base nas relações: quilograma de cana produzida por quilograma de nitrogênio aplicado (kg de cana, kg^{-1} N) e quilograma de nitrogênio aplicado por tonelada de cana produzida por hectare (kg de N, t de cana $^{-1}$). Na primeira relação quanto maior for o valor, maior é a eficiência da adubação e na segunda relação é o contrário.

Na Figura 17 é possível constatar que a eficiência da adubação nitrogenada diminui com o aumento da quantidade de nitrogênio aplicado por hectare porque, no ciclo de cultivo da cana-planta, a quantidade de cana produzida por quilograma de nitrogênio aplicado variou de 122 a 58 kg nos tratamentos adubados com 50 e 200 quilogramas de nitrogênio por hectare, respectivamente. E, em cana-soca, o tratamento que recebeu 50 kg de N ha^{-1} produziu 82 kg de cana kg^{-1} de N e o que recebeu 200 kg de N ha^{-1} produziu apenas 35,5 kg de cana kg^{-1} de N. A relação média da quantidade de cana produzida pela quantidade de nitrogênio aplicado por hectare foi 90,1 e 50,0 kg de cana kg^{-1} de N no primeiro e no segundo ciclos de produção, respectivamente.

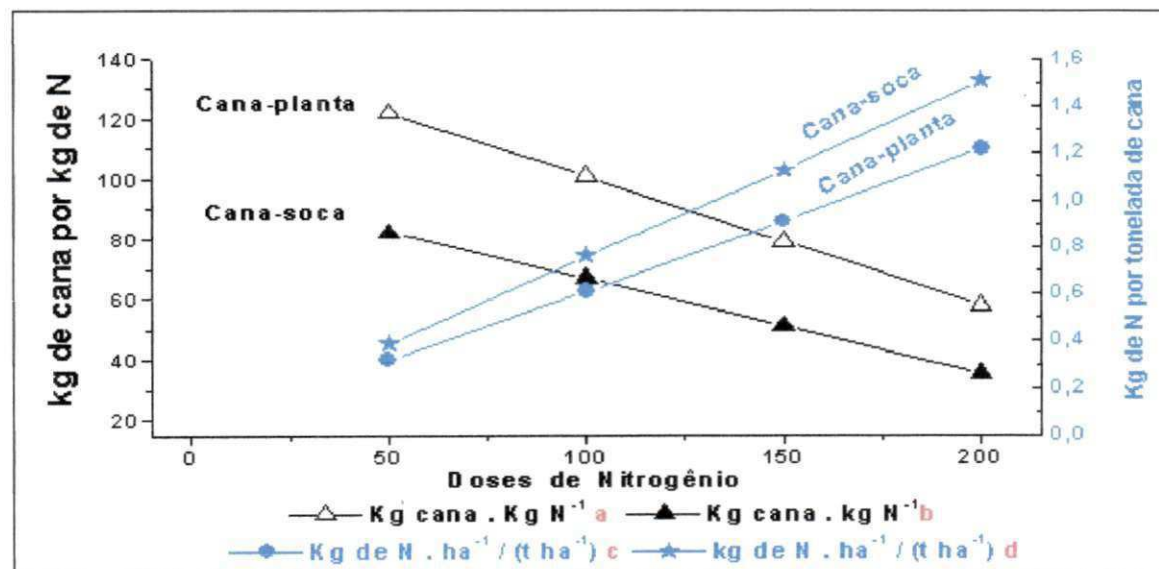


Figura 17. Relação entre a quantidade de cana produzida e a quantidade de nitrogênio aplicado por hectare (kg cana kg N^{-1}), índice “a” (cana-planta) e índice “b” (cana-soca). E, quantidade nitrogênio aplicado por hectare pela produtividade agrícola ($\text{kg de N . ha}^{-1} / (\text{t ha}^{-1})$), índice “c” (cana-planta) e índice “d” (cana-soca), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

No sul do Texas, USA, [Wiedefeld & Enciso \(2008\)](#) observaram produções 62 a 85 kg de cana por kg de N aplicado em cana-planta e na terceira soca esse índice subiu para

191 kg de cana por kg de N aplicado, corroborando com a hipótese de que o nitrogênio tem efeito na longevidade do canavial.

A relação entre a quantidade de nitrogênio aplicado por tonelada de cana produzida por hectare foi 0,32 e 0,39 kg de nitrogênio por tonelada de cana (kg de N t^{-1}) nos tratamentos adubados com $50,0 \text{ kg de N ha}^{-1}$, em cana-planta e cana-soca, e ao aumentar a dose de nitrogênio para $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$ essa relação aumentou para 1,22 e $1,51 \text{ kg de t}^{-1}$, no primeiro e segundo ciclos de produção, na mesma ordem. A quantidade média de nitrogênio por tonelada de cana produzida por hectare foi $0,76 \text{ kg de N t}^{-1}$, no ciclo de cana-planta, e $0,95 \text{ kg de N TCH}^{-1}$ na cana-soca. [Vitti et al. \(2007\)](#), encontraram a relação de $1,20 \text{ kg de N}$ por tonelada de cana produzida e citam valores de $0,72$ e $1,00 \text{ kg de N}$ por tonelada de cana produzida, anteriormente constatados por [Andreis \(1975\)](#) e [Orlando Filho et al. \(1980\)](#). A diferença entre esses dados ocorrem porque parte do N utilizado nas adubações pode ficar imobilizada pelos micro-organismos do solo e, também na forma orgânica no sistema radicular, sendo liberado parcialmente ao longo do ciclo da cultura. Para compensar a parte do N utilizado nas adubações nitrogenadas, [Vitti et al. \(2006\)](#) recomendam a aplicação de $1,00$ a $1,20 \text{ kg de N}$ por tonelada de cana a ser produzida.

Na [Figura 18](#) são apresentadas as curvas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio no desdobramento das lâminas de irrigação utilizadas nesse experimento, durante os ciclos de produção da cana-planta e cana-soca. Nos cultivos de sequeiro, a produtividade foi de 113 a 117 t ha^{-1} e 111 a 113 t ha^{-1} nas adubações sem nitrogênio e com 200 kg de N por hectare no primeiro ([Figura 18a](#)) e segundo ([Figura 18a₁](#)) ciclos de produção, respectivamente. A diferença média entre a cana adubada sem nitrogênio e com $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$ na produção da cana-planta foi $4,0 \text{ t ha}^{-1}$ e na cana-soca foi $2,0 \text{ t ha}^{-1}$. A cana irrigada com 150% da ETo e adubada sem e com $200 \text{ kg de nitrogênio}$ por hectare produziu 171 e 198 t ha^{-1} , no primeiro ciclo de cultivo e 133 e 147 t ha^{-1} , no segundo ciclo de cultivo. Observa-se que as diferenças entre as canas adubadas sem nitrogênio e com $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$, quando irrigadas (sem deficiência hídrica) aumentaram para $27,0$ e $14,0 \text{ t ha}^{-1}$ na produção da cana-planta e cana-soca, respectivamente. Apesar da interação entre dose de nitrogênio e lâmina de irrigação não ter sido significativa, as curvas dessa figura e as diferenças entre as produtividades dão a idéia de que a cana cultivada em regime de sequeiro responde menos à adubação nitrogenada do que quando a mesma é cultivada com irrigação.

