



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL**

**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CECA**

**MESTRADO EM ENERGIA DA BIOMASSA**

**DIOGO CAETANO OLIVEIRA**

**FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB  
DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO**

**Rio Largo – AL**

**2017**

**DIOGO CAETANO OLIVEIRA**

**FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB  
DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Biomassa da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do grau de Mestre em Energia da Biomassa. Área de concentração: Etanol

Orientador: Prof. Dr. Iedo Teodoro

**Rio Largo – AL**

**2017**

Catalogação na fonte  
Universidade Federal de Alagoas  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias  
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

O48f Oliveira, Diogo Caetano  
Função de produção de etanol de cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio / Diogo Caetano Oliveira – 2017.  
58 f.; il; 33 cm

Orientador: Iedo Teodoro  
Dissertação (Mestrado em Energia de Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2017.

Inclui bibliografia

1. Balanço hídrico 2. Isoquantas 3. Função de produção I. Título.

CDU: 663.52

## TERMO DE APROVAÇÃO

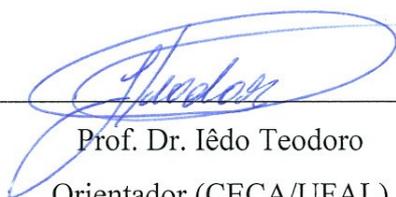
DIOGO CAETANO OLIVEIRA

### FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre Profissional em Energia da Biomassa, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

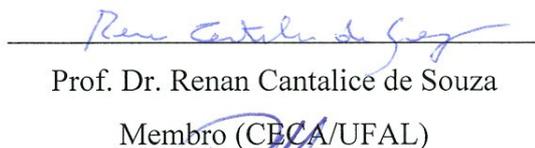
A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovado em 02/03/2017



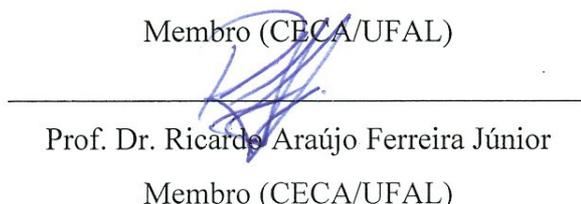
---

Prof. Dr. Iêdo Teodoro  
Orientador (CECA/UFAL)



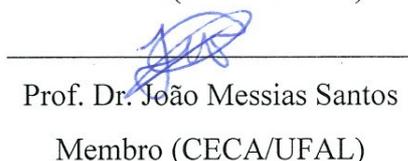
---

Prof. Dr. Renan Cantalice de Souza  
Membro (CECA/UFAL)



---

Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Júnior  
Membro (CECA/UFAL)



---

Prof. Dr. João Messias Santos  
Membro (CECA/UFAL)

Rio Largo – AL

2017



## AGRADECIMENTOS

Ao **Grande Arquiteto do Universo**, que está presente em todos os momentos da minha vida e rege cada passo que dou, me tirando da escuridão quando meus caminhos e meus pensamentos são iluminados pela fé e esperança que guardo em meu coração.

Ao meu orientador, **Professor Iedo Teodoro**, doutor em Engenharia Agrícola, que aceitou ser meu instrutor neste desafio de elevar o meu conhecimento e contribuir com a ciência, agradeço pelo apoio, pelos ensinamentos, pela força e por muitas vezes mostrar qual o melhor método na confecção deste trabalho.

Ao **Professor Guilherme Bastos Lyra**, pela compreensão, paciência e incentivo, o que me ajudou a vencer os desafios neste caminho e a todo o corpo docente do programa de pós-graduação do Mestrado em Energia da Biomassa, em especial ao **Professor Ricardo Araújo Ferreira Junior** pelas excelentes aulas.

Por fim, a todos os colegas de turma e todos que fazem parte do corpo funcional do Centro de Ciências Agrárias – Ceca, e dedicam sua vida e seus recursos a sempre melhorar a qualidade o ensino público brasileiro.

“O amor não é um sentimento, é um modo de ser. É um juramento interior de defender o ser amado até a morte, mesmo quando ele peca gravemente contra você. O amor é mesmo, como dizia Jesus, morrer pelo ser amado. Quando a gente espera que o amor torne a nossa vida mais agradável, em vez de sacrificar a vida por ele, a gente fica sem o amor e sem a vida. O amor é o mais terrível dos desafios, porém, quando você o conhece, não quer outra coisa nunca mais.”

**Olavo de Carvalho**

## **FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO**

### **RESUMO**

A cana-de-açúcar é uma cultura agrícola de relevante importância para o estado de Alagoas, principalmente pelo alto potencial para produção de bioetanol, que é um dos principais componentes da matriz energética brasileira e estudar as relações de fatores de produção como água e nitrogênio é indispensável para a melhoria na eficiência de seus usos. Por isso, com o objetivo de avaliar os rendimentos de etanol de cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação (L) e doses de nitrogênio (N), um experimento foi desenvolvido na região de Rio Largo, AL. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com sete lâminas de irrigação, cinco doses de nitrogênio e quatro repetições. As lâminas de irrigação foram determinadas com base na evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), sendo: 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 as doses de N utilizadas foram: zero, 50, 100, 150 e 200 kg de N por hectare. O rendimento médio de etanol obtido foi de 14,14  $m^3 \cdot ha^{-1}$ . A lâmina de irrigação de máxima eficiência econômica foi 307 mm e o rendimento físico máximo de etanol (15,14  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) foi alcançado com 573 mm de irrigação. Com relação as doses de nitrogênio, a de máxima eficiência econômica foi 118 kg de  $N \cdot ha^{-1}$  e a que proporciona máximo rendimento físico de etanol (14,51  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) foi 95 kg de  $N \cdot ha^{-1}$ . O produto físico marginal do nitrogênio se torna negativo entre as doses 100 e 125 kg de  $N \cdot ha^{-1}$ , enquanto o produto físico marginal da água fica negativo entre 500 e 600 milímetros. A taxa marginal de substituição de água por nitrogênio varia de acordo com o preço do milímetro de água, o quilograma do nitrogênio e o metro cúbico de etanol e essa taxa proporciona o custo mínimo em cada nível de produto quando se iguala a 1,53  $mm \cdot kgN^{-1}$ . A região de produção racional situa-se no início das retas de tangencia das isoquantas (86 kg de N e 510 mm) até o encontro no nível de 15,60  $m^3 \cdot ha^{-1}$  de etanol.

Palavras chaves: Balanço hídrico. Isoquantas. Função de produção.

## FUNCTION OF ETHANOL PRODUCTION OF SUGARCANE UNDER DIFFERENT IRRIGATION LEVELS AND NITROGEN RATES

### ABSTRACT

Sugarcane is a crop of relevant importance for the Alagoas state, mainly due to the high potential for ethanol production that is currently one of the main products of the Brazilian energy matrix. Therefore, in order to evaluate ethanol yields as a function of irrigation levels (L) and nitrogen (N) rates, an experiment was carried out in the region of Rio Largo, AL. The experimental design was a completely randomized block in the scheme of subdivided plot, with seven irrigation levels, five nitrogen doses and four replicates. The irrigation levels were determined based on reference evapotranspiration ( $ET_0$ ): 0,0  $ET_0$ ; 0,25  $ET_0$ ; 0,50  $ET_0$ ; 0,75  $ET_0$ ; 1,00  $ET_0$ ; 1,25  $ET_0$  and 1,50  $ET_0$  and the doses of N were: zero, 50, 100, 150 and 200 kg of N per hectare. The average gross income of ethanol obtained was 14,14  $m^3 \cdot ha^{-1}$ . The irrigation level of maximum economic efficiency was 307 mm and the maximum physical yield of ethanol (15,14  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) was achieved with 573 mm. In relation to the nitrogen rates, the one of maximum economic efficiency was 118 kg of  $N \cdot ha^{-1}$  and the highest physical yield of gross ethanol (14,51  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) was 95 kg of  $N \cdot ha^{-1}$ . The square root polynomial function represented well the yield of ethanol in relation to water and nitrogen. The marginal physical product of nitrogen being below zero between 100 and 125 kg of  $N \cdot ha^{-1}$ , and the marginal physical product of nitrogen being below zero between 500 and 600 millimeters. The marginal rate of replacement of water by nitrogen varies according to the price of the millimeter of water, the kilogram of nitrogen and the cubic meter of ethanol and this rate provides the minimum cost at each yield level when it equals 1,53  $mm \cdot kgN^{-1}$ . The region of rational production was located at the beginning of the tangency of the isoquants (86 kg of N and 510 mm) until the crossing at the level of 15,60  $m^3 \cdot ha^{-1}$ .

Key words: Water balance. Isoquants. Production function.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 01</b> – Produção de etanol em função de lâminas de irrigação (curva de regressão raiz quadrada) em cana-soca na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.....	36
<b>Figura 02</b> – Produção máxima de etanol e de máxima eficiência econômica em função de lâminas de irrigação em cana-soca na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.....	37
<b>Figura 03</b> – Produção de etanol em função de doses de nitrogênio (curva de regressão raiz quadrada), em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.....	38
<b>Figura 04</b> – Produção máxima de etanol e de máxima eficiência econômica em função de doses de nitrogênio em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.....	39
<b>Figura 05</b> – Isoquantas de produção de etanol em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.....	40
<b>Figura 06</b> – Isoquanta de produção de etanol, em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, com os pontos em que foram estimadas as taxas marginais de substituição de milímetro de água por quilograma de nitrogênio (letras a, b, c e d) e quantidade de água e nitrogênio que proporciona o custo de produção mínimo (✚) para os respectivos rendimentos de etanol .....	42
<b>Figura 07</b> – Região de produção racional da produção de etanol, em cana-soca na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> – Demonstrativo de valores do preço do milímetro de água aplicada no cultivo da cana-de-açúcar via irrigação por gotejamento.....	31
<b>Tabela 02</b> – Preço do adubo utilizado para a adubação nitrogenada da cana-de-açúcar.....	31
<b>Tabela 03</b> – Preço do etanol hidratado na safra 2015/2016, utilizado para calcular o ajuste de preços do etanol absoluto.....	32
<b>Tabela 04</b> – Resumo da análise de variância da produção de etanol em cana-soca na safra 2010/2011.....	35
<b>Tabela 05</b> – Produto físico marginal da água ( $PM_{g_L}$ ) e produto marginal do nitrogênio ( $PM_{g_N}$ ) para diferentes níveis de água e nitrogênio, com base na curva de regressão polinomial de segundo grau, na região de Rio Largo, AL.....	41
<b>Tabela 06</b> – Valores de taxa marginal de substituição $TMS_{L/N}$ de lâmina de irrigação bruta por doses de nitrogênio aplicados em cana-soca nas isoquantas de 13,60; 14,00; 14,40; 14,80 e 15,20 $m^3 \cdot ha^{-1}$ na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
<b>2.1 Geral</b> .....	13
<b>2.2 Específicos</b> .....	13
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
<b>3.1 A cultura da cana-de-açúcar</b> .....	14
<b>3.2 Variedades e melhoramento genético da cana-de-açúcar</b> .....	16
<b>3.3 Balanço hídrico</b> .....	17
<b>3.4 Irrigação</b> .....	17
<b>3.5 Necessidades nutricionais da cana-de-açúcar</b> .....	19
<b>3.6 A produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil</b> .....	21
<b>3.7 Função de produção ou função de resposta</b> .....	22
<b>3.8 Produto Físico Marginal</b> .....	24
<b>3.9 Isoquanta e Taxa Marginal de Substituição</b> .....	24
<b>3.10 Região de Produção Racional</b> .....	25
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	26
<b>4.2 Tratamentos e delineamento experimental</b> .....	26
<b>4.3 Manejo da cultura</b> .....	26
<b>4.4 Variáveis meteorológicas e Balanço Hídrico</b> .....	27
<b>4.5 Produção de etanol</b> .....	28
<b>4.6 Função de produção</b> .....	28
<b>4.7 Produto físico marginal das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio</b> .....	29

<b>4.8 Análise física e econômica da produção</b> .....	29
<b>4.9 Superfície de resposta para análise conjunta dos fatores de produção de água de irrigação e adubação nitrogenada</b> .....	32
<b>4.10 Taxa marginal de substituição de água por nitrogênio</b> .....	33
<b>4.11 Combinação dos fatores para obtenção do custo mínimo</b> .....	33
<b>4.12 Região de produção racional</b> .....	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	35
<b>5.1 Produção de etanol em função das lâminas de irrigação</b> .....	35
<b>5.2 Produção de etanol em função das doses de nitrogênio</b> .....	48
<b>5.3 Superfície de Resposta</b> .....	40
<b>5.4 Produto físico marginal</b> .....	41
<b>5.5 Taxa marginal de substituição e combinação de fatores para obtenção do custo mínimo</b> .....	42
<b>5.6 Região de produção racional</b> .....	43
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	45
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	46
<b>8 APÊNDICES</b> .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O panorama internacional de energia apresenta uma grande dependência de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás) que ocupa cerca de 80% da matriz energética mundial. O consumo desses combustíveis tem aumentado de forma insustentável, o que pode causar futuramente a exaustão de suas reservas além de agredir o meio ambiente por meio das emissões de gases do efeito estufa (GOLDEMBERG, 2008). Neste cenário fica clara a importância da produção de combustíveis renováveis, como o etanol de cana, um dos principais combustíveis usados em automóveis atualmente e um excelente substituto para a gasolina. As perspectivas do mercado de bioetanol no Brasil são evidentemente diferenciadas, devido ao histórico de baixo custo evidenciado, a grande expansão no consumo e à capacidade de produção agroindustrial (BNDES, 2008).

O Brasil é um dos países que se destacam com vantagens competitivas no mercado agroenergético, com vasta disponibilidade de áreas agricultáveis e sem competir, ainda, com a produção de alimentos, pois pode ocupar áreas de pastagens degradadas. Portanto, o setor sucroalcooleiro merece posição de destaque e pode contribuir também para a geração de energia elétrica, coggerando a mesma a partir do bagaço da cana que é um dos subprodutos da produção de açúcar e etanol (MARQUES, 2006). Porém, devido diversos fatores, dos quais é importante destacar o cenário político-econômico brasileiro e regimes de precipitação pluvial desfavoráveis nos últimos anos, diversas Indústrias Sucroenergéticas pararam suas operações o que acarretou uma diminuição da produção do estado de Alagoas, que caiu de 29,12 milhões de toneladas na safra 2010/2011 para 16,19 milhões de toneladas na safra 2015/2016, além disso sua produtividade, que já estava abaixo do índice nacional ( $74 \text{ t.ha}^{-1}$ ), caiu de 64,45 na safra 2010/2011 para 50,04 na safra 2015/2016 (CONAB, 2016).

