Patrícia Renée Françoise Battie Laclau

Engenheira Agrônoma

**Balanço hídrico e crescimento de raízes da cana-de-açúcar sob disponibilidade de água
contrastante comparados ao modelo MOSICAS**

Orientador:

Prof. Dr. **MARCOS SILVEIRA BERNARDES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Agronomia. Área de Concentração: Fitotecnia

Piracicaba

2005

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Laclau, Patrícia Renée Françoise Battie

Balanço hídrico e crescimento de raízes da cana-de-açúcar sob disponibilidade de água contrastante comparados ao modelo MOSICAS / Patrícia Renée Françoise Battie

Laclau. - - Piracicaba, 2005.

123 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Balanço hídrico 2. Cana-de-açúcar 3. Crescimento vegetal 4. Estresse hídrico
5. Irrigação 6. Raiz I. Título

CDD 633.15

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico

À minha mãe,

Que foi ela mesma e deixou em nossa memória um exemplo de coragem, perseverança e dedicação aos outros.

Ofereço

A minha família,

Sempre perto de mim.

Agradecimentos

Vendo este trabalho de pesquisa quase concluído, sinto a importância da participação de muitas pessoas, sem as quais seria impossível realizá-lo.

Agradeço a todos que me ajudaram, desde as primeiras fases do projeto, iniciado com o incentivo do meu orientador, o Prof. Dr. Marcos Silveira Bernardes, que me aceitou, mesmo com meus conhecimentos incipientes da língua portuguesa e sobre a cultura da cana. Agradeço também às pessoas do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) a quem atrapalhei muitas vezes durante um ano que, porém, me ajudaram muito para um bom andamento do trabalho: Jorge Luis Donzelli, Sergio Antonio Veronez de Souza, Jose Antonio Bressiani, Luiz Clarete Florim, Luiz Dizero e todos os ajudantes e funcionários de campo que “sofreram” durante a amostragem das raízes.

No transcorrer dos trabalhos, apareceram diversas dificuldades que outros profissionais me ajudaram a contornar. O Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho e o Sr. Gilmar Batista Grigolon do Setor de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural, o Sr. Osmair Neves do Departamento de Produção Vegetal, na Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz e o Dr. Edson Roberto Teramoto da Canavialis, orientaram-me na fabricação, instalação, leitura e reparo dos tensiômetros e na amostragem de terra, indispensáveis neste trabalho. Agradeço também ao Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD, França) que financiou as viagens dos Drs. Martiné e Chopart para Piracicaba e que assim permitiu uma parceria produtiva com a ESALQ e o CTC. Estes pesquisadores esclareceram-me pontos importantes sobre o funcionamento do modelo MOSICAS, o balanço hídrico e a amostragem das raízes na cultura da cana. Também cederam as versões atualizadas do modelo e me capacitaram para seu uso.

A toda a minha família, especialmente ao meu marido Dr. Jean-Paul Laclau que mostrou interesse para meu trabalho, orientando-me e impulsionando-me em todos os momentos, agradeço muito.

A todos,
Muito obrigada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE QUADROS.....	15
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE ABREVIATURAS.....	19
LISTA DE SIGLAS.....	21
LISTA DE SÍMBOLOS.....	23
RESUMO.....	25
ABSTRACT.....	27
1 INTRODUÇÃO.....	29
2 DESENVOLVIMENTO.....	31
2.1 Revisão bibliográfica.....	31
2.1.1 Problemática da produção canavieira	31
2.1.1.1 Importância econômica.....	31
2.1.1.2 Problemática da cultura.....	32
2.1.2 Fisiologia e fenologia da cana-de-açúcar.....	32
2.1.2.1 Generalidades.....	32
2.1.2.2 Relações hídricas e a cana-de-açúcar.....	34
2.1.2.3 Sistema radicular.....	36
2.1.3 Os modelos na agricultura.....	37
2.1.3.1 Definição.....	37
2.1.3.2 Classificação dos modelos matemáticos.....	38
2.1.3.3 Calibração, avaliação e análise de sensibilidade.....	40
2.1.4 Modelagem na cultura de cana-de-açúcar.....	40
2.1.5 O modelo MOSICAS.....	42
2.1.5.1 Descrição.....	42
2.1.5.2 A plataforma SIMULEX.....	43
2.1.5.3 O módulo de simulação do crescimento.....	45
2.1.5.4 O módulo do balanço hídrico.....	47
2.1.5.4.1 Importância do balanço hídrico.....	47