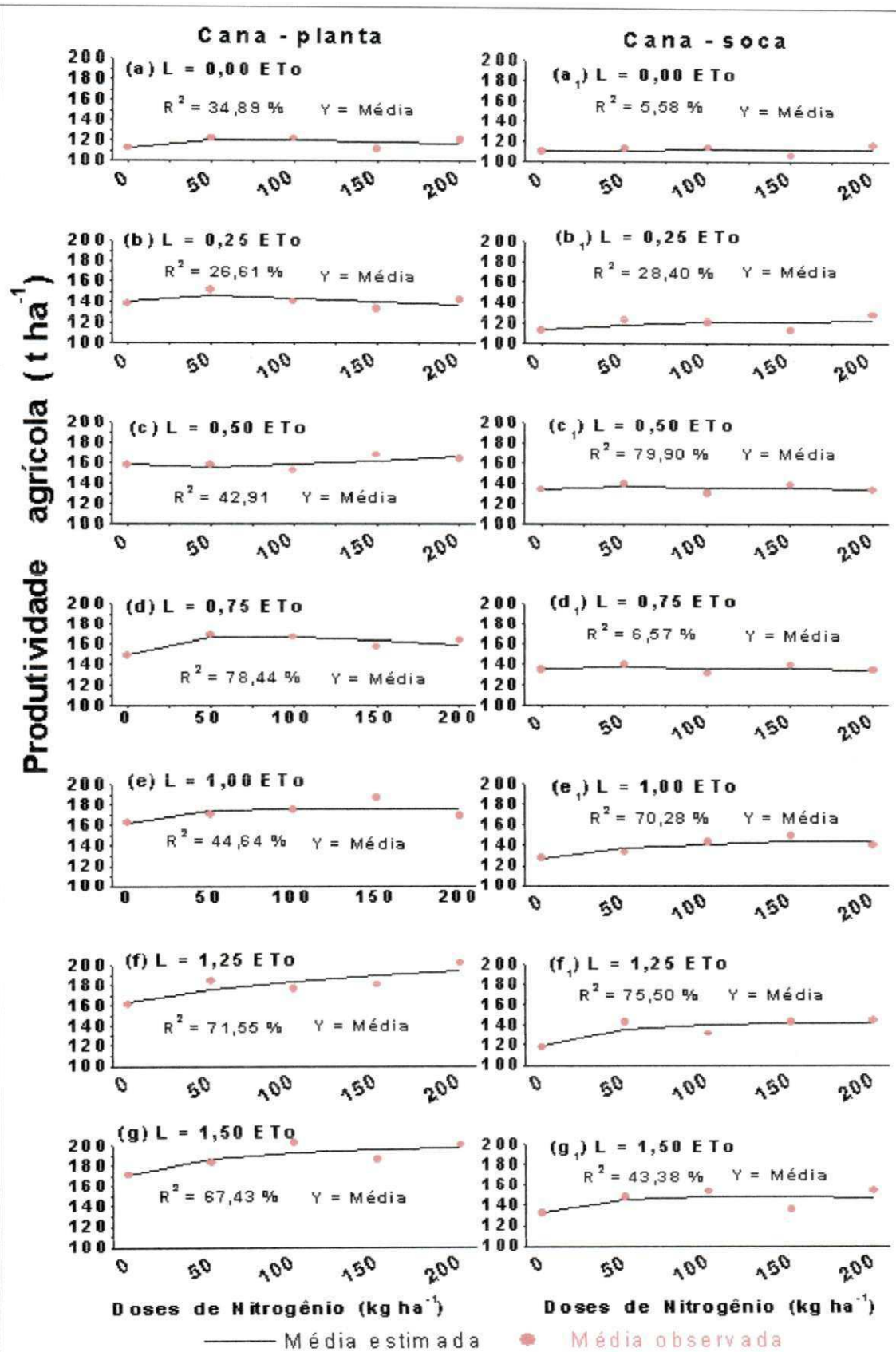


Figura 18. Produtividade agrícola da cana-de-açúcar em função de doses de nitrogênio nas diferentes lâminas de irrigação (curvas de regressão em raiz quadrada, desdobramento), em cana-planta e cana-soca, na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

Os valores dos coeficientes de regressão (r^2) das equações do desdobramento das doses de nitrogênio nas lâminas de irrigação foram muito baixos, exceto no tratamento irrigado com 125 % da ETo ($r^2 = 71,5$ % em cana-planta e $r^2 = 75,5$ % em cana-soca), porém, na [Figura 18](#) é possível ver que os dados observados não foram muito dispersos e ficaram próximos dos estimados. Portanto, os baixos valores de r^2 podem ser um indicativo de que a cana-de-açúcar não respondeu bem às altas doses de nitrogênio.

5.8. Qualidade da matéria prima

Os açúcares totais recuperáveis (ATR) foi a variável utilizada para avaliar a qualidade da matéria prima (cana-de-açúcar) produzida nesse experimento e no resumo da análise de variância, apresentado na [Tabela 11](#); observa-se que não houve diferença estatisticamente significativa para os tratamentos de lâminas de irrigação (L) e doses de nitrogênio (N), nem para a interação dos tratamentos (L*N), tanto no cultivo da cana-planta como no cultivo da cana-soca. O coeficiente de variação das parcelas (lâminas de irrigação – CV 1) foi 5,17 % em cana-planta e 6,87 % em cana-soca; nas subparcelas (doses de nitrogênio – CV 2) foi 4,76 e 4,99 % no primeiro e no segundo ciclos de cultivo, respectivamente. Com base nos valores dos CV's fica comprovado que o experimento teve boa precisão estatística. A quantidade média de ATR por tonelada de cana foi 145,7 kg em cana-planta e 147,8 kg em cana-soca.

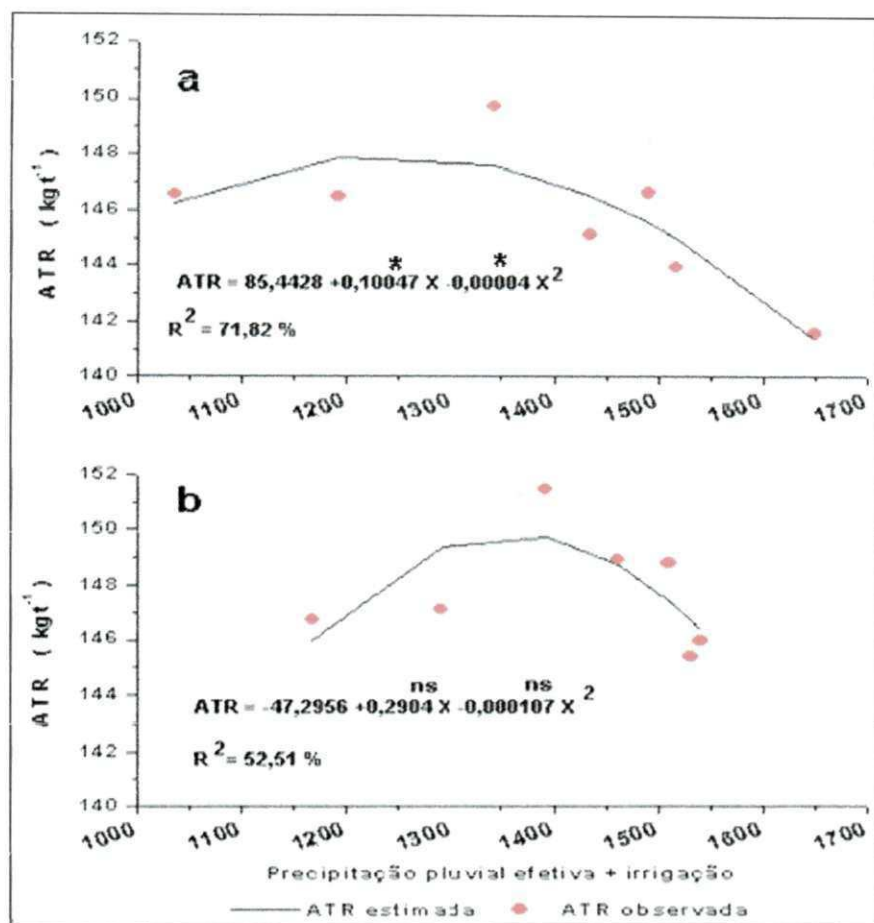
A concentração de açúcares totais recuperáveis aumenta sempre que o grau de maturação da cana-de-açúcar aumenta porque nessa fase as plantas param a emissão de novas folhas e o crescimento vegetativo. Com isso, as folhas vão ficando velhas, com a capacidade fotossintética e de absorção de água reduzida, de modo que a seiva (o caldo da cana) vai tornando-se mais concentrada e aumenta a proporção da massa de ATR em relação à massa total dos colmos.