Teodoro (2011) evidencia que a má distribuição de chuvas na região canavieira alagoana contribui para o decréscimo, e é o principal fator limitante da produtividade agrônômica da cana-de-açúcar no estado, que apresenta um índice pluviométrico anual de 1.800 mm na microrregião litoral centro (zona canavieira). Souza et al (2004), observou que durante o período de abril a agosto há um elevado excedente hídrico, não obstante nos meses de outubro a fevereiro, a possibilidade da precipitação pluvial superar a evapotranspiração de referência é inferior a 20%, acarretando na ocorrência de um elevado déficit hídrico.

A solução para eliminar ou diminuir os efeitos nocivos da irregularidade pluviométrica existente em Alagoas pode ser o uso da técnica de irrigação. Estudos hidrológicos indicam que o Brasil possui uma grande disponibilidade hídrica e explora somente 10% do seu potencial em áreas aptas para a irrigação, e uma boa parte delas encontra-se em Alagoas (ANA, 2016) que é o estado com maior uso para este fim, 75% dos canaviais alagoanos possui algum tipo de irrigação, cerca de 300 mil hectares (JORNALCANA, 2015).

Uma das práticas culturais mais estudadas em cana-de-açúcar é a adubação nitrogenada, pois os estudos sobre nitrogênio apresentam resultados muito variáveis e diversas vezes até contraditórios (KORNDORFER et al., 2002) . Em cana-de-açúcar, um dos maiores problemas com adubação nitrogenada é a baixa recuperação de N pela cultura, entre 10 a 40%, assim a porção de nitrogênio que não foi utilizado pode permanecer no solo, ser incorporado como matéria orgânica, ser perdido para a atmosfera ou lixiviação abaixo da zona da raiz onde a cultura extrai água e nutrientes (HARTEMINK, 2008).

Portanto é evidente a necessidade de pesquisas para determinar a real necessidade hídrica da cultura da cana-de-açúcar, para elevar os conhecimentos sobre o uso eficiente da água do solo e para quantificar a lâmina de irrigação economicamente viável para a produção de bioetanol, quantificar a produção de etanol em relação as diferentes dosagens de N, assim como para a sustentabilidade ambiental.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

O objetivo desta pesquisa, é avaliar os rendimentos de etanol de cana-de-açúcar por hectare cultivado sob diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, na região de Rio Largo, AL.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Estimar a produção de etanol da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio;
- Encontrar a função de produção de etanol de cana-de-açúcar em diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio por meio de equações de regressão;
- Determinar a lâmina de irrigação e a dose de nitrogênio que proporcionam a máxima eficiência econômica e a produção física máxima de etanol;
- Determinar os produtos físicos marginais das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio;
- Calcular a taxa marginal de substituição de lâminas de irrigação por doses de nitrogênio;
- Encontrar as combinações de quantidades de água e nitrogênio que resultam em menor custo de produção de etanol na cana-de-açúcar;
- Determinar a região de produção racional de etanol em cana-de-açúcar em função da quantidade de nitrogênio e lâmina de irrigação.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 A produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil**

No início da década de 70, o Brasil ampliava a utilização de derivados de petróleo e diminuía a demanda por produtos vegetais. O consumo de combustíveis fósseis crescia acima de 10% ao ano antes do primeiro choque do petróleo (1974). Apesar da elevação do preço neste ano a demanda por este produto continuou aquecida, pois uma mudança sistemática na matriz energética brasileira poderia atrapalhar o processo de consolidação da competitividade internacional de outros setores (ROPPA, 2005).

A partir do surgimento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado para amenizar os efeitos da crise do petróleo nos anos 70, do século XX, o setor sucroalcooleiro ganhou maior importância na economia do Brasil. Até 1975 o etanol de cana-de-açúcar era pouco produzido, na maioria das vezes essa produção era secundária em destilarias anexas as usinas (SANTOS, 2011). Assim, conforme Moraes (2000), entre 1975 e 1990 começou a produção de álcool anidro para adição na gasolina, aumento da produção de álcool hidratado para utilização em carros com motores movidos a álcool e, por fim, início da desregulamentação do setor. Com isso a agroindústria canavieira entrava numa nova fase.

Entre os anos de 1986 e 1987, deu-se início a crise do Proálcool devido a uma conjuntura desfavorável ao setor produtivo. O principal fator limitante foi a queda dos preços do petróleo. Além disto nesta fase os preços do etanol eram fixados pelo governo e atrelado às variações internacionais do petróleo, e tudo isso corroborou com a queda no preço do etanol. Por outro lado como se tinha uma demanda doméstica aquecida, houve consequente falta de etanol no mercado brasileiro (SCHUNEMANN, 2008).

Após a década de 90, a estrutura de preços dos derivados do petróleo era definida de forma a propiciar a cobertura dos custos dos agentes econômicos envolvidos na cadeia de produção e distribuição dos produtos. Em relação aos preços do etanol, estes eram fixados pelo Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) que utilizava uma metodologia baseada nos custos de produção dos produtos sucroalcooleiros. Para esse fim, tomavam-se os preços do açúcar cristal como referência e por paridades fixadas por portarias do Ministério da Indústria e do

Comércio e das Minas e Energia, chegavam-se aos preços do álcool (MAISTRO e BARROS, 2002)

A partir dos anos 2000, ocorreram fatores que impactaram a demanda de combustíveis no Brasil, sendo o principal deles, o advento dos carros com motores flex-fuel que alterou rapidamente a composição da frota de veículos leves. A possibilidade do consumidor escolher entre a gasolina e o etanol hidratado ou até mesmo uma combinação entre esses resultou numa nova dinâmica no mercado brasileiro (SOUZA, 2010).

O Brasil é hoje o segundo maior produtor de etanol do mundo, com uma produção de 30,4 bilhões de litros na safra 2015/2016, um aumento de 6,29% em relação à safra anterior que alcançou 28,65 bilhões de litros, e ficou atrás apenas dos Estados Unidos da América (RFA, 2015). O mercado doméstico tem sido o principal destino do etanol brasileiro, garantindo o suprimento da demanda interna por etanol hidratado.

Na cadeia de produção da agroindústria canavieira, o laboratório de sacarose pode avaliar a qualidade da cana-de-açúcar que é essencial para a escolha da melhor época de colheita. Nesse tipo de laboratório são analisadas variáveis industriais como, teor de açúcares, fibra, pureza etc. Esses dados além de avaliar a qualidade do canavial, são utilizados para estimar a produção de açúcar e etanol, e auxilia na decisão de qual produto a indústria irá fabricar. No que concerne ao etanol a estimativa de produção é dada em etanol bruto ou absoluto (100 °INPM) e para estimar a produção de etanol hidratado ou anidro é necessário fazer a transformação estequiométrica, levando em consideração o peso específico e a concentração de cada produto, além da eficiência da fermentação e da destilação da indústria que irá produzir. Em termos de estimativas gerais é considerado 88,8% e 99% para eficiência da fermentação e destilação respectivamente (CONSECANA, 2015).

Existem diversos métodos matemáticos para estimar a produção de etanol de cana-de-açúcar e diversos fatores que interferem na produção são considerados nestas estimativas, dentre eles as características dos cultivares de cana-de-açúcar, que está ligado diretamente as características de qualidade industrial. A União dos Produtores de Bioenergia apresenta algumas fórmulas e conversões utilizadas para quantificação do Etanol, em laboratórios de sacarose no sistema de pagamento de cana-de-açúcar é utilizada a seguinte fórmula:

$$AP = [(pol\% \text{ cana} * 8,8 * 1,0526) + (ar\% \text{ cana} * 8,8)] * 0,97 * 0,903 * 0,647$$

Em que: AP é o álcool provável em litros; pol%cana é o teor de açúcares bruto da cana; ar%cana é o teor de açúcares redutores da cana.

A Sociedade dos Técnicos Açúcareiros e Alcooleiros do Brasil utiliza a transformação de 1 unidade de álcool anidro é equivalente a 1,7160 quilos de ART, e 1 unidade de álcool hidratado equivale a 1,64736 quilos de ART.

O CONSECANA apresenta a seguinte conversão: 1 unidade de álcool anidro equivale a 1,8169 quilos de ART, e 1 unidade de álcool hidratado é igual a 1,7409 quilos de ART, a mesma instituição apresenta a seguinte fórmula para ART:

$$ART = 9,26288 * PC * 8,8 * AR$$

Em que: ART é igual a açúcares redutores totais; PC é pol da cana, e AR são os açúcares redutores.

Para Caldas (1998), o método mais adequado para se estimar o etanol bruto seria pela fórmula:

$$RB = (((PCC \times F) + ARL) \times Fg) \times 0,01 \times RC$$

Em que: RB é o rendimento bruto de etanol em m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>; PCC é o teor de açúcares da cana; ARL é igual a açúcares redutores livre; Fg é o fator de Gay Lussac e RC é igual a rendimento de colmos em t.ha<sup>-1</sup>.

### 3.2 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é originária do sudoeste da Ásia, mas os primeiros relatos de sua existência foram encontrados em escrituras Hindus. Toletes de cana eram levados por caravelas portuguesas para servirem de suprimentos nas terras descobertas. Dessa maneira Cristovão Colombo introduziu a cultura nas Américas, e, em 1502, a mesma foi introduzida no Brasil por Martim Afonso de Souza por mudas advindas da Ilha da Madeira (CESNIK e MIOCQUE, 2004).

Andrade (1998) evidencia que, entre alguns dos principais fatores que ajudaram na expansão da cana no Brasil, estão o relevo plano da planície litorânea (Zona da Mata), a proximidade com os centros consumidores, além de outros condicionantes naturais como regime pluviométrico propício.

A cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, alógama e perene, pertencente a família *Poaceae*. Seus cultivares atuais são híbridos interespecíficos, sendo que nas constituições genéticas participam as espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barbieri*, *S. robustus* e *S. edule* (JADOSKI et al, 2010).

Rodrigues (1995), afirma que a cana se trata de uma planta de reprodução sexuada; quando cultivada comercialmente, porém, é multiplicada assexuadamente, por propagação vegetativa. Caracteriza-se pela inflorescência do tipo panícula, flor hermafrodita, caule em crescimento cilíndrico composto de nós e entrenós, folhas alternas, opostas, presas aos nós dos colmos, com lâminas de sílica em suas bordas, e bainha aberta.

A cana-de-açúcar é uma planta do grupo C4, por isso possui alta eficiência fotossintética devido, provavelmente, à compartimentação de enzimas e as características anatômicas das folhas, tendo portanto taxa de fotorrespiração baixa ou ausente. O autor evidencia ainda que a produtividade da cana-de-açúcar depende da eficiência da integração do seu sistema produtivo formado pelas folhas fotossinteticamente ativas, do escoamento e distribuição do produto fotossintetizado, do consumo pela planta no seu desenvolvimento e reprodução e do acúmulo e armazenamento de sacarose (MACHADO, 1987).

Alguns dos aspectos de maior importância para se ter boa produtividade final ou bom estado de mudas estão relacionados com as práticas de plantio, a propagação da cana-de-açúcar é feita por intermédio de pedaços de colmo (toletes), contendo uma ou mais gemas. Em relação a profundidade do plantio, deve-se atentar para dois aspectos, a profundidade do sulco e a espessura da camada de terra que é colocada sobre os toletes (CASAGRANDE, 1991). O autor afirma ainda que a falta de umidade do solo pode prejudicar a brotação dos toletes, assim como o excesso causado pela irrigação, drenagem irregular e acúmulo de água de chuvas.

O ciclo de produção da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro fases de desenvolvimento: 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). O perfilhamento inicia-se em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias, sendo um processo fisiológico de ramificação subterrânea contínua das juntas nodais compactadas ao broto primário. Ele proporciona ao cultivo o número de colmos necessário para uma boa produção. Perfilhos formados mais cedo ajudam a produzir talos mais grossos, enquanto os formados mais tarde morrem ou permanecem curtos e imaturos. A população máxima é alcançada aos 90 a 120 dias (DIOLA e SANTOS, 2010).

O crescimento dos colmos da cana-de-açúcar começa aos 120 dias após o plantio e dura até 270 dias, em um cultivo de 12 meses. Essa é a fase mais importante do cultivo, pois é a fase em que ocorrem a formação e o alongamento do colmo, que resulta na produção final. Por ser considerada uma planta do tipo C4, a cana apresenta taxa de crescimento e uso da água altamente eficientes (ROCKSTROM *et al*, 1999).

Os rendimentos da cana-de-açúcar produzidas em condições de sequeiro nos trópicos úmidos, variam entre 70 a 100 t.ha<sup>-1</sup>, e nos trópicos e sub-trópicos secos, com irrigação, rendimentos entre 100 e 150 t.ha<sup>-1</sup>, que podem ser considerados satisfatórios. O teor de açúcar parece diminuir ligeiramente com o aumento do rendimento de colmos da cultura e, para isso, é preciso evitar o crescimento demasiado na fase maturação da cana, o que pode ser obtido com temperaturas baixas, dose reduzida de nitrogênio e suprimento limitado de água (DOORENBOS e KASSAM, 1994).

A colheita de cana-de-açúcar ocorre em todas as regiões do Brasil, o que permite a produção da cultura durante todo o ano, se dividindo da seguinte forma: de maio a novembro na nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul; e entre setembro e março nas regiões Norte e Nordeste.

A região Centro-Sul é a principal produtora nacional de cana-de-açúcar respondendo por um total de 92,67% ou 616,7 milhões de toneladas, enquanto que a região Norte-Nordeste produz 7,33% correspondente a 48,81 milhões de toneladas. Nesta região o maior estado produtor é Alagoas, onde, na safra 2015/2016, em uma área de 323,6 mil hectares, produziu cerca de 16,19 milhões de toneladas de colmos. Os principais produtos gerados a partir dessa

cultura que podemos destacar são o açúcar com 1,21 milhões de toneladas e o etanol com 373,1 milhões de litros (CONAB, 2016). Além da produção de etanol e açúcar, as usinas têm buscado operar de forma mais eficiente, incluindo a geração de energia em seus projetos, o que auxilia na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade.

Em Alagoas, a cana é responsável pela manutenção e crescimento econômicos de vários municípios. A cultura da cana-de-açúcar em Alagoas é responsável pela geração de 120 mil empregos diretos e 270 mil empregos indiretos e contribui com 27% do PIB estadual (SANTOS, 2011).

### **3.3 Variedades e melhoramento genético de cana-de-açúcar**

Em meados do século passado os canaviais do mundo todo passaram a apresentar graves problemas fitossanitários, com elevadas perdas de produção e, com isso, muitas indústrias foram à falência. Em virtude deste fato, e dos conhecimentos das leis da genética aliada à descoberta de que a cana produzia sementes, iniciaram-se os esforços para o melhoramento genético da cana-de-açúcar (MATSUOKA, 1996).

Na atualidade, os programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar são desenvolvidos em diferentes países, por instituições públicas e privadas, ou em sistemas cooperativos formados por produtores. Estes são empreendimentos onerosos, e seus resultados obtidos apenas a longo prazo, chegando a mais de 15 anos (CESNIK, 2004).

Santos (2015), afirma que no Brasil, os programas de melhoramento genético foram, inicialmente, criados por produtores curiosos, no início do século passado. Em 1972 foi criado o Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (PLANALSUCAR), o qual após sua extinção em 1990, passou a ser conduzido pelas Universidades Federais que compõe e Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA). Atualmente a RIDESA é composta por sete Universidades Federais. Essas instituições são responsáveis pelos cultivares de cana-de-açúcar com a sigla RB (República do Brasil). Atualmente existem no Brasil quatro programas de melhoramento genético de cana-de-açúcar, sendo eles: RIDESA (RB), Coopersucar (SP-CTC), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e, o mais recente deles, CANAVIALIS (CV).

A diversificação e a modernização do plantel de variedades contribuem decisivamente para a sustentabilidade do agronegócio, não apenas pelos ganhos de produtividade, como também pela redução dos riscos de pragas e doenças e das perdas agrícolas. Isso devido a esses novos materiais genéticos serem desenvolvidos para atender aos modernos processos produtivos, como plantio e colheita mecanizadas (CTC, 2015).

Apesar do estado de Alagoas ser o maior produtor de cana-de-açúcar do Nordeste e possuir alto nível tecnológico, há nesta região problemas que afetam a produção da cultura, destacando-se a distribuição irregular de chuvas durante o período anual, cerca de 70% das chuvas se concentram no período de abril a agosto enquanto 30% se distribuem de outubro a fevereiro (SOUZA et al., 2004; CARVALHO et al., 2013b). Esta falta de uniformidade na distribuição de chuvas no decorrer do ano resulta em menor armazenamento de água no solo no período seco, o que provoca a redução na evapotranspiração real, no crescimento e na produtividade da cultura; assim, é imprescindível o uso de irrigação nesta região (DANTAS NETO et al., 2006; TEODORO et al., 2009).

### **3.4 Balanço Hídrico**

Existem diversas metodologias para estimar a demanda de água nos diferentes estádios de desenvolvimento das culturas agrícolas, cada um deles tendo com relação as características específicas dos insumos utilizados e suas estimativas. Dentre estes, o balanço hídrico da cultura realizado diretamente no campo permite que o acompanhamento das demandas de água durante o crescimento da cultura sendo, portanto, muito importante para uma gestão racional dos recursos do solo e água e maximização da produtividade (TIMM et al. 2002).

O balanço hídrico é determinado a partir da quantificação de água disponível em um dado perfil de solo baseado no princípio de conservação de massa, contabilizando os diversos movimentos de água (precipitação pluvial, irrigação, escoamento subsuperficial, drenagem e evapotranspiração). Diversos autores (ROSE e STERN, 1967; REICHARDT et al., 1979; VILLAGRA et al., 1995) utilizam esse conceito e a metodologia consiste na soma de todas as quantidades de água que entram e saem do solo em um dado intervalo de tempo. De acordo com Moura et. al (1994), cada componente avaliado através de diferentes técnicas, e apesar de todas as dificuldades e erros que envolvem essas estimativas, um balanço hídrico completo

constitui uma importante ferramenta de gestão no manejo da cultura, sobretudo para o controle da irrigação.

### 3.5 Irrigação

Bernardo et al (2005) afirma que, a irrigação é um método que tem por objetivo fornecer água para as plantas em quantidade suficiente e no momento oportuno para, através do umedecimento do solo, garantir uma produtividade competitiva as culturas. Cardozo (2005), afirma que os benefícios proporcionados pela irrigação podem ser considerados diretos e indiretos: os diretos são aqueles percebidos de forma quantitativa na lavoura após a aplicação de água ou no final da colheita e os indiretos são relacionados com as vantagens agronômicas observadas após a colheita ou nos ciclos de produção subsequentes da cultura.

Estudos em relação ao consumo de água pela cultura e uso de recursos hídricos para a irrigação vem tornando-se cada vez mais frequentes de forma que tal operação é um dos fatores de maior influência na produtividade agrícola e no custo de produção da cana-de-açúcar. Para que seja suprida a necessidade hídrica das plantas deve-se estimar a evapotranspiração da cultura (ETc). Assim, para que as plantas atinjam o potencial de evapotranspiração é necessário que o teor de umidade do solo esteja igual ou próximo da capacidade de armazenamento de água disponível (CAD). Todavia, devido a presença de pragas e doenças, salinidade, baixa fertilidade do solo e escassez ou saturação de água, a ETc se torna diferente do valor máximo encontrado em condições ótimas, chamando-se assim de evapotranspiração real (ETr) (PEREIRA et al., 2002; ALLEN et al., 2005).

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia com o estágio vegetativo em que a cultura se encontra e a cultivar utilizada (AUDE, 1993) sendo assim, função da área foliar, estágio fisiológico e densidade radicular. De acordo com Dorenbos e Kassam (1979), a cana-de-açúcar é uma cultura que demanda elevado volume de água no seu sistema de produção, consumindo entre 1.500 e 2.000 mm por ciclo anual para produtividades em torno de 100 a 150 t.ha<sup>-1</sup>.

Gonçalves (2010), afirmou que cada sistema de irrigação apresenta características específicas em relação à manutenção da disponibilidade hídrica para a cultura e estas também dependerão das características edafoclimáticas de cada região. No tocante a cana-de-açúcar,

apesar de poucos estudos realizados e áreas instaladas, a irrigação por gotejamento subsuperficial vem sendo evidenciada como a mais vantajosa, devido ao melhor aproveitamento de água e nutrientes, à redução da população de plantas daninhas, ao menor acúmulo de sais na superfície e a sua menor interferência nos tratos culturais e na colheita.

Teodoro (2011), afirma que os métodos de irrigação definem a forma como a água é aplicada nas plantas e os sistemas de irrigação são representados pelos equipamentos, as estruturas e demais artificios utilizados nos respectivos projetos. Segundo o autor, no planejamento de um projeto de irrigação, usualmente a primeira etapa consiste na escolha do método e do sistema de irrigação. Estes métodos podem ser divididos em três grupos: irrigação por superfície, por aspersão e localizada, e cada um destes, tem diversos sistemas que atendem às mais diversas situações. O autor explica ainda que, aspersão é o método mais utilizado na irrigação da cana-de-açúcar, através de sistemas convencionais de alta pressão portátil ou móvel, com deslocamento manual ou autopropeido. Nos últimos anos, o método de irrigação localizada por gotejamento subsuperficial vem sendo muito difundido com perspectiva de grande aumento de área, e a região Nordeste do Brasil se inclui nesta conjuntura.

### **3.6 Necessidades nutricionais da cana-de-açúcar**

Sediyama et al. (2009) afirmam que, estudos os quais avaliam o total de nutrientes removidos por hectare na colheita das culturas têm sido uma estratégia para determinar a quantidade necessária de fertilizantes a serem fornecidos nos ciclos subsequentes. No entanto, as informações de pesquisa que avaliam as exigências nutricionais durante o desenvolvimento da cultura nas regiões produtoras são limitadas, assim como o conhecimento do balanço nutricional nos canaviais (SOUZA et al., 2009). Portanto, pesquisas que se empenhem na quantificação e a alocação de nutrientes nos compartimentos da parte aérea da cana-de-açúcar, são bastante necessárias e irão fornecer informações sobre a ciclagem de nutrientes nos canaviais, sendo proveitoso como suporte para a agroindústria sucroalcooleira, que poderá introduzir novos métodos e formas de adubação mais eficazes, evitando desperdícios e se tornando economicamente mais viáveis (COLETI et al., 2006).

A produtividade média dos canaviais tem oscilado em torno de 100 toneladas de matéria natural por hectare, e aproximadamente, 80% dessa massa corresponde a colmos

industrializáveis. Ao se adotar manejo adequado de variedades, de calagem, adubação e tratos culturais, pode-se alcançar produtividades superiores a 120 toneladas de colmos por hectare; sob irrigação complementar, a produtividade média da cana pode superar 160 toneladas em um ciclo de cultivo (OLIVEIRA et al., 2003), o que demonstra a competitividade da cultura. Essa grande quantidade de massa natural produzida na cana-de-açúcar, acarreta uma grande extração e acúmulo de nutrientes na planta. Para uma produção de 100 toneladas de colmos industrializáveis, o acúmulo de nutrientes na parte aérea da planta está na ordem de 150, 40, 180, 90, 50 e 40 kg de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), respectivamente. Em relação aos micronutrientes, para a mesma produção, a planta acumula para ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) e boro (B), respectivamente, em torno de 8,0; 3,0; 0,6; 0,4; e 0,3 kg (OLIVEIRA et al., 2002; ORLANDO FILHO, 1993).

Vitti (2003), afirma que a produtividade da cana-de-açúcar está relacionada diretamente à adubação nitrogenada, uma vez que o N é um dos nutrientes limitantes à produtividade e longevidade das soqueiras de cana-de-açúcar. A adubação nitrogenada não vem sendo recomendada no plantio da cana-de-açúcar, ou, quando recomendada, ela é feita em pequenas doses (30 kg/ha). Porém, nas soqueiras, a aplicação se faz necessária, apresentando ampla variação de acordo com o manejo e tipo de solo (BODDEY et al., 2001; URQUIAGA et al., 2003). Para Segato et al. (2006) a ausência de resposta da cana-planta à adubação nitrogenada é consequência da mineralização da matéria orgânica que ocorre durante o preparo do solo, às reservas existentes no tolete e ao sistema radicular da cana-de-açúcar, o qual, por ser extenso e profundo, favorece a absorção do nutriente.

Wiedenfeld (1995), pesquisou o efeito da irrigação e adubação nitrogenada na qualidade e produtividade da cana-de-açúcar e concluiu que a produção de colmos e açúcar respondeu linearmente à adubação, principalmente na palhada. Ng Kee Kwong et al. (1999), descobriram que o uso de irrigação por gotejamento subsuperficial com diferentes doses de N permitiu a redução de 30% dos valores de fertilização nitrogenada sem queda significativa na produtividade dos colmos.

O nitrogênio é o nutriente mais frequentemente aplicado através da água de irrigação, pois, em comparação com outros nutrientes, como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, tem

alta mobilidade no solo. No entanto, também tem grande potencial de perdas, especialmente através da lixiviação de nitrato (ROBERTS, 2008). Para Quintana et al. (2012), a fertirrigação com nitrogênio permite a movimentação do nutriente em subsuperfície e lateralmente, o que é consideravelmente importante em culturas perenes e semiperenes como a cana-de-açúcar, devido à dificuldade de incorporar adubos aplicados como via cobertura de solo, sem danificar o sistema radicular. Liu et al. (2010), destaca a importância da essencialidade do nitrogênio para a produção de alimentos e bioenergia, no entanto pode ser altamente poluente para os corpos d'água e a atmosfera se não for adequadamente usado na agricultura.

### **3.7 Função de Produção**

Um princípio econômico básico está relacionado à escassez dos recursos disponíveis contrapondo-se às necessidades do homem que são ilimitadas. Recentemente, pensadores da economia vêm desenvolvendo estudos que, diante da nova realidade mundial, podem colocar em dúvida este princípio básico, o desenvolvimento de novas tecnologias, por exemplo, pode maximizar a eficiência do uso desses recursos, e a confecção de funções de produção podem ajudar na análise e tomada de decisões na exploração de matérias-primas e fabricação de novos produtos. A exploração de qualquer atividade agrícola que se destina a obtenção de um produto (milho, algodão, mamão, leite, carne etc.), necessita da utilização de certa quantidade de recursos (terra, sementes, fertilizantes, ração, água, mão-de-obra, máquinas etc.), que são combinados em quantidade e qualidade, de acordo com o conhecimento dos procedimentos técnicos disponíveis, por quem decide realizar a exploração, essa combinação de fatores, pode ser feita de diversas maneiras permitindo ao produtor aumentar ou diminuir os recursos utilizados, o que influencia diretamente na quantidade do produto final (AGUIAR, 2005).

Em empreendimentos agrícolas, por exemplo, na utilização da irrigação, o uso de água e energia devem ser otimizados para possibilitar a utilização dos demais insumos de produção e conseqüentemente, obter-se maiores produtividades com melhor combinação dos fatores empregados. As funções de produção ou funções de resposta, possibilitam determinar as interações entre os diversos insumos que afetam a produtividade e, ainda, escolher as condições que mais condizem com a realidade regional, permitindo, assim, buscar a racionalidade no manejo da irrigação em bases técnicas e com viabilidade econômica (BERNARDO et al., 1998).

Frizzone (1993), afirma que as funções de produção são obtidas através de conjuntos de dados levantados em experimentos científicos destinados à quantificação da viabilidade ou incremento de produtividade de determinadas práticas agrícolas. Ainda de acordo com o autor, quando se exige que a função de produção represente o máximo que se quer obter (tendo como base a tecnologia conhecida) com a utilização de cada combinação de insumos, constitui-se uma relação funcional entre insumos e o produto, ou seja, esse conceito permite se definir uma função de produção como uma função sistemática da forma:

$$Y = Y(U_1, U_2, \dots, U_n)$$

Sendo Y a quantidade produzida e  $U_1, U_2, \dots, U_n$  os insumos que participam do processo para se transformar em Y.

Teodoro et al. (2009), estudando os efeitos da irrigação e adubação nitrogenada na cana-de-açúcar concluiu que, a quantidade de açúcares recuperáveis da cana tem relação negativa com a lâmina de irrigação e positiva com a dose de nitrogênio, enquanto que o rendimento agroindustrial por unidade de área cultivada depende mais da produtividade agrícola do que da quantidade desses açúcares. Azevedo (2002) estudando a função de produção para etanol bruto (irrigação x adubação de cobertura), descobriu que este produto tem um retorno físico maior quando se aumenta a lâmina de água em uma relação inversa a adubação de cobertura.

Diversas pesquisas já foram realizadas mostrando a importância da função de resposta na avaliação econômica de diferentes níveis de água na produção agrícola. Muitas das funções de produção presentes na literatura foram desenvolvidas procurando-se relacionar a água aplicada, a qual usualmente inclui lâmina líquida de irrigação mais precipitação e teor de água armazenada no solo antes do plantio, com rendimentos agrícolas (FRIZZONE, 1998; BERNARDO, 1998; LIU et al., 2002).

### **3.8 Produto Físico Marginal**

Aguiar (2005), afirma que o produto físico marginal (  $PMg$  ) pode ser representado através da quantidade que é adicionada do produto quando uma unidade do fator variável é adicionada. Em uma representação gráfica de uma função de produção, o produto marginal

representa a declividade de qualquer linha traçada a partir da origem até qualquer ponto da curva de produto total. A parte ascendente da curva de produção representa valores positivos de  $PMg$  e a parte decrescente valores negativos. O autor conclui assim que o produto marginal equivale a primeira derivada da curva de produção de um dado produto.

### **3.9 Isoquanta e Taxa Marginal de Substituição**

Uma isoquanta, também chamada de superfície de resposta, é uma curva que representa diferentes combinações de insumos que geram um mesmo nível de produto e é obtida a partir da função de produção de um dado nível específico. Cada ponto sobre uma isoquanta particular corresponde a um nível de tecnologia passível de ser adotada em uma relação de insumos/produtos, quando uma isoquanta se desloca para a direita, há um aumento na quantidade produzida e quando se desloca para a esquerda, um decréscimo no resultado produzido (AGUIAR, 2005).