As curvas de regressão da quantidade de açúcares totais recuperáveis por tonelada de cana, apresentadas na [Figura 19](#), indicam que apesar de não ter havido diferença significativa entre as canas cultivadas com lâminas de irrigação diferentes, há uma tendência dos cultivos irrigados com níveis de irrigação mais elevados apresentarem menores quantidades de ATR por tonelada de colmo. Essa tendência é explicada pelo fato de que enquanto o teor de umidade do solo se encontra próximo da capacidade de campo as plantas tendem a permanecer na fase vegetativa adiando o início da maturação e, por isso, a colheita acaba ocorrendo antes da cultura atingir o grau de maturação ideal.

Tabela 11. Resumo da análise de variância da qualidade da cana-de-açúcar, em função da quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) da cana-planta e cana-soca, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

	FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Cana - Planta	L (mm)	6	590,385556	98,397593	1,734	0,1963 ^{ns}
	BLOCO	2	772,444853	386,222427	6,807	0,0106 ^{ns}
	Erro 1	12	680,824827	56,735402		
	N (kg ha ⁻¹)	4	53,393514	13,348379	0,277	0,8916 ^{ns}
	L x N	24	1.139,495939	47,478997	0,985	0,4986 ^{ns}
	Erro 2	56	2.698,480187	48,187146		
	Total corrigido 104		5.935,024876			
	CV 1 (%) =		5,17			
	CV 2 (%) =		4,76			
	Média geral (kg t⁻¹):		145,74	Número de observações: 105		
Cana - Soca	L (mm)	6	401,726476	66,954413	0,675	0,6730 ^{ns}
	BLOCO	2	167,484190	83,742095	0,844	0,4541 ^{ns}
	Erro 1	12	1.191,011810	99,250984		
	N (kg ha ⁻¹)	4	356,269143	89,067286	1,658	0,1727 ^{ns}
	L x N	24	1.941,400190	80,891675	1,506	0,1051 ^{ns}
	Erro 2	56	3.008,890667	53,730190		
	Total corrigido 104		7.066,782476			
	CV 1 (%) =		6,74			
	CV 2 (%) =		4,96			
	Média geral (kg t⁻¹):		147,77	Número de observações: 105		

NS não significativo



*Significativo a 10% e NS não significativo

Figura 19. Qualidade da cana-de-açúcar, expressa em quilogramas de açúcares totais recuperáveis (ATR) por tonelada de cana, em função de lâminas de irrigação em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

Portanto, para a cana-de-açúcar irrigada amadurecer e aumentar a concentração de ATR, a irrigação deve ser suspensa alguns dias antes da colheita. Porém, para que o estresse hídrico provocado pelo corte da irrigação não cause prejuízo a cultura, é necessário determinar o tempo ideal entre a suspensão da irrigação e à colheita porque períodos curtos não darão tempo para as plantas completarem a maturação e períodos longos podem provocar desidratação excessiva da cepa (rizoma) e prejudicar a brotação das próximas socarias (reduz o número de plantas por hectare dos próximos ciclos de cultivo), além de reduzir o peso fresco dos colmos e diminuir a produtividade agrícola. Biswas (1988) recomenda o corte da irrigação (*dryng-off*) seis semanas antes da colheita, visando melhorar o teor de sacarose e, consequentemente, o ATR.

Inman-Bamber (2004) observou que déficits de água no solo levemente superiores a 120 mm reduzem o acúmulo de biomassa e quando superiores a 145 mm o acúmulo de sacarose também é reduzido. Inman-Bamber & Smith (2005) sugerem usar o número de

folhas verdes, após o corte da irrigação, como indicativo para determinar a época de colheita e relata que o *dryng-off* é mais benéfico ao aumento do rendimento agroindustrial quando a cana é colhida com três ou quatro folhas verdes a menos do que um cultivo sem déficit hídrico. Na região de Rio Largo, AL, considerando-se a ETC média da cana-de-açúcar de 4,5 mm dia⁻¹ e o armazenamento de água do solo igual a 60 mm, 30 dias sem chuva nem irrigação acumula um déficit hídrico em torno de 75 mm. Esse déficit fica próximo do recomendado por Inman-Bamber (2004).

No primeiro ciclo de produção a quantidade de ATR por tonelada de colmo (Figura 19a) declinou de 146,4 kg por tonelada de cana (kg t⁻¹), nos tratamentos sem irrigação, para 141,4 kg nos tratamentos irrigados com lâminas equivalentes a 1,50 ETo, diferença de 5,0 kg t⁻¹. No segundo ciclo (Figura 19b) o ATR foi de 146,8 e 144,8 kg t⁻¹ nos tratamentos de sequeiro e irrigado com a maior lâmina aplicada nesse trabalho. Nesse ciclo de cultivo a diferença entre o maior e o menor valor de ATR foi de apenas 2,0 kg t⁻¹.

A quantidade de ATR por tonelada de cana em função das doses de nitrogênio aplicada não foi estatisticamente significativa, mas os resultados do primeiro ciclo de cultivo, apresentados na Figura 20a, tiveram uma correlação (r²) de 76,87 %, indicando que 76,87 % da variação do valor de ATR foram provocados pela dose de nitrogênio aplicada por hectare.

No cultivo da cana-planta, a quantidade de ATR aumentou em relação direta com o nível de adubação nitrogenada, saindo de 144,7 para 146,4 kg de ATR por tonelada de cana, nos tratamentos sem nitrogênio e com 200 kg de N por hectare. No segundo ciclo de produção (Figura 20b) o coeficiente de correlação foi muito baixo (5,47 %) e os resultados observados tão dispersos que impedem uma discussão precisa. Wiedenfeld (2000) observou que o aumento nas doses de nitrogênio provocou um suave mas significativo declínio no teor de sacarose entre a primeira e quarta socaria. Maeda et al. (2009) também concluíram que em cana de quarta folha (terceira soca) o Brix (açúcares totais) decresceu significativamente com o aumento da dose de nitrogênio. Isso pode ter acontecido porque o nitrogênio induz as plantas a se manterem na fase de crescimento vegetativo, adiando a maturação.

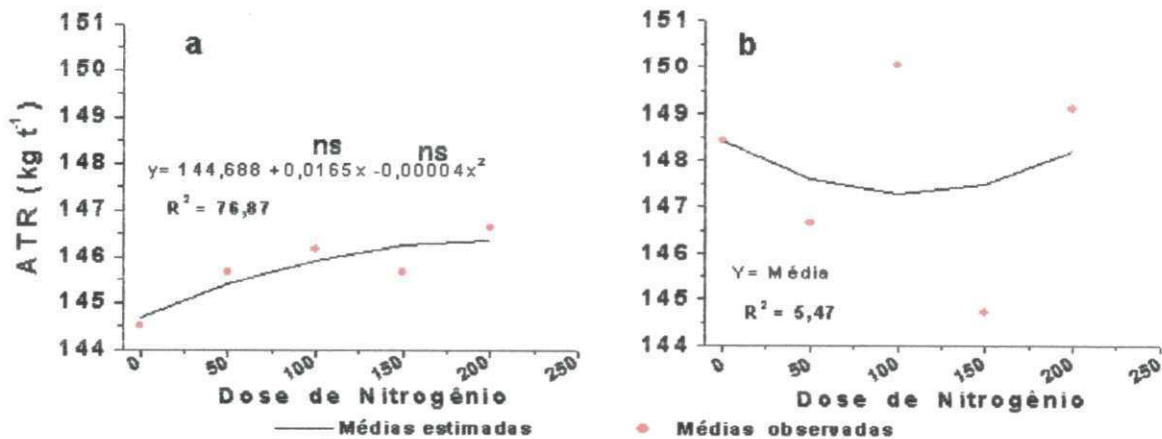


Figura 20. Qualidade da cana-de-açúcar expressa em quilogramas de açúcares totais recuperáveis (ATR) por tonelada de cana, em função de doses de nitrogênio em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