A taxa marginal de substituição de um fator “X” por um fator “Y” corresponde a quantidade do primeiro fator que pode ser substituída pelo segundo sem que haja uma redução no nível de produto. Em termos geométricos a taxa marginal de substituição é a declividade da isoquanta da esquerda para a direita e de cima para baixo (FRIZZONE, 1993). Assim a  $TMS_{L/N}$  seria a quantidade de nitrogênio que necessita ser adicionada para substituir um milímetro de água. Para determinar a TMS é preciso dividir o produto físico marginal do insumo que vai ser substituído pelo produto físico marginal do insumo que vai ser adicionado.

### **3.10 Região de Produção Racional**

A região denominada como de produção racional é a região onde se situam todas as combinações de insumos consideradas relevantes para os níveis de produção possíveis de serem alcançados (AGUIAR, 2005), qualquer combinação de fatores de produção que ultrapasse as linhas que delimitam essa região são consideradas um contrassenso.

## **4 MATERIAL E METODOS**

### **4.1 Localização e caracterização do experimento**

O trabalho foi desenvolvido com base no experimento de Teodoro (2011). A área tem 0,50 hectares, em um solo do tipo latossolo amarelo coeso argissólico, de textura média/argilosa. Quando em capacidade de campo a umidade é igual a  $0,2445 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e em murcha permanente o teor de água é  $0,1475 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . O solo tem densidade volumétrica de  $1,50 \text{ Mg.m}^3$ , porosidade total de  $0,423 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e sua velocidade de infiltração básica é de  $52 \text{ mm.h}^{-1}$ . A região tem um clima quente e úmido (B1), megatérmico (A'), com deficiência hídrica moderada no verão (s) e elevado excesso de água no inverno (w2), de acordo com a classificação de Thornthwaite e Mather (1995). A precipitação pluviométrica anual está entre 1.200 a 2.300 mm (NASCIMENTO e XAVIER, 2010).

### **4.2 Delineamento experimental e tratamentos**

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com sete lâminas de irrigação (L), cinco doses de nitrogênio (N) e quatro repetições, no entanto a análise química da cana teve apenas três repetições. Nas parcelas foram colocadas as lâminas de irrigação que foram 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 ( $0, 50, 100, 150$  e  $200 \text{ kg.ha}^{-1}$  de N), semelhante ao método utilizado por Wiedenfeld e Enciso (2008).

### **4.3 Manejo da cultura**

De acordo com Teodoro (2011), a variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB92579, plantada em linhas duplas ( $1,40 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$ ) com espaçamento médio entre linhas de cultivo de  $1,0 \text{ m}$ . O plantio foi realizado no período de 12 a 21 de janeiro de 2009, na ocasião foram colocadas 18,0 gemas por metro linear para garantir uma germinação mínima de 12,0 brotos por metro. A primeira colheita foi realizada em 22/01/2010 e segunda colheita (ciclo estudado neste trabalho) em 28/02/2011. A calagem e adubação foram feitas de acordo com a análise química do solo. Na cana-soca, a adubação foi feita 30 dias após a colheita com

120 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 160 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e as respectivas dosagens de nitrogênio de cada tratamento, a fonte de nitrogênio utilizada foi a uréia

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 foi de 1,0 L.h<sup>-1</sup>, as lâminas de irrigação foram determinadas de acordo com a evapotranspiração de referência semanal, obedecendo-se os percentuais de cada tratamento e o tempo de aplicação foi controlado por um sistema automático de controle. O volume de água a ser aplicado em cada parcela (12,0 m X 10,0 m) e o turno de rega adotado foi de dois dias para manter a umidade do solo nas parcelas sempre na capacidade de campo.

O controle das ervas invasoras foi feito através de herbicidas (Diuron e 2,4D nas doses de 3,0 e 2,0 L.ha<sup>-1</sup>, respectivamente) e capina manual sempre que necessário. A incidência de pragas e doenças foi monitorada em escalas máximas de 10 dias e só houve necessidade de controle de saúvas, o mesmo feito através de iscas.

#### **4.4 Variáveis meteorológicas e Balanço hídrico**

Os dados de precipitação pluvial (P), temperatura do ar (T) e evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foram cedidas pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS) que mantém uma estação automática de aquisição de dados Micrologger, CR10X (Campbell Scientific, Logan, Utah) instalada a 400 m do experimento.

O balanço hídrico foi feito pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), de acordo com a metodologia recomendada por Pereira et al (2002). A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) foi calculada multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) pelo coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>) e o K<sub>c</sub> utilizado foi o tabelado da *Food Agriculture Organization* (FAO), cujo valor da fase inicial (0,40) foi corrigido pelo gráfico proposto por Allen et al. (1998), em função do intervalo entre os eventos de chuva e a magnitude da ET<sub>0</sub>.

#### 4.5 Produção de etanol

A produção de etanol foi estimada como rendimento bruto de etanol ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ), conforme metodologia de Caldas (1998), expressa na equação 01:

$$RB_{ETANOL} = (((PCC \times F) + ARL) \times Fg) \times 0,01 \times RC \quad (01)$$

Em que,  $RB_{ETANOL}$  é o rendimento bruto de etanol em  $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ;  $PCC$  é quantidade de açúcar bruto em %, contido nos colmos, determinada em laboratório;  $F$  é o fator de transformação estequiométrica de sacarose em uma molécula de glicose mais uma de frutose, igual a 1,052;  $ARL$  são os açúcares redutores livres em %;  $Fg$  é o fator de Gay Lussac igual a 0,6475 e  $RC$  é o rendimento de colmos em  $\text{t}.\text{ha}^{-1}$ .

O  $RC$  foi medido a partir da pesagem das duas linhas de cada subparcela. Essa pesagem foi feita com dinamômetro com capacidade para pesar até 100 kg com os feixes de colmos levantados manualmente. Os parâmetros agroindustriais para obtenção dos cálculos de  $RB_{ETANOL}$  foram obtidos através de análises laboratoriais feitas no laboratório da Usina Santa Clotilde, localizada em Rio Largo, AL.

#### 4.6 Função de produção

A função de produção para as lâminas de irrigação e doses de nitrogênio utilizadas no experimento foram obtidas por curvas de regressão polinomial de segundo grau e por raiz quadrada (AGUIAR, 2005). As duas variáveis foram analisadas individualmente e resultaram em polinômios semelhantes aos das equações 02 e 03.

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 \quad (02)$$

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 \sqrt{x} \quad (03)$$

Em que  $Y$  é o rendimento bruto de etanol ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ),  $x$  é a lâmina de irrigação total ou a dose de nitrogênio aplicada e  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são os coeficientes da equação. O tipo de regressão foi escolhido tendo como base a melhor representação dos resultados, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi o principal parâmetro de decisão.

Os dois fatores de produção também foram analisados de maneira conjunta e de acordo com o subitem (4.9).

#### 4.7 Produto físico marginal das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio

O  $PMg$  dos dois fatores de produção estudados, lâminas de irrigação (L) e doses de nitrogênio (N), foi determinado pela primeira derivada da função de produção em relação ao fator considerado através da equação 04.

$$PMg(f) = \frac{\partial Y}{\partial f} \quad (04)$$

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 (rendimento bruto de etanol) em relação ao fator (f) considerado.

#### 4.8 Análises física e econômica da produção

A análise física da produção buscou a lâmina de irrigação e a dose de nitrogênio que proporcionam rendimento máximo de etanol. Esta estimativa foi feita igualando-se a primeira derivada da equação 03 a zero, conforme as equações 05, 06 e 07.

$$Y = b_1 + 2b_2x \quad (\text{primeira derivada da equação 03}) \quad (05)$$

$$\text{Igualando-a a zero, tem-se: } b_1 + 2b_2x = 0 \therefore 2b_2x = -b_1 \quad (06)$$

$$X_{máx.} = \frac{-b_1}{2b_2} \quad (07)$$

Em que,  $X_{máx.}$  é a quantidade de insumo (lâmina de irrigação ou dose de nitrogênio) que proporciona o rendimento máximo de etanol.

O rendimento máximo de etanol ( $Y_{máx}$ ) foi calculado com base em  $X_{máx}$ . Pela equação 08.

$$Y_{máx} = b_0 - \frac{b_1^2}{4b_2} \quad (08)$$

A análise econômica da produção de etanol foi feita com base nos preços de milímetro de água aplicado e o preço do etanol. E a lâmina de irrigação e dose de nitrogênio de máxima eficiência econômica foram calculadas pela equação 09.

$$W = \frac{C_w - P_z b_1}{2 P_z b_2} \quad (09)$$

Em que,  $W$  = quantidade de insumos (lâmina de irrigação ou dose de nitrogênio) que proporciona o rendimento de etanol de máxima eficiência econômica,  $C_w$  = custo do insumo,  $P_z$  = preço do etanol,  $b_1$  e  $b_2$  são os coeficientes da equação de produção.

O preço do milímetro de água aplicado foi mensurado com base em dados obtidos na literatura e/ou em empresas que utilizam o sistema de irrigação implantado neste experimento e tem os custos monitorados por programas de computador, estes estão demonstrados na Tabela 01. O preço do kg de nitrogênio foi calculado de acordo com o custo do adubo utilizado e obtido através de pesquisas em empresas de comercialização de insumos agropecuários em Alagoas, conforme Tabela 02.

**Tabela 01.** Demonstrativo de valores para cálculo do preço do milímetro de água aplicada na cultura da cana-de-açúcar via irrigação por gotejamento em Rio Largo, AL, 2016.

<b>PREÇOS UNITÁRIOS (R\$/UNID.)</b>		
<b>Descrição</b>	<b>unid</b>	<b>R\$/unid.</b>
Energia	R\$/kW	0,40
Mão de obra	R\$/ H/ mês	1.672,00
Mão de obra	R\$/ H/ dia	55,73
Estrutura de irrigação	R\$/ha	12.000,00
Amortização	R\$/ha /ano	1.200,00
Manutenção	R\$/ha	600,00
Lâmina aplicada	mm/dia	4,50
<b>MEMÓRIA DE CÁLCULO DO USO</b>		
Área	ha	100
Energia	KW/ha/hora	1,2
Turnos de trabalho	unid.	3
Meses de irrigação	mês	5
Tempo de irrigação	horas/ano	3000
Lâmina total anual (150 DIAS)	mm	675
<b>CUSTOS OPERACIONAIS ANUAIS (R\$)</b>		
Energia		144.000,00
Mão de obra		25.080,00
Implantação da estrutura		120.000,00
Manutenção do sistema de irrigação		60.000,00
<b>TOTAL</b>		<b>349.080,00</b>
<b>RESUMO</b>		
<b>CUSTOS OPERACIONAIS</b>	<b>CUSTOS ESTRUTURAIS</b>	<b>CUSTOS TOTAIS</b>
R\$ 2.290,80/ha	R\$ 1.200,00/ha	<b>R\$ 3.490,80/ha</b>
R\$ 3,39/mm	R\$ 1,78/mm	<b>R\$ 5,17/mm</b>

Fonte: Autor, 2017

**Tabela 02.** Preço do adubo utilizado para a adubação nitrogenada da cana-de-açúcar em Rio Largo, AL, 2016.

<b>ADUBO</b>	<b>% DE N</b>	<b>R\$/T DE ADUBO</b>	<b>R\$/KG N</b>
S. DE AMONIO	21,00%	800,00	3,81
URÉIA	45,00%	1.330,00	2,96
<b>MÉDIA</b>			<b>3,38</b>

Fonte: Autor, 2017

O preço do etanol (Tabela 03) utilizado foi o preço de mercado do etanol hidratado na safra 2015/2016, entre setembro de 2015 e abril de 2016, (CEPEA 2016). Para efeitos de comparação foram considerados os preços mínimo, médio e máximo na safra. O preço do etanol foi ajustado com base nas equações 10 e 11, devido ao  $RB_{\text{ETANOL}}$  ser referente ao etanol absoluto (100° INPM) sendo assim necessário a transformação para equivalente de etanol hidratado (93° INPM) (CONSECANA, 2015).

$$F_p = \left[ \frac{Fg_{EA} \cdot Me_{EA}}{C_{EH} \cdot Me_{EH}} \right] \cdot R_F \cdot R_D \quad (10)$$

Em que  $F$  é o fator de ajuste do preço do etanol hidratado,  $Fg_{EA}$  é o fator de Gay Lussac igual a 0,6475;  $Me_{EA}$  é a massa específica do etanol absoluto (100° INPM) igual a 0,7893;  $C_{EH}$  é a concentração do etanol hidratado (93° INPM) igual a 0,93;  $Me_{EH}$  é a massa específica do etanol hidratado igual a 0,8098;  $R_F$  é o rendimento da fermentação e  $R_D$  é o rendimento da destilação.

$$P_Z = P_M \cdot F_p \quad (11)$$

Em que  $P_Z$  é o preço ajustado do etanol,  $P_M$  é o preço médio de mercado do etanol hidratado e  $F_p$  é o fator de ajuste do preço do etanol hidratado igual a 0,5966.

**Tabela 03.** Preço do etanol hidratado (EH) na safra 2015/2016, utilizados para calcular o ajuste de preços do etanol absoluto.

RB <sub>ETANOL</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Preço do EH (R\$.L <sup>-1</sup> )		Preço do EH ajustado (R\$.m <sup>-3</sup> )				
	Médio	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
14,12	1,189	1,658	1,953	709,36	989,16	1165,16	

Fonte: [CEPEA \(2016\)](#)

#### 4.9 Superfície de resposta para a análise conjunta dos fatores de produção de água de irrigação e adubação nitrogenada

A função de produção que representa a resposta da interação dos dois insumos, lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, em cana-de-açúcar, e que geraram isoquantas ou linhas de mesmo valor de produção de etanol na cultura, é semelhante à equação 12.

$$Y(L, N) = R_{00} + R_{01} \cdot N + R_{02} \cdot N^2 + R_{10} \cdot L + R_{20} \cdot L^2 + R_{11} \cdot L \cdot N \quad (12)$$

em que  $L$  é a lâmina de irrigação total, em milímetros;  $N$  é a dose de nitrogênio, em kg.ha<sup>-1</sup> e  $R_{00}$ ,  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{20}$  e  $R_{11}$  são os coeficientes da equação. Esses coeficientes foram obtidos pelo programa “SURFER”.

#### 4.10 Taxa marginal de substituição de água por nitrogênio

A taxa marginal de substituição do fator de produção lâmina de irrigação por 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 13. Nessa equação foi calculada a quantidade de nitrogênio (kg), que substitui a lâmina de irrigação bruta em (mm), sem que a produtividade de etanol seja alterada.

$$TMS_{L/N} = \frac{PMg L}{PMg N} \quad (13)$$

em que:  $TMS_{L/N}$  é a taxa marginal de substituição do fator lâmina de irrigação (L) pela 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.

#### 4.11 Combinação de fatores para obtenção de custo mínimo

Para se obter o custo mínimo a partir de uma combinação dos fatores de produção lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, representou-se graficamente o custo de produção mínimo para cada curva de isoproducto ou isoquanta, locando-se os pontos em que a reta da razão  $C_L/C_N$  tangencia a isoquanta da produtividade de etanol considerada. Em que  $C_L$  é o custo do milímetro, e  $C_N$  é o custo do quilograma de nitrogênio aplicado por hectare. Considera-se também que os valores dos insumos não variaram durante o período do estudo, então as retas da razão supracitadas são paralelas.

#### 4.12 Região de produção racional

A região de produção racional foi determinada pela marcação dos pontos nas linhas de fronteira onde a inclinação das isoquantas é nula ou infinita, nesses pontos, o produto físico marginal de cada fator de produção (L e N) é zero e a partir destes pontos o produto marginal se torna negativo, ou seja, a produção passa a diminuir.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Produção de etanol em função das lâminas de irrigação

Na Tabela 04, está apresentada a análise de variância da produção de etanol da cana-soca, e demonstra que apenas as lâminas de irrigação foram significativas a nível de 5%, enquanto que as doses de nitrogênio e a interação entre os dois fatores não foram significativas.

O coeficiente de variação (CV) das parcelas (lâminas de irrigação) foi de 16,19% enquanto o das subparcelas (doses de nitrogênio) foi de 14,50%, sendo esses coeficientes de variação considerados médio (boa precisão) e baixo (ótima precisão) respectivamente por Ferreira (2000). Este autor indica ainda que, para melhorar a eficiência dos experimentos em parcelas subdivididas, os pesquisadores devem pôr o grupo de tratamentos de maior importância (lâminas de irrigação neste trabalho), nas subparcelas, pois o erro experimental das subparcelas é, normalmente, menor que o da parcela, ou aumentar o número de repetições do experimento, o que não foi possível fazer neste trabalho devido à substancial elevação dos custos.

**Tabela 04.** Resumo da análise de variância da produção de etanol em cana-soca na safra 2010/2011.

	FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
<b>L</b>		6	<b>138,630934</b>	<b>23,105155</b>	<b>4,168</b>	<b>0,017**</b>
BLOCO		2	107,960700	53,980350	9,738	0,0031
Erro 1		12	66,518144	5,543178		
<b>N</b>		4	<b>24,009018</b>	<b>6,002254</b>	<b>1,449</b>	<b>0,2299<sup>ns</sup></b>
L x N		24	94,349949	3,931247	0,949	0,541 <sup>ns</sup>
Erro 2		56	231,897381	4,141024		
Total corrigido		104	663,36613			
CV 1 (%) =		16,67				
CV 2 (%) =		14,41				
Média geral (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )=		14,12		Número de observações:	105	

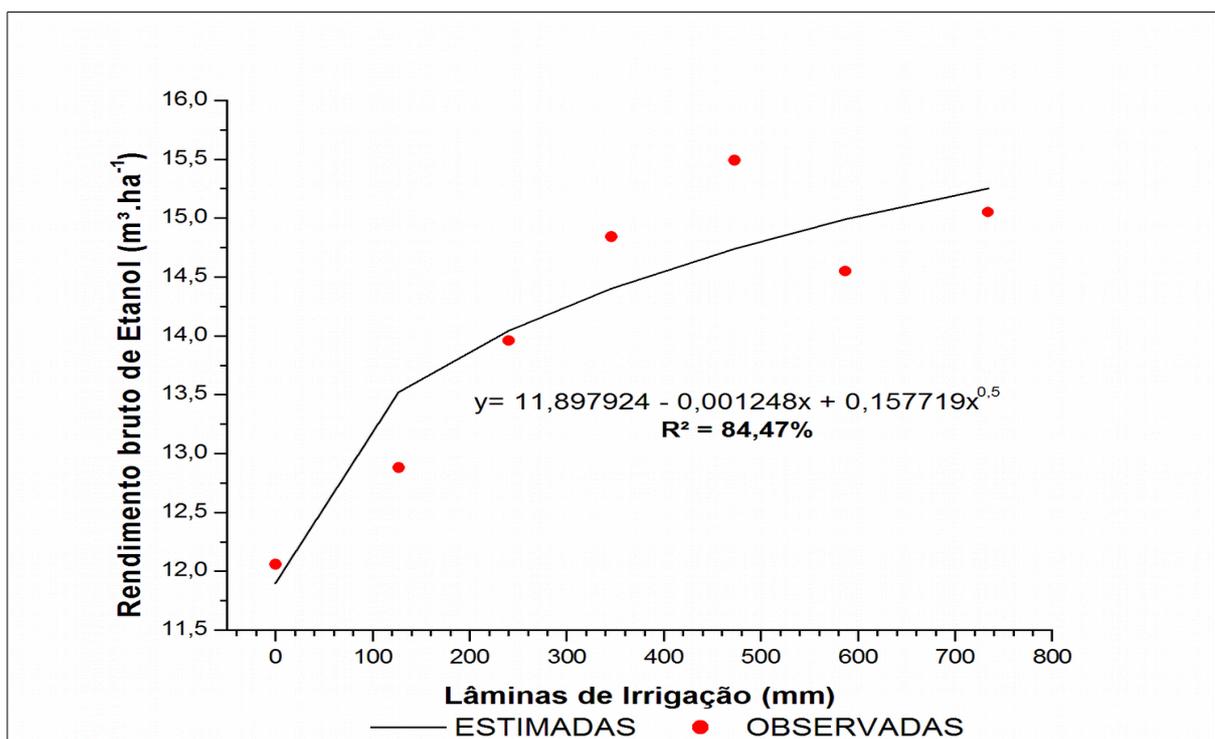
\*\* Significativo a 5% e ns não significativo

A produção de etanol por hectare de cana cultivada, primeira soca, em função das lâminas de irrigação está representada na Figura 01, e variou entre 12,06 e 15,49 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>. A diferença de produção de etanol entre o tratamento sem irrigação (sequeiro) e o que obteve a

maior produção (1,00 ET<sub>0</sub>) foi de 3,43 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> o equivalente a 28,44% a mais em relação ao tratamento sem irrigação. O coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>) que demonstra a porcentagem da variação da variável dependente explicada pela variável independente ou a variação entre as médias estimadas e observadas de produção foi de 84,47%, mostrando uma boa correlação entre as médias.

Moura et al. (2005), estudando os efeitos de adubação com N e K<sub>2</sub>O em cana-soca, com e sem irrigação, encontraram um aumento significativo de 23% em médias de rendimento bruto de etanol, no mesmo trabalho, o autor conclui que das variáveis estudadas, apenas a quantidade de açúcar bruto (PCC) não sofreu influência da adubação de cobertura e nenhum dos fatores sofreu influência da interação água e adubação. O PCC é um dos principais fatores que influenciam a quantificação do rendimento bruto de etanol e é provável que por esse motivo neste trabalho a adubação nitrogenada não foi significativa para rendimento bruto de etanol. Azevedo (2002) constatou que para lâminas de irrigação de 0, 152, 303 e 454 os rendimentos brutos de etanol foram respectivamente, 5,17; 8,95; 10,34 e 10,43 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, e encontrou ainda rendimento mínimo de etanol de 4,8 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>

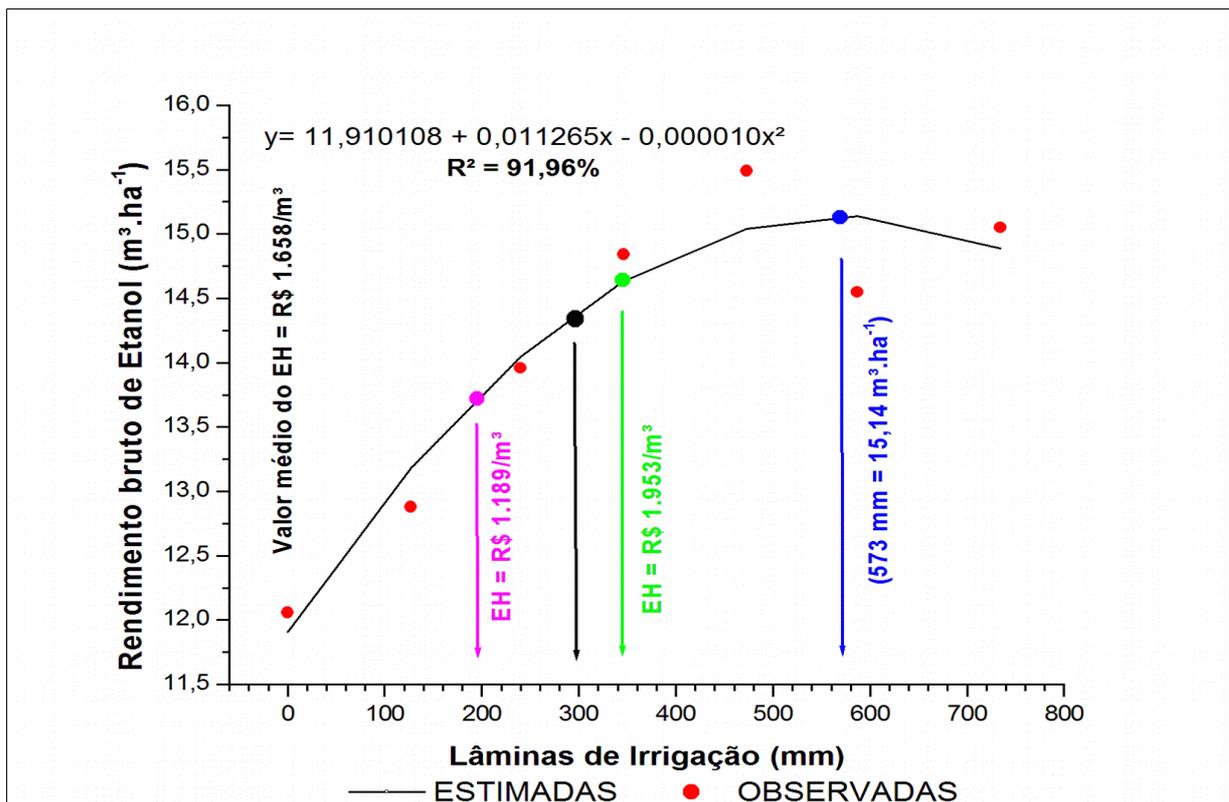
**Figura 01.** Produção de etanol em função de lâminas de irrigação (curva de regressão raiz quadrada) em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011



A curva de regressão calculada por polinômio de segundo grau (Figura 02) indica que o rendimento bruto físico máximo de etanol alcançado em função da quantidade total de água aplicada foi de  $15,14 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  em uma lâmina de 573 mm. Cunha et al. (2016), estudando lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em cana-de-açúcar de primeiro e segundo ciclo, no município de Rio Verde, GO, encontraram um rendimento bruto de etanol máximo de 24,8 e  $24,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  nos dois ciclos respectivamente e esses rendimentos foram obtidos com 100% de reposição hídrica, da capacidade de campo.

A lâmina de máxima eficiência econômica varia conforme o custo do insumo e o preço do produto. Nesta pesquisa foram considerados os preços do etanol hidratado e o custo do milímetro de água. A Figura 02 mostra que, considerando o preço médio do litro de etanol hidratado (EH) de R\$ 1,658 na safra 2015/2016 (ou R\$ 1.658,00 por  $\text{m}^3$ ) e o milímetro em R\$ 5,17, a lâmina que possibilita a máxima eficiência econômica é 307 mm, o que gera uma produção de  $14,44 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  de etanol. Para valores de EH de R\$ 1,189 e 1,953 (mínimo e máximo na safra), as lâminas de máxima eficiência econômica seriam 202 e 348 mm, produzindo 13,79 e  $14,63 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , respectivamente.

**Figura 02.** Produção máxima de etanol e de máxima eficiência econômica em função de lâminas de irrigação em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011

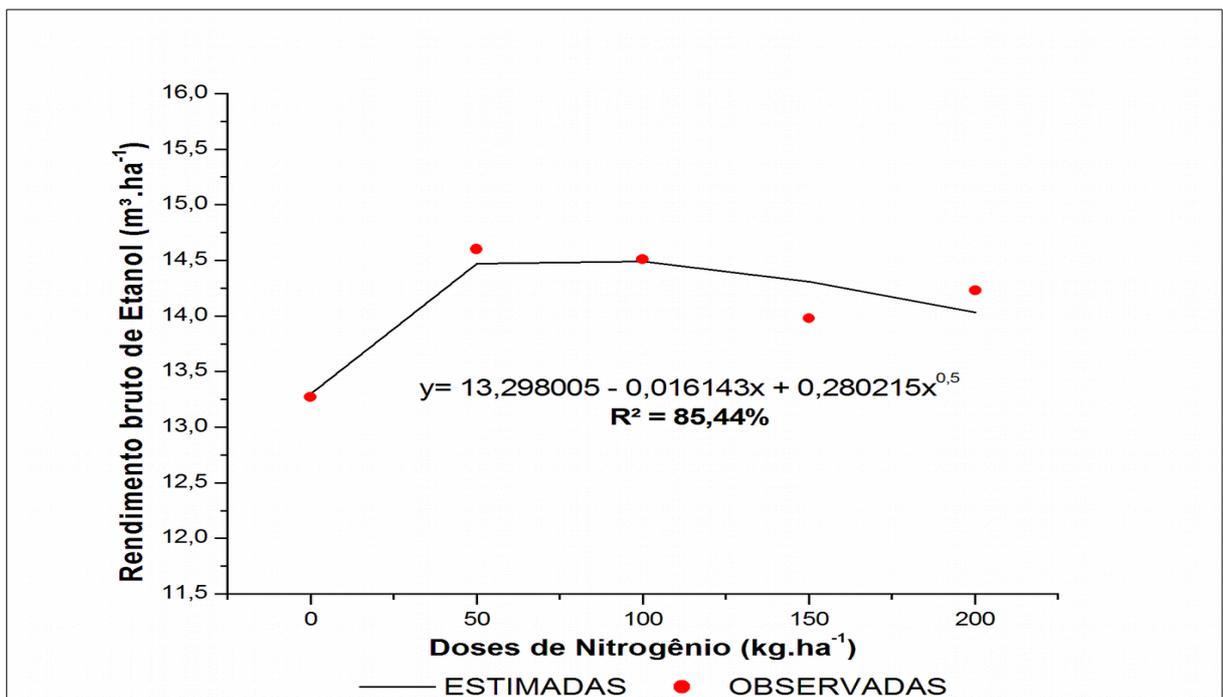


## 5.2 Produção de etanol em função das doses de nitrogênio

Na Figura 03 está representada a curva de regressão, por raiz quadrada da produção de etanol em função das doses de nitrogênio, médias estimadas e observadas, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011. A índice de determinação ( $r^2$ ) foi de 85,44%, sendo considerada boa. Ao se observar apenas as variações nas doses de nitrogênio, a produção de etanol variou de 13,27 a 14,60  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 1,33  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  ou 10%, essa variação máxima ocorreu entre as doses 0 e 50 kg de N por hectare, já entre os tratamentos 50 e 100 kg de N por hectare a variação foi muito pequena (14,60 e 14,51  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  respectivamente).