5.9. Rendimento Agroindustrial

O rendimento agroindustrial, expresso em toneladas de açúcar por hectare (TAH), foi significativamente influenciado pelas lâminas de irrigação a nível de 1 % em cana-planta e cana-soca, enquanto o nível de adubação nitrogenada teve influência significativa a nível de 5 % somente no primeiro ciclo de produção (Tabela 12). A interação entre os dois grupos de tratamentos não foi estatisticamente significativa. Os coeficientes de variação dos tratamentos de lâminas de irrigação foram 12,0 e 15,9 % e das doses de nitrogênio foram 11,2 e 14,8 % no primeiro e no segundo ciclo de cultivo, respectivamente. O rendimento agroindustrial, média geral, no primeiro ciclo de produção foi 23,1 t ha⁻¹ de açúcar e no segundo ciclo foi 19,4 t ha⁻¹ de açúcar.

As curvas do rendimento agroindustrial médio da cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação apresentadas na Figura 21a (cana-planta) e na Figura 21b (cana-soca) tem coeficientes de correlação (r^2) muito bons, 94,77 e 92,21 %, respectivamente. A variável “rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar” é o produto da produtividade agrícola da cultura (expressa em toneladas de cana por hectare) pela quantidade de açúcares totais recuperáveis por tonelada de cana (ATR- expressa em quilograma por tonelada de cana), sendo que o primeiro fator exerce maior influência nos resultados finais.

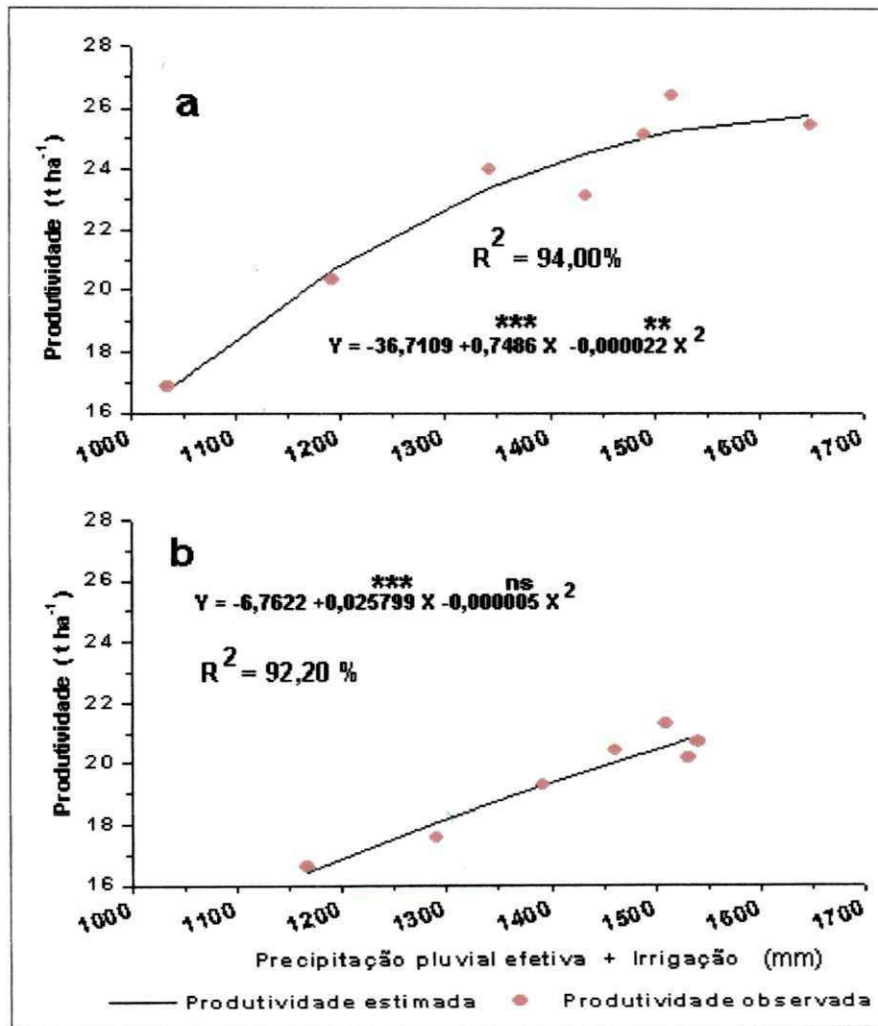
Tabela 12. Resumo da análise de variância do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar, em tonelada de açúcar por hectare (TAH) da cana-planta e cana-soca nas safras 2009/2010 e 2010/2011

	FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Cana - Planta	L (mm)	6	1.020,046358	170,007726	22,057	1,0000 ***
	BLOCO	2	14,123785	7,061892	0,916	0,4263 ^{ns}
	Erro 1	12	92,492442	7,707703		
	N (kg ha ⁻¹)	4	85,345013	21,336253	3,209	0,0192 **
	L*N	24	133,578347	5,565764	0,837	0,6769 ^{ns}
	Erro 2	56	372,287240	6,647986		
	Total corrigido	104	1.717,873185			
	CV 1 (%) =	12,04				
	CV 2 (%) =	11,18				
	Média geral (t ha⁻¹):	23,06				
Cana - Soca	L (mm)	6	271,381905	45,230317	4,663	0,0113 **
	BLOCO	2	198,589905	99,294952	10,236	0,0025 ***
	Erro 1	12	116,410095	9,700841		
	N (kg ha ⁻¹)	4	47,727048	11,921762	1,511	0,2115 ^{ns}
	L*N	24	187,094286	7,795595	0,987	0,4967 ^{ns}
	Erro 2	56	442,346667	7,899048		
	Total corrigido	104	1.263,549905			
	CV 1 (%) =	16,03				
	CV 2 (%) =	14,47				
	Média geral (t ha⁻¹):	19,43				

***Significativo a 1%, **Significativo a 5% e ^{ns} não significativo

No primeiro ciclo de produção, a quantidade de açúcar por hectare média foi 17,1 t ha⁻¹, nos tratamentos sem irrigação, aumentou e atingiu o máximo (26,0 t ha⁻¹) nos tratamentos com lâminas de 125 % da ETo e depois declinou para 25,9 t ha⁻¹ nos tratamentos irrigados com 150 % da ETo. A curva do rendimento agroindustrial da cana-soca teve a variação semelhante à da cana-planta porém com valores mais baixos, variando de 16,3 t ha⁻¹ nos tratamentos de sequeiro, crescendo até o máximo de 20,8 t ha⁻¹ nos tratamentos irrigados com 125 % da ETo e em seguida declinando para 20,4 t ha⁻¹ nas parcelas irrigadas com 150 % da ETo. As lâminas totais brutas foram aplicadas na fase final de crescimento da cultura, período em que o coeficiente de cultura (Kc) tem valor máximo e conforme Allen et al. (2008) o valor desse coeficiente adotado pela *Food Agriculture Organization* (FAO) é de 1,25 a 1,30. Portanto, considerando-se que os rendimentos agroindustriais máximos foram conseguidos com lâminas de irrigação equivalentes a 1,25 ETo e que os percentuais ou frações da ETo são equivalentes aos valores de Kc, os resultados obtidos nessa pesquisa são equivalentes ao valor do Kc estabelecido pela FAO.

Dantas Neto et al. (2006), em cana-soca irrigada por pivô fixo obtiveram rendimentos de 10,67 e 14,63 toneladas de açúcar por hectare (TAH), com lâminas de irrigação brutas totais de 807 e 1.164 mm, respectivamente. Com base nos valores dos rendimentos agroindustriais e no formato das curvas de regressão, é possível afirmar que os índices de TAH dependem mais da produtividade agrícola do que da quantidade de ATR, porque as curvas de TAH são mais semelhantes às curvas de TCH do que às de ATR.

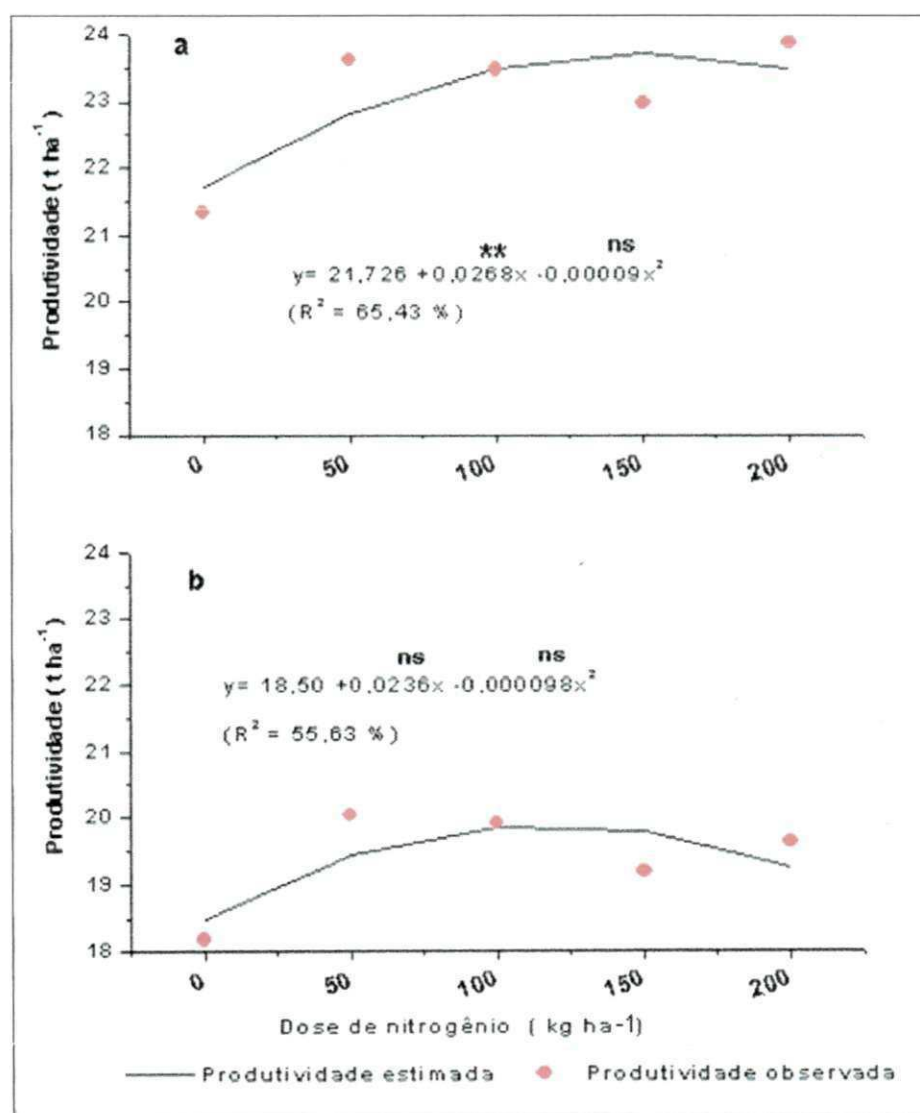


***Significativo a 1%; **Significativo a 5% e ns não significativo

Figura 21. Rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar expresso em tonelada de açúcar por hectare (t ha⁻¹), estimada e observada, em função de lâminas de irrigação, em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

Os rendimentos agroindustriais da cultura da cana-de-açúcar, irrigada por gotejamento, em função das doses de nitrogênio aplicadas no ciclo de produção de cana-planta e cana-soca na região de Rio Largo, AL, durante as safras 2009/2010 e 2010/2011, estão apresentados na [Figura 22](#). Em cana-planta ([Figura 22a](#)), a curva de rendimento

agroindustrial se inicia com 21,7 t ha⁻¹, no tratamento sem nitrogênio, ascende até um máximo de 23,7 t ha⁻¹ no intervalo próximo aos tratamentos adubados com 150 kg ha⁻¹ de N e declina para 23,5 t ha⁻¹, no tratamento adubado com 200 kg de N ha⁻¹, enquanto na cana-soca (Figura 22b), essa curva sai de 18,50 t ha⁻¹, atinge o máximo de 19,85 t ha⁻¹ no ponto da curva correspondente aos tratamentos de 100 kg ha⁻¹ de N e desce até 19,2 t ha⁻¹ nos tratamentos que receberam 200 quilogramas de nitrogênio por hectare. Esses resultados indicam que para a cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, a dose de nitrogênio, racionalmente recomendada, seria de no máximo 150 kg ha⁻¹, em cana-planta, e 100 kg ha⁻¹ em cana-soca.



**Significativo a 5% e NS não significativo

Figura 22. Rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar, expresso em tonelada de açúcar por hectare (t ha⁻¹) estimado e observado, em função de doses de nitrogênio, em cana-planta (a) e cana-soca (b), na região de Rio Largo, AL, nas safras 2009/2010 e 2010/2011

5.10. Função de Produção

A função de resposta ou de produção da cana-de-açúcar em relação à irrigação e ao nitrogênio (N) está apresentada, nesse trabalho, na forma de curvas de isoproducto ou isoquantas de produtividade agrícola da cultura com base na lâmina bruta de irrigação total e doses nitrogênio aplicadas. Através dessas curvas é possível determinar as quantidades de água e nitrogênio a serem aplicadas para se conseguir o rendimento agrícola pretendido. Na [Figura 23](#) se encontram as isoquantas da produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) do ciclo de cultivo da cana-planta irrigada por gotejamento na região de Rio Largo – AL, e, nessas isoquantas observa-se que a produtividade média de $160\ t\ ha^{-1}$ pode ser obtida com as combinações: **a)** 700 mm de irrigação e $30\ kg\ de\ N\ ha^{-1}$; **b)** 540 mm de irrigação e $50\ kg\ de\ N\ ha^{-1}$; **c)** 440 mm de irrigação e $80\ kg\ de\ N\ ha^{-1}$ ou **d)** 390 mm de irrigação e $130\ kg\ de\ N\ ha^{-1}$. Com isso, comparando-se a combinação **(b)** com a combinação **(a)**, verifica-se que são utilizados 160 mm de água a menos e 20 kg de N a mais (proporção 1,0 kg de N para 8,0 mm de água). Na combinação **(d)** tem-se 50 mm de água a menos e 50 kg de N a mais do que na combinação **(c)**, proporção de 1,0 kg de N para 1,0 mm de água.