Silva et al (2009), estudando diversas dose de adubação nitrogenada e potássica em cana irrigada, evidencia que mesmo o rendimento bruto de etanol sendo resultante da produção de colmos, e esse sofrer influência da adubação, a análise de variância demonstrou que o rendimento de etanol não foi influenciado pelas doses de adubação. O autor encontrou ainda aumentos de 6,5 a 23,9% nas diversas doses de adubação em relação a testemunha e o maior rendimento bruto de etanol encontrado foi de 9,94  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , bem abaixo do máximo encontrado neste trabalho.

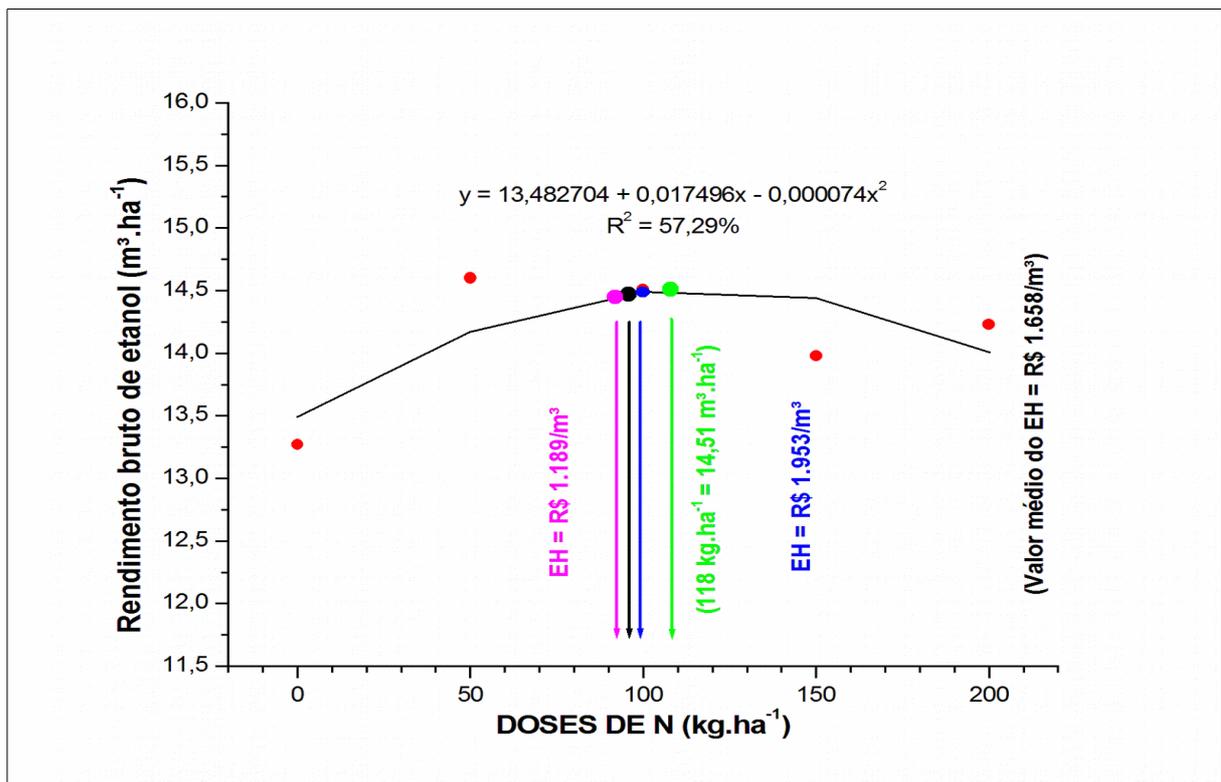
**Figura 03.** Produção de etanol em função de doses de nitrogênio (curva de regressão raiz quadrada) em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011



Costa et al (2009), encontraram efeito significativo da adubação de cobertura (uréia mais matéria orgânica) a 5% no rendimento bruto de etanol, no entanto os tratamentos não diferiram entre si, a média de rendimento entre os tratamentos foi de  $6,04 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . O autor cita ainda que o parcelamento da aplicação do adubo uréia contribuiu para um aumento significativo no rendimento bruto de etanol com relação à testemunha.

A dose de nitrogênio que proporciona a produção física máxima de etanol em cana-soca é  $118 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  que foi responsável por uma produção de  $14,51 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (Figura 04). Foi possível observar também que a dose de nitrogênio de maior eficiência econômica, quando o preço do EH é R\$ 1,658 (média da safra 2015/2016) foi de  $95 \text{ kg}$  de N por hectare que proporciona uma produção de  $14,49 \text{ m}^3$  de etanol por hectare. Quando se considera o preço mínimo do EH na safra (R\$ 1,189/L) a dose econômica reduz para  $86 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  com rendimento bruto de  $14,44 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , já para o preço máximo do EH na safra 2015/2016 (R\$ 1,953/L) a dose de N mais eficiente economicamente cresce para  $98 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  com a cana-soca respondendo em  $14,49 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  de etanol. Pôde-se perceber que apesar das variações no preço do EH, a resposta da cana-soca para produção de etanol se mostrou muito pequena, ficando em  $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  entre o menor e maior preço do EH.

**Figura 04.** Produção máxima de etanol e de máxima eficiência econômica em função de doses de nitrogênio em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011

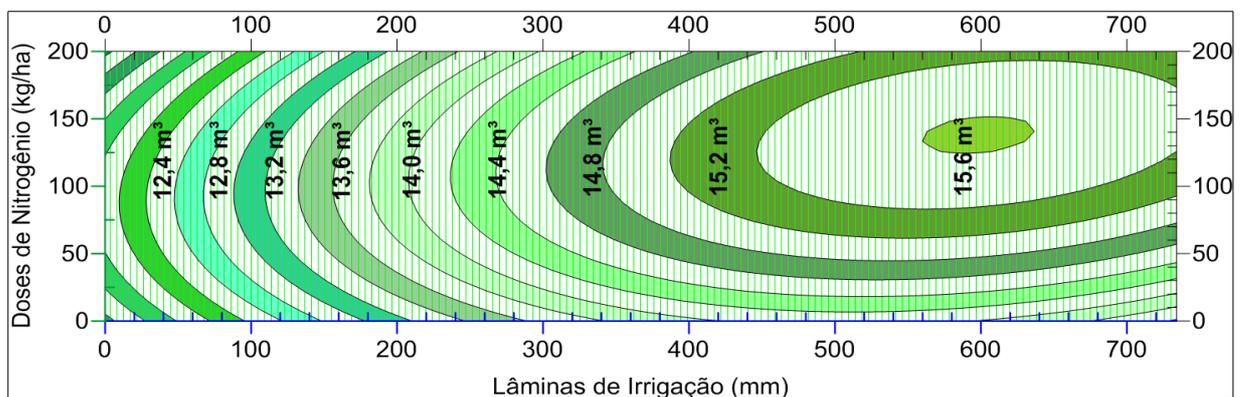


### 5.3 Superfície de Resposta

A superfície de resposta do etanol em relação a irrigação e ao nitrogênio, está representada em forma de isoprodutos ou isoquantas de rendimento bruto de etanol com base na lâmina bruta de irrigação total e doses de nitrogênio aplicadas. Com essas curvas é possível mensurar as quantidades de água e nitrogênio necessários para se conseguir o rendimento bruto de etanol desejado. Na Figura 05 estão apresentadas as isoquantas do rendimento bruto de etanol ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) em cana-soca irrigada por gotejamento na região de Rio Largo, AL e é possível constatar com essas isoquantas que o rendimento bruto de  $14 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  de etanol pode ser alcançado com as seguintes combinações: a) 250 mm de irrigação e 28 kg de  $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; b) 200 mm de irrigação e 60 kg de  $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; c) 180 mm de irrigação e 100 kg de  $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$  ou d) 200 mm de irrigação e 150 kg de  $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Na combinação (b), verifica-se que são utilizados 50 mm a menos de água e 32 kg de N a mais do que a combinação (a) (proporção de 1 kg de N para 1,56 mm de água). Em (d) pode-se observar a utilização de 20 mm de água a menos e 50 kg de N a mais que a combinação (c) (proporção de 1 kg de N para 0,4 mm de água).

Nas isoquantas de rendimento bruto de etanol, pode-se observar que conforme se reduz a lâmina de irrigação aplicada é necessário aumentar a dose de nitrogênio para manter o mesmo rendimento. Essa proporção de água aplicada reduzida e dose de nitrogênio aumentada não se mantém constante, esta relação é conceituada de taxa marginal de substituição de água por nitrogênio.

**Figura 05.** Isoquantas de produção de etanol em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.



Azevedo (2002), estudando adubação de cobertura e irrigação em cana-de-açúcar, obteve um rendimento máximo de etanol de  $11,5 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  com um total de água de 1043 mm e adubação de cobertura de  $458 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ , na mesma pesquisa o autor encontrou um rendimento mínimo de  $4,8 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  com lâmina total de 609 mm e adubação de cobertura de  $85 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ .

#### 5.4 Produto físico marginal

Os produtos físicos marginais da água e do nitrogênio foram representados em litros de etanol por milímetro de água por hectare (  $PMg_L$  ) e em litros de etanol por quilograma de nitrogênio por hectare (  $PMg_N$  ), respectivamente e estão apresentados na Tabela 05. Nota-se que o  $PMg_N$  diminui conforme se aumenta a dosagem de N até um ponto entre a dose de 100 e 125  $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$ , em que o produto físico marginal passa a ser negativo, ou seja a partir deste ponto a produção passa a decrescer e o insumo N não acrescenta mais rendimento ao etanol. Com relação a lâmina de irrigação é possível observar que o produto físico marginal passa a ser negativo e a produção é prejudicada entre lâminas de 500 a 600 milímetros, assim pode-se notar que a produção de etanol de cana-de-açúcar suporta lâminas maiores de água do que doses altas de nitrogênio.

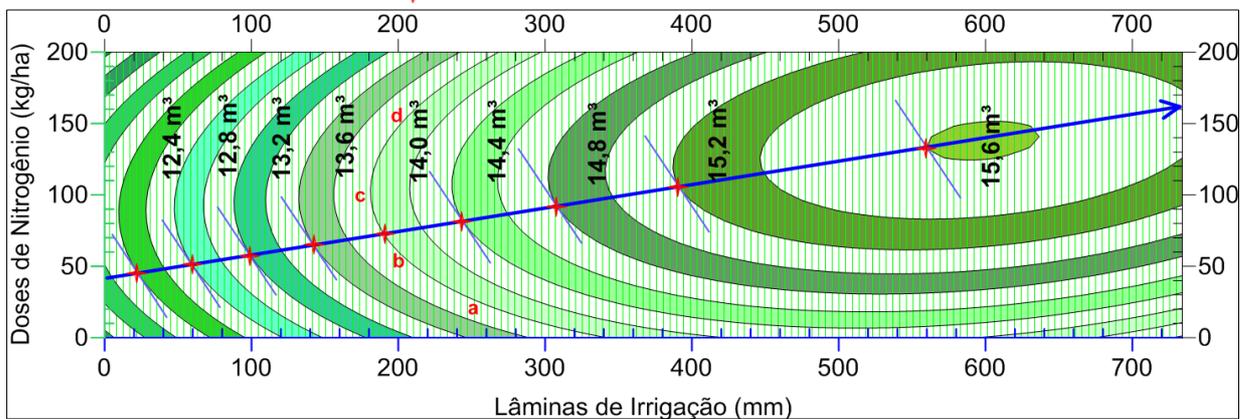
**Tabela 05.** Produto físico marginal da água ( $PMg_L$ ) e produto físico marginal do nitrogênio ( $PMg_N$ ) para diferentes níveis de água e nitrogênio, com base na curva de regressão polinomial de segundo grau , na região de Rio Largo, AL

NÍVEL DE ÁGUA (mm)	$PMg_L$ ( $\text{l}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ )	Dose de N (kg/ha)	$PMg_N$ ( $\text{l}.\text{kg}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ )
100	9,30	25	13,77
200	7,34	50	10,05
300	5,37	75	6,33
400	3,41	100	2,61
500	1,44	125	-1,11
600	-0,52	150	-4,83
700	-2,49	175	-8,56
800	-4,45	200	-12,28

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

A taxa marginal de substituição da água de irrigação por doses de nitrogênio ( $TMS_{L/N}$ ) representa a relação entre a quantidade de nitrogênio (kg) que deve ser acrescentada a cada unidade de água (mm) reduzida para manter o mesmo nível de produção de etanol. Para manter o rendimento bruto de etanol em  $14 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , em cultivo de cana-soca na região de Rio Largo, AL, esta taxa está representada nos pontos “a”, “b”, “c” e “d” da Figura 06 e são respectivamente 0,55; 0,82; 3,32 e nula. Esses valores mostram que a taxa marginal de substituição de água por nitrogênio não é fixa e aumenta conforme se reduz a lâmina aplicada.

**Figura 06.** Isoquanta de produção de etanol, em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, com os pontos em que foram estimadas as taxas marginais de substituição de milímetro de água por quilograma de nitrogênio (letras a, b, c e d) e quantidade de água e nitrogênio que proporciona o custo de produção mínimo (✦) para os respectivos rendimentos de etanol



A combinação dos fatores água e nitrogênio que determinam o custo mínimo para cada curva de isoproducto são iguais às combinações que proporcionam a taxa marginal de substituição de água por nitrogênio ( $TMS_{L/N}$ ), iguais a relação ( $P_L/P_N$ ), preço da lâmina (R\$  $5,17 \cdot \text{mm}^{-1}$ ) dividido pelo preço do kg de nitrogênio (R\$  $3,38 \cdot \text{kgN}^{-1}$ ) que nessa pesquisa foi igual a 1,53 (FRIZZONE, 1993). Essas combinações estão representadas na Figura 09, sendo para 13,60; 14,00; 14,40; 14,80 e 15,20  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  aproximadamente:  $L = 142 \text{ mm}$  e  $N = 65 \text{ kg}$ ;  $L = 190 \text{ mm}$  e  $N = 73 \text{ kg}$ ;  $L = 243 \text{ mm}$  e  $N = 82 \text{ kg}$ ;  $L = 308 \text{ mm}$  e  $N = 92 \text{ kg}$ ;  $L = 390 \text{ mm}$  e  $N = 105 \text{ kg}$ , respectivamente.

Azevedo (2002), considerando preços de milímetro de água de R\$ 1,6355 ( $\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e preço de adubo ( $\text{N}+\text{K}_2\text{O}$ ) de R\$ 1,131  $\text{kg}^{-1}$  encontrou relação de taxa marginal de substituição de 1,45 no ponto em que as combinações dos insumos proporcionaram o custo mínimo, nos níveis de rendimento de etanol bruto de 9,0; 10,0 e 11,0  $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , de 75 kg e 221 mm; 177 kg e 259 mm e 320 kg e 313 mm, respectivamente.