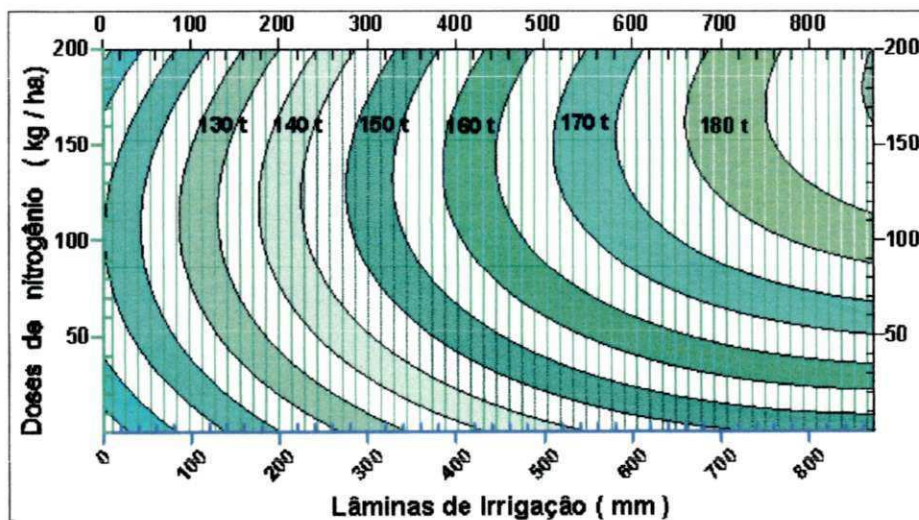


Figura 23. Isoquantas de produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, no ciclo de produção da cana-planta, na região de Rio Largo, AL, na safra 2009/2010

As curvas de isoproducto ou isoquantas de produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar, apresentadas na [Figura 23](#), foram geradas pela [Equação 13](#), em que os coeficientes R_{00} e R_{10} foram significativos a 1 % de probabilidade, o R_{11} foi significativo a 5 % de probabilidade e o R_{01} e R_{02} não foram significativos ([Tabela 13](#)). Os coeficientes

estatisticamente não significativos estão relacionados com as doses de nitrogênio, indicando que, no geral, a adubação nitrogenada não influenciou a produtividade agrícola da cana-de-açúcar tanto quanto as lâminas de irrigação. 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 às lâminas de irrigação e às doses de nitrogênio. O coeficiente R_{02} que rege a parte final das curvas de resposta da produtividade de culturas agrícolas a fatores de produção, geradas por regressão do tipo polinomial do segundo grau, normalmente, não representa bem a realidade porque a partir de determinado ponto essa curva decresce rapidamente e isso não acontece na prática (Gomes & Conagin, 1987). Portanto, é comum esse coeficiente não ser significativo.

$$Y(L,N) = 120,1941 + \overset{ns}{0,06765} \cdot N - \overset{ns}{0,000426} N^2 + \overset{***}{0,10907} \cdot L - \overset{**}{0,0000L^2} + \overset{***}{0,00016} \cdot LN \quad (13)$$

Tabela 13. Valores dos coeficientes da equação de respostas da cana-planta a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, com os respectivos erros, valores calculados do teste (T) e probabilidade (P)

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

***Significativo a 1%; **Significativo a 5% e NS não significativo

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, motivo pelo qual, o correto é que sejam feitos experimentos para se obter as isoquantas de produtividade agrícola de cada ciclo de cultivo e para os diversos fatores de produção possíveis. Na Figura 24 se encontram as curvas de isoproducto, em TCH, para o ciclo de produção da cana-soca irrigada por gotejamento na região de Rio Largo, AL. Com base nessa figura é possível afirmar que a produtividade agrícola média de 135 t ha⁻¹ pode ser conseguida com: a) 600 mm de irrigação e 20 kg de N ha⁻¹; b) 500 mm de irrigação e 38 kg de N ha⁻¹; c) 400 mm de irrigação e 75 kg de N ha⁻¹ ou d) 350 mm de irrigação e 130 kg ha⁻¹ de N.

Nas isoquantas de produtividade agrícola também é possível observar que, ao diminuir a quantidade de água ou lâmina de irrigação bruta aplicada, a quantidade de nitrogênio a ser utilizada para manter o mesmo nível de produção aumenta e as proporções entre a lâmina de irrigação que diminui e a dose de nitrogênio que aumenta não são constantes. A relação entre as quantidades de água que diminuem e as de nitrogênio que aumentam é conceituada como taxa marginal de substituição de água por nitrogênio.

A equação ou modelo que gerou as isoquantas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar no segundo ciclo de produção (Figura 24) apesar de ter sido significativa a 1 % de probabilidade, o r^2 foi baixo (26 %) e apenas os coeficientes R_{00} e R_{10} foram significativos a 1 e 5 % de probabilidade; os demais não foram significativos (Tabela 14). O coeficiente R_{00} representa a parte invariável da equação e o R_{10} representa a variação em função linear da lâmina de irrigação, indicando-se que as lâminas de irrigação tiveram influências estatisticamente significativas (na parte linear da equação) para a produtividade agrícola e como os índices que representam os termos quadráticos das lâminas de irrigação, as doses de nitrogênio e a interação entre os fatores de produção não foram significativos implica dizer que os mesmos não influenciaram estatisticamente a produtividade da cana-soca.

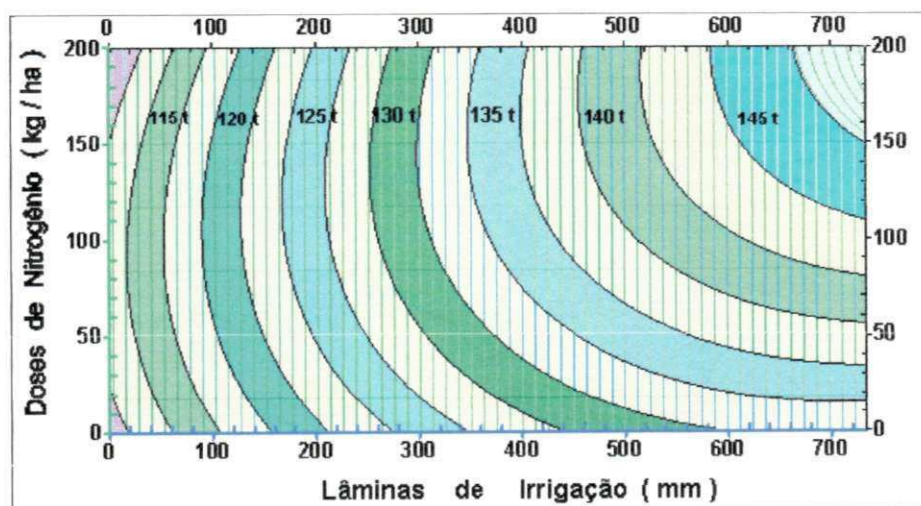


Figura 24. Isoquantas de produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, no ciclo de produção da cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011

$$Y(L,N) = 111,4245 + 0,0549.N - 0,000316.N^2 + 0,06157.L - 0,0000439.L^2 + 0,0001223.LN$$

ns
ns
**
ns
ns

Tabela 14. Valores dos coeficientes da equação de respostas da cana-soca às lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, com os respectivos erros, valores calculados do teste (T) e probabilidade (P)

Coeficiente		Valor	Erro	T	P
R ₀₀	Constante	111,4245	5,7685	19,3196	<0,0001
R ₀₁	Nitrogênio	0,0549	0,0857	0,6403	0,523 ^{NS}
R ₀₂	Nitrogênio ²	-0,000316	0,0004	-0,835	0,405 ^{NS}
R ₁₀	Lâmina	0,06157	0,025	2,4575	0,0153 ^{**}
R ₂₀	Lâmina ²	-0,0000439	0,00003	-1,4439	0,1511 ^{NS}
R ₁₁	Lâm.X Nitro.	0,0001223	0,00009	1,3112	0,192 ^{NS}

^{**}Significativo a 5% e NS não significativo

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

A taxa marginal de substituição da lâmina de irrigação por dose de nitrogênio (T_{Ma_(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 determinado cultivo agrícola. Essa taxa, apresentada em quilogramas de nitrogênio aplicados por hectare a mais no cultivo da cana-de-açúcar por 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 25](#) 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. Os valores da T_{Ma_(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 15](#).