Os valores de  $TMS_{L/N}$  para se obter rendimentos brutos de etanol de 13,60; 14,00; 14,40; 14,80 e 15,20  $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , em função das doses de nitrogênio e lâminas de irrigação aplicados em cana-soca na região de Rio Largo encontram-se na Tabela 06.

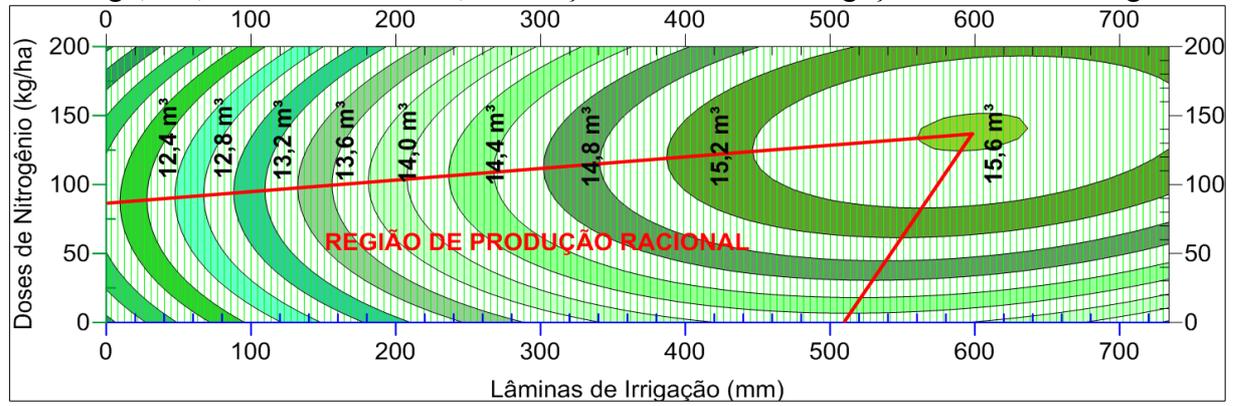
**Tabela 06.** Valores de taxa marginal de substituição  $TMS_{L/N}$  de lâminas de irrigação bruta por doses de nitrogênio aplicadas em cana-soca nas isoquantas de 13,60; 14,00; 14,40; 14,80 e 15,20  $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$  na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011.

Nitrogênio ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	13,60 ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )		14,00 ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )		14,40 ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )		14,80 ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )		15,20 ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	
	L(mm)	$TMS_{L/N}$								
25	188	0,55	255	0,45	346	0,32	--	--	--	--
50	154	0,82	211	0,71	280	0,57	376	0,39	--	--
75	137	1,35	189	1,19	249	1,01	324	0,77	441	0,41
100	132	3,32	181	2,95	237	2,53	304	2,03	396	1,34
125	138	--	186	--	240	--	304	--	388	--
150	154	--	202	--	256	--	320	--	403	--
175	180	--	229	--	285	--	352	--	443	--
200	217	--	268	--	328	--	403	--	517	--

## 5.6 Região de produção racional

A região de produção racional é limitada pelos pontos em que a inclinação das curvas de isoquantas ou isoprodutos é igual a 0,0 (zero). Dentro dessa região qualquer combinação de fatores de produção não gera desperdícios, pois a planta continua respondendo com aumento da produção, no entanto qualquer desvio dessa área é considerado irracional. A região de produção racional está representada na Figura 07 e compreende as retas que se iniciam na dose de 86 kg de nitrogênio por hectare e na lâmina 510 mm e se unem no centro da isoquanta do rendimento bruto de etanol máximo de 15,6  $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , que seria obtido com 600 mm de irrigação e 140 kg de nitrogênio por hectare.

**Figura 07.** Região de produção racional da produção de etanol, em cana-soca na região de Rio Largo, AL, na safra 2010/2011, em função de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.



## 6 CONCLUSÃO

- A produção de etanol de cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação varia entre 12,06 e 15,49 metros cúbicos por hectare, nos tratamentos em canaviais sem irrigação e irrigados com 100% da  $ET_0$ , respectivamente. A lâmina de irrigação que proporciona maior eficiência econômica, considerando o preço médio do etanol hidratado de R\$ 1,658 por litro, é 307 mm e a de produção física máxima é 573 milímetros, enquanto que a produção de etanol em relação as doses de nitrogênio, estimada por função de produção raiz quadrada, varia entre 13,27 e 14,60 metros cúbicos por hectare, nos tratamentos em áreas cultivadas sem nitrogênio e adubadas com 50 quilos de nitrogênio por hectare, na mesma ordem. A doses de nitrogênio que proporciona a maior eficiência econômica, estimada pela função polinomial de segundo grau é 95 quilos de nitrogênio por hectare, ao se considerar o preço médio do etanol hidratado de R\$ 1,658 por litro, e a dose de maior produção física é 118 quilos de nitrogênio por hectare;
- A produção de etanol máxima estimada na interação lâmina de irrigação e doses de nitrogênio é de 15,60 metros cúbicos por hectare. E, o produto físico marginal da água tende a se reduzir de forma mais gradual do que o produto físico marginal do nitrogênio;
- A taxa marginal de substituição de água por nitrogênio aumenta conforme se reduz a lâmina de irrigação e varia de acordo com os preços de cada insumo. Sendo que, a quantidade de insumos que resulta no custo mínimo de produção é igual a relação de preço dos dois insumos que é 1,53 milímetros por quilos de nitrogênio por hectare;
- A região de produção racional da produção de etanol de cana-de-açúcar em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, está situada entre as retas que se iniciam na dose de N de 86 kg por hectare e lâmina de 510 mm até o ponto de cruzamento no centro da isoquanta de 15,60 metros cúbicos por hectare, nessa região é possível fazer diversas combinações de água e nitrogênio que podem trazer retornos físicos e econômicos para a produção de etanol de cana-de-açúcar.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. L. de. *et al.* Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p.262-270, 2013.

AGUIAR, J. V. **A função de produção na agricultura irrigada**. Fortaleza: Imprensa universitária. 2005. 196p.

ALLEN, R, G. *et al.* Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Rome, n. 56, v. 131, p.1-13, 2005.

ALLEN, R, G. *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Rome, n. 56, p.300, 1998.

ALMEIDA, A. C. dos S. *et al.* Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação a disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p.1441-1448, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2016**. Brasília: ANA, 2016. 95p.

ANDRADE, M. C.O. **Modernização e pobreza: a expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social**. São Paulo: UNESP, 1998.

AUDE, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.23, n.2, p.241-248, 1993.

AZEVEDO, H. M. de. **Resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros costeiros da Paraíba**. 2002. 112p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

BERNARDO, S. *et al.* Irrigação e Produtividade. In: FARIAS, M. A. *et al.* **Manejo de irrigação**, Poços de Caldas: UFL/SBEA, cap.1, p.117-132, 1998.

BERNARDO, S. *et al.* **Manual de irrigação**. 7º ed. Editora da UFV. Viçosa – MG. 2005 611p.

Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES, Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.p.13; 164. Disponível em: <[http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/textos/bio\\_06\\_2008.pdf](http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/textos/bio_06_2008.pdf)> Acesso em: 24 mar. 2015 às 22h36min10s.

BODDEY, R. M. *et al.* Use of the <sup>15</sup>N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N<sub>2</sub> fixation to grasses and cereals. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.28, p.889-895, 2001.

CALDAS, C. **Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras**. Maceió: Sindicato da Indústria e do Alcool do Estado de Alagoas, 1998, 424p.

CARDOZO, L. E. C. Manejo de cana-de-açúcar em áreas com irrigação complementar. In: **XXII Simpósio da Agroindústria da cana-de-açúcar no estado de Alagoas**. 32, 2005, Maceió-AL. Anais. Maceió – AL CD-ROM.

CARVALHO, A. L. *et al.* Ocorrência de períodos secos na região de Rio Largo, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, p.173-180, 2013a.

CARVALHO, A. L. *et al.* Estação chuvosa e de cultivo para a região de Rio Largo, Alagoas baseada em métodos diretos e sua relação com o El Niño – Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, p.192-198, 2013b.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – Cepea, Indicador semanal do etanol hidratado combustível Cepea/Esalq – São Paulo, Série de preços. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>> Acesso em: 30 jul. 2016 às 12h20min35s.

Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, Variedades CTC. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/melhoramentogenetico.html>> Acesso em: 24 mar.2015 às 23h48min30s.

CESNIK, R. **Melhoramento da cana-de-açúcar**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004, 307p.

CESNIK, R. MIOCQUE, J. **Melhoramento de cana-de-açúcar**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 307p.

COLETI, J. T. *et al.* Remoção de macronutrientes pela cana planta e cana soca, em argissolos, variedades RB83486e SP81-3250. **Revista Stab**, v.24, n.05, p.32-36, 2006.

Companhia Nacional de Abastecimento – Conab, Séries Históricas. Disponível em: <[http://conab.gov.br/conteudos.phpa=1252&t=&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_objcmsconteudos](http://conab.gov.br/conteudos.phpa=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos)> Acesso em: 24 mar. 2016 às 22h13min50s.

CONSECANA. **Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo**. Manual de Instruções. 6.ed. Piracicaba, SP, 2015, 79p.

COSTA et al. Rendimento da cana-de-açúcar irrigada nos tabuleiros costeiros da Paraíba sob aplicações parceladas de diferentes adubos. **Revista de biologia e ciências da terra**, v.9, n.2, 2009.

CUNHA, F. N. *et al.* Yield of sugarcane submitted to nitrogen fertilization and water depths by subsurface drip irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.9, p.841-846, 2016.

DANTAS NETO, J. *et al.* Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.283-288, 2006.

DIOLA, V. SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F. BORÉM, A.CALDAS, C.(Eds.) **Cana-de-açúcar: Bioenergia, açúcar e álcool – Tecnologias e perspectivas**. Viçosa, 2010. 577p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos de irrigação e drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yields response to water. **FAO: Irrigation and Drainage Paper**, n.33, Rome: FAO, 1979, 306p.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. 3.ed. Maceió. Edufal. 2000, 422p.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1993. 42p.

FRIZZONE, J. A. Funções de produção. In: FARIAS, M. A. *et al.* **Manejo de Irrigação**. Poços de Caldas: UFL/SBEA, 1998. cap.1, p.86-116.

GOLDEMBERG, José . The challenge of biofuel. **Energy & Environmental Science (Print)**, v. 1, p. 523-525, 2008.

GONÇALVES, F. M. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, 2010.

HARTEMINK, A. E. Sugarcane for bioethanol: soil and environmental issues. **Advances in Agronomy** **99**, p.125-182, 2008.

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

JADOSKI, C. J. *et al.* Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**. Botucatu, v.3, n.2. 2010.

JornalCana, Alagoas possui 75% dos canaviais irrigados. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/alagoas-possui-75-dos-canaviais-irrigados/>> Acesso em: 24 mar. 2015 as 23h00min25s

KORNDÖRFER, G. H. *et al.* Desempenho de variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem nitrogênio. **STAB**, v.20, p.28-31, 2002.

LIU, J. *et al.* A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.107, p.8035-8040, 2010.

LIU, J. *et al.* Interrelations of yield, evapotranspiration and water use efficiency from marginal analysis of water production functions. **Agriculture Water Management**, v.56, p.143-151, 2002.

MACHADO, E. C. Fisiologia da produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.) **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, p.57-87.

MAISTRO, M. M. C. e BARROS, G. S. C. Relações comerciais e de preços no mercado nacional de combustíveis. In: **XL Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**. Passo Fundo – RS. 2002.

MARQUES, Marcos Omir *et al.* **Tópicos em tecnologia canavieira**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2006.

MATSUOKA, S. **Botânica e Ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Maringá: UFPR/SENAR, 1996, 26p.

MORAIS, M. A.F. D. **A desregulamentação do setor sucroalcooleiro do Brasil**. Americana: Caminho Editorial, 2000. 238p.

MOURA, M. V. P. da S. *et al.* Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.4, p.753-760, jul/ago., 2005.

MOURA, M. V. T. *et al.* Estimation of carrot water consumption (*Daucus carota* L.). In: **Piracicaba county through the water balance methodology**. *Scientia Agrícola*, v.51, p.284-291, 1994.

NASCIMENTO, P. T. S; XAVIER, R. A. Análise pluviométrica do estado de Alagoas. In: **1º Simpósio Alagoano de Gestão Ambiental**. 2010. Arapiraca – AL.

NG KEE KWONG, K. F. *et al.* Drip-fertigation – a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.35, n.1, p.31-37, 1999.

OLIVEIRA, S. D. de. *et al.* Os impactos das alterações climáticas na cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, p.170-184, 2012.

OLIVEIRA, M. W. *et al.* Avaliação do potencial produtivo de sete variedades de cana-de-açúcar sob irrigação complementar. **Inf. Agron.**, v.101, p.9-10, 2003.

OLIVEIRA, M. W. *et al.* Nutrientes na palhada de dez cultivares de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.21, n.3, p.6-7, 2002.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S. *et al.* **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: USP-FEALQ, 1993. p.133-146.

PEREIRA, A.R. *et al.* **Agrometeorologia (fundamentos e aplicações práticas)**. Livraria e editora agropecuária. Guaíba – RS. 2002. 478p.

QUINTANA, K. A. *et al.* Irrigação e fertirrigação por gotejamento em cana-de-açúcar na presença e ausência de boro. **Científica**, v.40, p.103-116, 2012.

REICHARDT, K. *et al.* Dynamics of water in soil cropped with corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.3, p.1-5, 1979.

Renewable Fuels Association – RFA, World Fuel Ethanol Production. Disponível em: <<http://ethanolrfa.org/pages/World-Fuel-Ethanol-Production>> Acesso em: 25 mar.2015 às 00h12min23s.

ROBERTS, T. L. Improving nutrients use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v.32, p.177-182, 2008.

ROCKSTRÖM, J. *Et al.* Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. **Conservation Ecology**, v.3, n.2, p.5. 1999. Disponível em: <<http://www.consecol.org/vol3/iss2/art5/>> Acesso em: 24 mar.2015 às 23h41min35s.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociência, 1995. 101p. Apostila.

ROPPA, B. F. **Evolução do consumo de gasolina no Brasil e suas elasticidades: 1973 a 2003**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ROSE, C. W; STERN, W. R. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. **Australian Journal of Soil Research**, Sydney, v.5, p.11-19, 1967.

SANTOS, S. S. dos. **O cultivo da cana-de-açúcar no estado de Alagoas: uma análise comparativa dos efeitos da mecanização no estado de São Paulo**. 2011. 103p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SANTOS, E. G. D. O melhoramento genético da RIDESA. Disponível em: <<http://www.genetica.esalq.usp.br/semina.php>> Acesso em: 24 mar.2015 às 23h46min24s.

SCHÜNEMANN, L. **A demanda de gasolina automotiva no Brasil: o impacto das elasticidades de curto e longo prazo da expansão do GNV e dos carros flex**. 2008. Dissertação (Mestrado profissionalizante em Economia) Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2008.