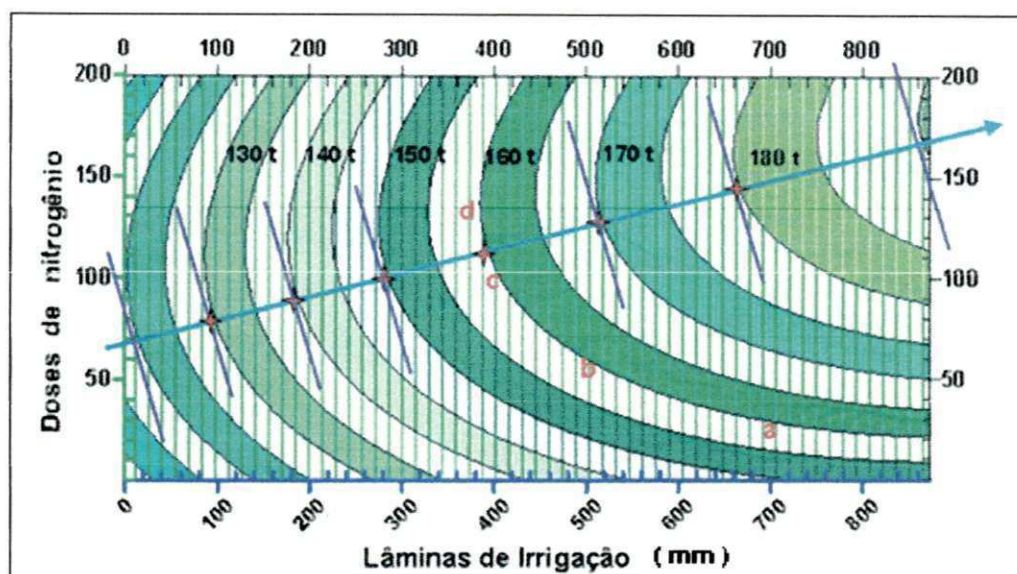


Figura 25. Isoquantas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar, ciclo de cultivo de cana-planta, na região de Rio Largo, AL, com detalhes da taxa de substituição de um milímetro de água por quilograma de nitrogênio (letras a, b, c e d) e quantidade de água e nitrogênio que resultam no custo de produção mínimo (+) para as respectivas produtividades agrícolas

Tabela 15. Valores da taxa marginal de substituição (TMa) 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)	L (mm)	(L/N)	L (mm)	(L/N)	L (mm)	(L/N)	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	∞∞

Trabalhos científicos com taxas marginais de substituição de água por nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar, publicados nas últimas décadas praticamente não existem porém Maciel (2006), trabalhando com goiaba, observou que a taxa marginal de substituição de água por nitrogênio na isoquanta da produtividade de 20 t ha⁻¹ de frutos, com a adubação de 40 kg de N ha⁻¹ e 1.538 mm de irrigação seria 0,06; com 80 kg de N ha⁻¹ e 1.230 mm de irrigação seria 0,23 e com 160 kg de N ha⁻¹ e 1.067 mm de irrigação seria 3,70. Com isso, é possível afirmar que, à medida em que as lâminas de irrigação vão diminuindo, a eficiência no uso da

água aumenta e a quantidade de nitrogênio necessária para substituir um milímetro de água de irrigação também aumenta

Na [Figura 25](#) também estão marcados os pontos de combinação das quantidades de água e nitrogênio que resultam nos menores custos de produção para as respectivas produtividades agrícolas esperadas. Exemplo: para produzir 130 t ha^{-1} , a melhor combinação é 95 mm de água e $79 \text{ kg de N ha}^{-1}$, para produzir 160 e 180 t ha^{-1} o ideal é utilizar 390 mm de água e $112 \text{ kg de N ha}^{-1}$ e 660 mm de água e $145 \text{ kg de N ha}^{-1}$, na mesma ordem. Sendo que esses valores correspondem às lâminas de irrigação bruta aplicadas; então, para calcular a água total consumida pela cultura é preciso somar o valor da precipitação pluvial efetiva que foi 1.037 mm .

Nos pontos: *a*, *b*, *c* e *d* da isoquanta de 135 t ha^{-1} da [Figura 26](#) a $TMa_{(L/N)}$, expressa em kg de N mm^{-1} , para o ciclo de cultivo de cana-soca na região de Rio Largo, AL, é: $0,12$, $1,24$, $3,47$ e infinita (∞), respectivamente. Os valores da $TMa_{(L/N)}$ para se obter as produtividades de 120 , 125 , 130 , 135 e 140 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-soca, na região de Rio Largo, AL, encontram-se na [Tabela 16](#) e a combinação dos fatores de produção água de irrigação e nitrogênio que proporciona menor custo para se produzir 130 toneladas de cana por hectare, em cultivo de cana-soca, é 270 mm de irrigação e 85 kg de nitrogênio e para conseguir a produtividade de 145 t ha^{-1} é 590 mm de irrigação e 170 kg de nitrogênio ([Figura 26](#)). A quantidade de água e nitrogênio para produção de 130 toneladas de cana por hectare no segundo ciclo de cultivo é, respectivamente, 184 e $7,5 \%$ superior aos valores desses fatores para atingir a mesma produtividade em cana-planta. Isso indica que a cana-soca responde proporcionalmente menos à irrigação do que a adubação nitrogenada. O ponto de cada isoquanta em que a taxa marginal de substituição é nula ou infinita delimita a região de produção racional.

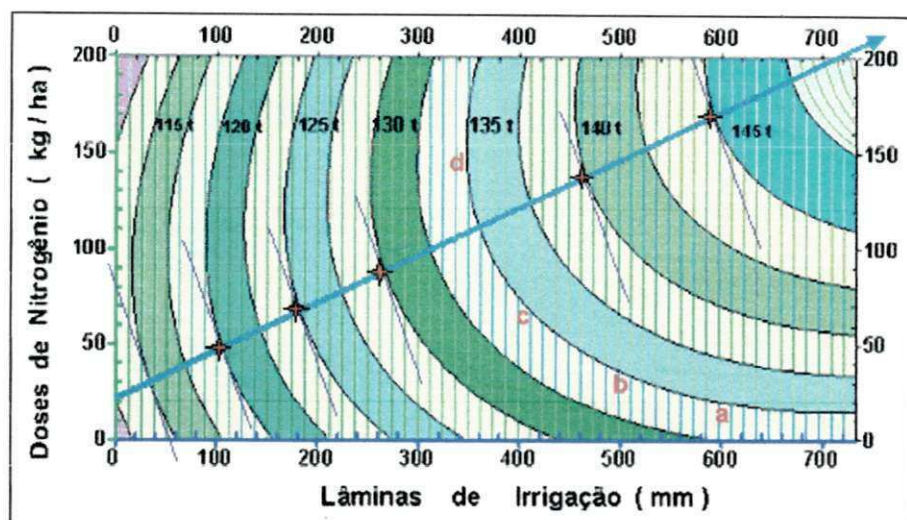


Figura 26. Isoquantas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar, ciclo de cultivo de cana-soca, na região de Rio Largo, AL, com detalhes da taxa de substituição de um milímetro de água por quilograma de nitrogênio (letras a, b, c, e d) e da quantidade de água e nitrogênio que resultam no custo de produção mínimo (*) para as respectivas produtividades agrícolas

Tabela 16. Valores da taxa marginal de substituição (TMA) de lâminas de irrigação bruta (L) por doses de nitrogênio (N) aplicadas na cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nas isoquantas, 120, 125, 130, 135 e 140, no ciclo de cultivo de cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011

Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	120 (t ha ⁻¹)		125 (t ha ⁻¹)		130 (t ha ⁻¹)		135 (t ha ⁻¹)		140 (t ha ⁻¹)	
	L (mm)	(L/N)	L (mm)	(L/N)	L (mm)	(L/N)	L (mm)	(L/N)	L (mm)	(L/N)
25	125	0,90	225	0,63	350	0,40	575	0,14	--	--
50	105	1,37	200	0,94	300	0,64	455	0,34	--	--
75	95	2,38	180	1,52	280	0,97	400	0,59	590	0,24
100	90	6,38	170	2,99	260	1,69	370	0,97	515	0,49
125	90	∞∞	165	16,02	255	3,77	355	1,75	480	0,87
150	--	--	160	∞∞	250	∞∞	350	4,73	460	1,71
175	--	--	--	--	--	--	350	∞∞	455	5,73
200	--	--	--	--	--	--	--	--	450	∞∞

5.12. Região de produção racional

Os fatores de produção que geram as curvas de isoprodutos ou isoquantas são considerados insubstituíveis nos pontos em que a inclinação dessas curvas é igual a 0,0 (zero) ou infinita e a área limitada pelas retas que ligam esses pontos é denominada 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 não há desperdícios desses fatores porque as plantas respondem com aumento de produtividade e fora dela pode haver desperdícios de insumos. Contudo, isso não implica em afirmar que, utilizando-se as combinações das quantidades de insumos limitadas pela região de produção racional, os produtores terão lucros garantidos. Portanto, para melhorar a expectativa de lucro líquido do empreendimento não se deve deixar de usar a relação entre os insumos que resulta 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 27) 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 de 214 toneladas de cana por hectare que seria obtida com 375 kg de nitrogênio por hectare e 1.487 mm de irrigação. Entretanto, 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 da região de produção racional não aparece na respectiva figura.

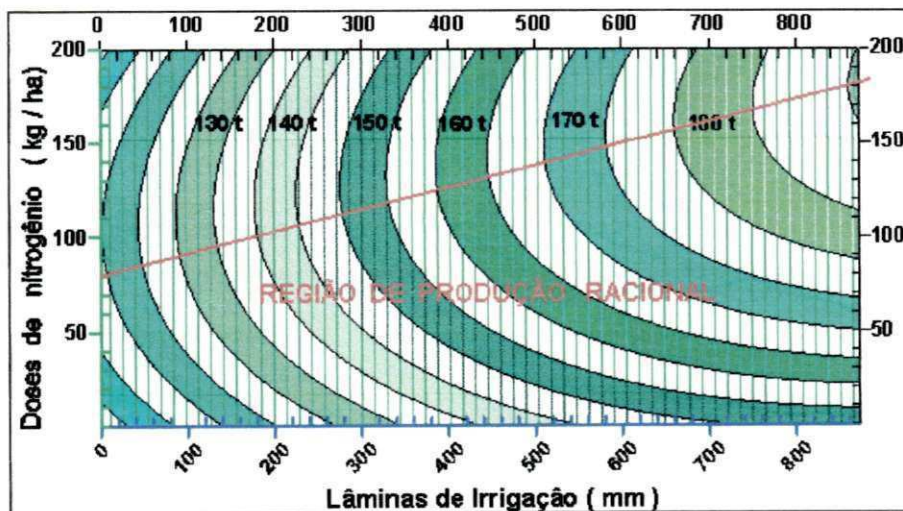


Figura 27. Região de produção racional da cultura da cana-de-açúcar no ciclo de produção de cana-planta na região de Rio Largo, AL, na safra 2009/2010, em função de lâminas de irrigação e doses nitrogênio

As linhas que limitam a região de produção racional da cana-de-açúcar, do segundo ciclo de cultivo, iniciam na dose de nitrogênio de 87 kg ha⁻¹ e na lâmina de irrigação bruta total de 700 mm, convergindo no centro da isoquanta da produtividade agrícola máxima de 210 t ha⁻¹ (Figura 28). Essa produtividade seria obtida com a combinação de 304 kg de nitrogênio por hectare e 1.123 mm de irrigação; então, como a

lâmina de irrigação total máxima aplicada no ciclo de produção da cana-soca desse experimento foi somente 734 mm, o ponto de convergência dessas duas linhas não aparece na referida figura. O fato da reta que limita a quantidade de água da região de produção racional iniciar em lâminas de irrigação maiores do que as lâminas máximas utilizadas nessa pesquisa, indica que a cana-de-açúcar responde a níveis de irrigação superiores a 150 % da ETo , ou seja, o Kc máximo dessa cultura na região analisada deve ser superior a 1,50. Porém, considerando-se a combinação dos fatores que resultam no menor custo de produção, os valores do Kc máximo, contabilizando apenas água de irrigação, seriam 1,15 e 1,25 ou, somando-se chuva mais irrigação, 1,37 e 1,49 em cana-planta e cana-soca, na mesma ordem. [Inman-Bamber & McGlinchey \(2003\)](#) observaram que na fase de máximo crescimento o Kc da cana-de-açúcar varia de 0,91 a 1,54.

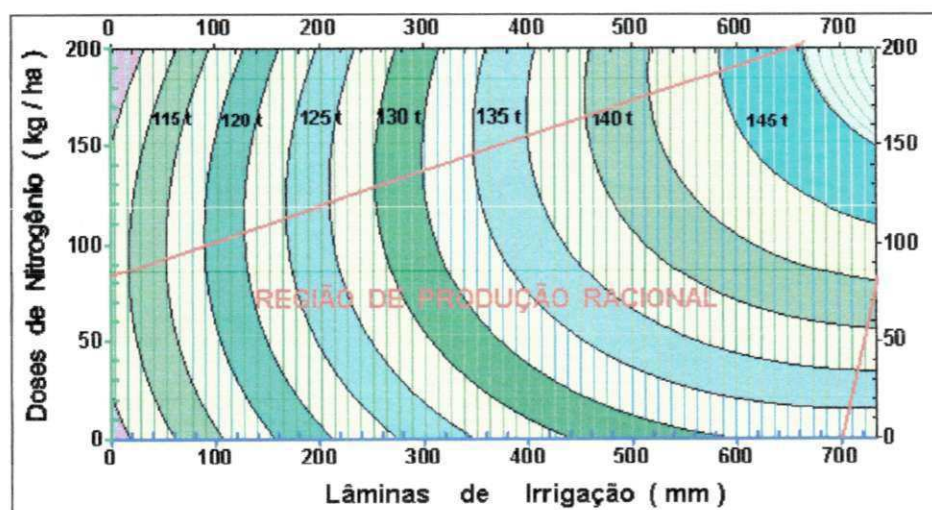


Figura 28. Região de produção racional da cultura da cana-de-açúcar no ciclo de produção de cana-soca na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio

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.

STUPIELLO, J. P. ART ou ATR. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB. v. 28, n. 2, p. 12, Nov. / dez.2009.

TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, R. C.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. *Field Crops Research*, n. 102, p. 64-72. 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. v. 27, n. 4, p.46 – 49, 2009

VALE, D. 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. v. 28, n. 2, p.32 – 37, 2009

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A.; QUINTINO, T. A.; OTTO, R. Nutrição e adubação. In: RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. *Plantio da cana-de-açúcar. Estado da arte*. Piracicaba: Esalq. 2006. p. 102 – 144.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P.; BOLONGNA, I. R.; FARONE C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesquisa agropecuária brasileira*. Brasília. V. 42, n.2, p.249 – 256, 2007.

WANGA, J.; MILLER, D. R.; SAMMIS, T.W.; GUTSCHICK, V. P.; SIMMONS, L. J.; ANDALES, A.A. Energy balance measurements and a simple model for estimating pecan water use efficiency. *Agricultural water management*. Amsterdam. V. 9, p.92–101, 2007.

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, n. 67, p. 133 - 143. 2004.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, n. 43, p. 173 - 182. 2000.

WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. *Agricultural water management*. Amsterdam, n. 64, p. 169 – 181, 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, mai. / jun. 2008.