SEDIYAMA, M. A. N. *et al.* Produtividade e exportação de nutrientes por rizomas de taro cultivado com resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.04, n.04, p.421-425, 2009.

SEGATO, S. V. *et al.* **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, Gráfica Prol, 2006. 415p.

SILVA, S. *et al.* Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.19, n.9, p.849-856, 2015.

SILVA, T. G. S. da. *et al.* Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, p.64-71, 2012.

SILVA, A. B. da. *et al.* Rendimento e qualidade da cana-de-açúcar irrigada sob adubações de nitrogênio e potássio em cobertura. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n.3, p.236-241, jul/set, 2009.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ALCOOL NO ESTADO DE ALAGOAS – SINDAÇÚCAR. Boletim da safra 2015/2016. Disponível em: <<http://sindacucar-al.com.br>>. Acesso em: 05 jul. 2016.

SOUZA, A.N. **Estudo das demandas de etanol e gasolina no Brasil no período 2001 – 2009**. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Finanças e Economia de Empresas) Escola de Economia de São Paulo, FGV, São Paulo. 69p. 2010.

SOUZA, J.L. *et al.* 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.

SOUZA, Z. M. *et al.* Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, n.01, p.48-56, 2009.

TEODORO, I. *et al.* Weather variables, water balance, growth, and agro industrial yield of sugarcane. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.35, n.1, p.76-88, jan/fev. 2015.

TEODORO, I. **Respostas técnico-econômicas da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e adubação nitrogenada**. 2011. 82p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2011.

TEODORO, I. *et al.* Crescimento e produtividade da cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **STAB**, v.27, n.4, p.46-49, 2009.

THORNTHWAITE, C. W; MATHER, J. R. The water balance. **Drexel Institute of Tecnology – Laboratory of Climatology**, Centerton, NJ, 104p, 1955.

TIMM, L. C. *et al.* Water balance of a sugarcane crop: Quantitative and qualitative aspects of its measurement. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.57-62, 2002.

URQUIAGA, S. *et al.* Avaliação da eficiência do processo de fixação biológica de nitrogênio em diferentes variedades de cana-de-açúcar. **Agronomia**, v.37, p.55-58, 2003.

VILLAGRA, M. M. *et al.* Difficulties of estimating evaporation from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.72, p.317-325, 1995.

VITTI, A. C. **Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: Manejo e efeito na produtividade.** 2003. 114p. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, São Paulo, 2003.

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

WIEDENFELD, R. P. *et al.* Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield nad quality. **Field and Crop Research**, Amsterdam, v.43, n.2-3, p.101, 1995.

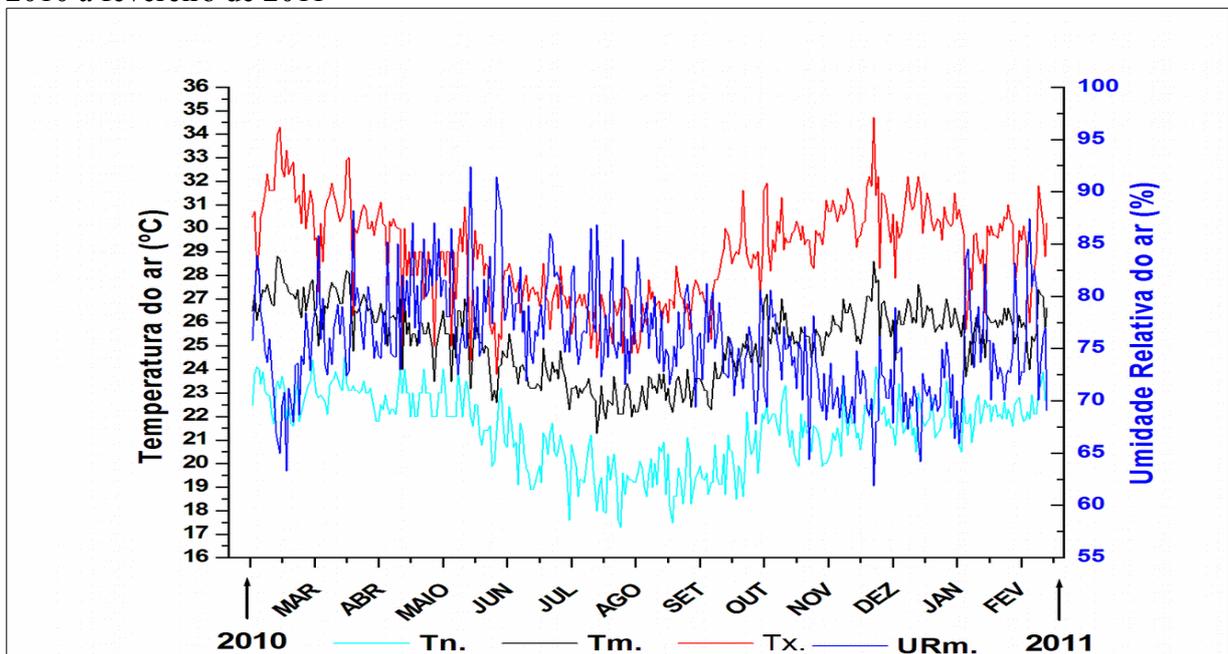
## 8 APÊNDICE

### 8.1 Variáveis Meteorológicas

Os dados meteorológicos estudados neste trabalho foram: temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluvial, evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura (Figura A1). A temperatura mínima do ar ( $T_n$ ) na região de Rio Largo, AL, no período de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011 variou entre 17,3 °C (em 13 de agosto de 2010) e 24,5 °C (06 de abril de 2010) média de 21,4 °C. No mesmo período a temperatura máxima do ar ( $T_x$ ) variou de 23,8 °C a 34,7 °C, nos dias 16 de junho de 2010 e 09 de dezembro de 2010, respectivamente. A temperatura média do ar ( $T_m$ ) ficou entre 21,3 e 28,8 °C, a média geral foi de 25,2 °C.

A umidade relativa do ar (UR) média diária variou entre 62 e 92%, com uma média geral de 76%. É possível observar que entre os períodos de fevereiro a março de 2010 e novembro de 2010 a fevereiro de 2011, foram períodos em que a UR se manteve baixa e houve picos de temperatura, estes períodos coincidem com a estação seca da região estudada. Já na estação chuvosa (período compreendido entre abril e agosto de 2010) as temperaturas diminuíram e a UR se manteve alta.

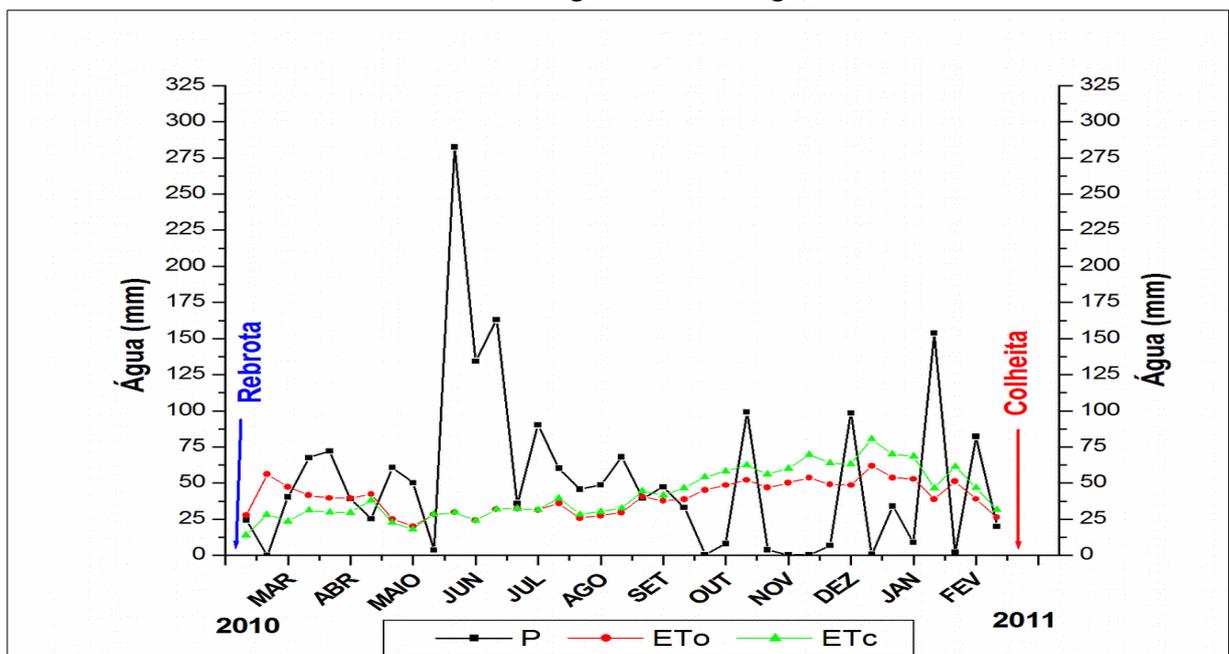
**Figura A1.** Temperaturas do ar, mínima ( $T_n$ ), média ( $T_m$ ) e máxima ( $T_x$ ) diárias e umidade relativa do ar média diária (URm), na região de Rio Largo, AL, no período de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011



Os dados de precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), estão demonstrados na Figura A2. Entre o terceiro decêndio de fevereiro de 2010 (período da rebrota da soqueira) e o terceiro decêndio de fevereiro de 2011 (colheita da cana) houve uma precipitação pluvial de 1.952 mm, sendo que 60% desta (1.180 mm) ocorreu na estação chuvosa (abril a agosto). O dia mais chuvoso do ano foi o dia 04 de junho de 2010, em que choveu 186 mm, e nesse decêndio choveu 282 mm contribuindo para que o mês de junho fosse o mês mais chuvoso do ciclo da cana-soca, com uma precipitação pluvial total de 580 mm. Essas concentrações de chuva em curtos períodos, demonstram a má distribuição de chuvas na região em que o experimento foi conduzido.

Na região de Rio Largo, AL, a precipitação pluvial anual normal é de 1.800 mm, enquanto que a média da zona canavieira alagoana é de 1.300 mm, e 70% da chuva se concentra na estação chuvosa (de abril a agosto) (Souza et al., 2004). De acordo com Carvalho et al. (2013a), mesmo durante a estação chuvosa, há períodos superiores a sete dias sem precipitação, o que ocasiona pequeno estresse hídrico nas plantas.

**Figura A2.** Precipitação Pluvial (P), Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e Evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar ( $ET_c$ ), médias decendiais, no período de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011, na região de Rio Largo, AL



A evapotranspiração de referência no período estudado foi de 1.471 mm, com a mínima de 0,99 mm.d<sup>-1</sup> (04/06/2010, dia em que ocorreu a maior precipitação), máxima de 6,46 mm.d<sup>-1</sup> (06/03/2010) e média de 3,97 mm.d<sup>-1</sup>. Os maiores valores de ET<sub>0</sub> foram observados entre os meses de setembro de 2010 e fevereiro de 2011, e os menores de abril a agosto de 2010. Silva et al. (2015), afirma que a demanda atmosférica é mais baixa quando há maior precipitação pluvial, o que ocorre pela diminuição da radiação solar, atenuada pela alta nebulosidade.

Conforme demonstrado por Oliveira et al. (2012), mais de 73% da área nordestina está classificada como área de alto risco climático para o cultivo da cana-de-açúcar, pelo fato de haver irregularidades na distribuição de chuvas ao longo do ano, no entanto, na região próxima ao litoral há baixo e médio risco climático para cultivo na maioria dos meses do ano.

## **8.2 Balanço hídrico**

Durante o período de cultivo analisado (372 dias), a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar variou de 0,99 a 8,14 mm.dia<sup>-1</sup>, total de 1.570 mm (média de 4,23 mm.dia<sup>-1</sup>), neste mesmo período houve uma precipitação pluviométrica de 1.952 mm. Deste total de chuva, 819 mm, correspondente a 52,16% se perdeu em forma de excesso hídrico. Silva et al. (2012), estudando cultivares RB92579 de cana-de-açúcar no município de Juazeiro na Bahia, encontraram valores de ET<sub>c</sub> variando entre 1,2 e 7,5 mm.dia<sup>-1</sup>, com média de 4,7 mm.dia<sup>-1</sup>. Inmam-Bamber e Smith (2005) citam que, utilizando sondas de nêutrons para o monitoramento de água no solo, encontraram ET<sub>c</sub> da cana-de-açúcar irrigada, chegando a um valor igual a 7,8 mm.dia<sup>-1</sup>. Almeida et al. (2008) encontraram, em ciclo de cana-soca, em condições irrigadas na região de Rio Largo, AL, evapotranspiração acumulada de 1.584 mm. Doorenbos e Kassam (1979) discutem valores de requerimento hídrico da cana-de-açúcar situados entre 1.500 a 2.500 mm. Teodoro et al. (2015), pesquisando diversas variedades de cana-de-açúcar em cana-planta e cana-soca, citam uma evapotranspiração acumulada de 1.775 mm.

Na Figura A3 está apresentado o balanço hídrico, em que se observa que o excesso hídrico (770 mm) se concentrou entre o terceiro decêndio de março e o terceiro decêndio de agosto de 2010, havendo ainda um pequeno período de excesso hídrico (49 mm) no terceiro decêndio de janeiro de 2011. Assim, subtraindo-se o excedente hídrico da precipitação pluvial

total, obtêm-se uma chuva efetiva de 1.133 mm. Neste contexto, entende-se que a precipitação pluvial efetiva é a quantidade de água que realmente ficou disponível para a cultura cultivada e se deduz que houve uma deficiência hídrica de 437 mm, podendo ser observado na Figura A3 que essa deficiência se concentrou no período entre outubro de 2010 e fevereiro de 2011. Desta forma é importante ratificar que a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) do ciclo de cultivo da cana-soca (cultivada sem irrigação) foi de 1.133 mm. Abreu et al. (2013), estudando a disponibilidade hídrica dos tabuleiros costeiros de Alagoas, em três ciclos de cultivo, encontraram um deficit hídrico médio de 722 mm e um excedente hídrico de 736 mm. A zona canavieira alagoana se caracteriza por ter uma precipitação pluvial média de 1.937 mm, tendo maior concentração entre os meses de abril a agosto (1.398 mm ou 72%) e o restante ocorrendo entre setembro e março (540 mm ou 28%) (Sindaúcar, 2016) o que se aproxima bastante dos resultados deste trabalho. Observando esses resultados é possível afirmar que a precipitação pluvial total seria suficiente para o desenvolvimento satisfatório da cultura atendendo sua demanda hídrica. No entanto há uma má distribuição das chuvas nesta região e portanto se houvesse a possibilidade de se armazenar a água excedente na estação chuvosa, haveria disponibilidade hídrica suficiente para a irrigação durante os meses de seca.

**Figura A3.** Balanço hídrico decendial da cultura da cana-de-açúcar com ênfase para o excesso e a deficiência hídrica em cana-soca, na região de Rio Largo, AL, no período de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011