2.1.5.4.2 Funcionamento do balanço hídrico no modelo MOSICAS.....	48
2.1.5.4.3 Movimento da água no solo.....	50
2.1.5.4.3.1 Drenagem acima da saturação	50
2.1.5.4.3.2 Drenagem acima da capacidade do campo	52
2.1.5.4.3.3 Ascensão capilar.....	53
2.1.5.4.3.4 Evapotranspiração.....	54
2.1.5.4.3.5 Distribuição radicular	55
2.1.5.4.3.6 Coeficientes de estresse hídrico	56
2.2. Material e métodos.....	57
2.2.1 Caracterização da área experimental.....	57
2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	61
2.2.3 Plantio e tratos culturais	62
2.2.4 Condições meteorológicas.....	63
2.2.5 Atributos do solo.....	63
2.2.6 Distribuição e crescimento radicular.....	65
2.2.7 Análise estatística.....	67
2.3 Resultados e discussão.....	68
2.3.1 Condições meteorológicas.....	68
2.3.2 Caracterização da água no solo.....	70
2.3.2.1 Curva de retenção.....	70
2.3.2.2 Umidade do solo.....	73
2.3.3 Crescimento e distribuição radicular.....	78
2.3.3.1 Profundidade e distribuição radicular.....	78
2.3.3.2 Biomassa radicular.....	83
2.3.3.3 Comprimento radicular.....	96
2.3.3.4 Comprimento radicular específico	101
2.3.3.5 Exploração radicular	105
2.3.4 Modelagem	107
2.4 Considerações finais.....	113
3 CONCLUSÕES.....	115
REFERÊNCIAS.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificada dos processos, fluxos, estados e variáveis integrados no modelo MOSICAS.....	43
Figura 2 - Descrição da plataforma SIMULEX.....	44
Figura 3 - Funcionalidades da plataforma SIMULEX	45
Figura 4 - Modelo de elaboração da sacarose e colmos industrializáveis.....	46
Figura 5 - Representação de uma camada de solo como um tanque e os três níveis de água características.....	51
Figura 6 - Temperatura média (°C), precipitações pluvial e de irrigações (mm) e armazenamento hídrico do solo até 1 metro de profundidade na área irrigada (% CAD) do primeiro até 166 DAP.....	69
Figura 7 - Temperatura média (°C), precipitações pluvial e de irrigações (mm) e armazenamento hídrico do solo até 1 metro de profundidade na área irrigada (% CAD) de 166 até 332 DAP.....	69
Figura 8 - Curva de retenção da camada 0-20 cm obtida <i>in situ</i>	70
Figura 9 - Curva de retenção da camada 20-40 cm obtida <i>in situ</i>	71
Figura 10 - Curva de retenção da camada 40-60 cm obtida <i>in situ</i>	71
Figura 11 - Curva de retenção da camada 60-100 cm obtida <i>in situ</i>	72

Figura 12 - Umidade do solo até 80 cm de profundidade de 13 até 166 DAP, na área irrigada.....	74
Figura 13 - Umidade do solo até 80 cm de profundidade de 166 DAP até o corte, na área irrigada.....	74
Figura 14 - Media da umidade do solo até 150 cm de profundidade de 13 dias até 166 DAP, na área não irrigada (n=3).....	75
Figura 15 - Media da umidade do solo até 150 cm de profundidade de 166 DAP até o corte, na área não irrigada (n=3).....	75
Figura 16 - Aspecto visual da cultura irrigada, 185 DAP, a seta representando uma altura de 2 m.....	77
Figura 17 - Aspecto visual da cultura não irrigada, 185 DAP, a seta representando uma altura de 2 m.....	77
Figura 18 - Profundidade máxima de enraizamento em função da idade de uma cultura irrigada e não irrigada.....	79
Figura 19 - Número médio de impactos radiculares por quadricula de 25 cm ² em função da distância da fileira de plantio (cm) e da profundidade (m) na área irrigada (A) e em sequeiro (B) (n=4).....	81
Figura 20 - Número médio de impactos radiculares por quadricula de 25 cm ² em função da profundidade (cm) na área irrigada e não irrigada (n=4).....	82
Figura 21 - Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm ⁻³ de solo) por camada até um metro de profundidade, 34 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho).....	83

Figura 22 - Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 49 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho).....	84
Figura 23 - Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 125 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho).....	84
Figura 24 - Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 179 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho).....	85
Figura 25 - Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 241 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho).....	85
Figura 26 - Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 322 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho).....	86
Figura 27 - Desenvolvimento das raízes do tolete aos 34 DAP.....	88
Figura 28 - Raízes grossas dos perfilhos aos 49 DAP.....	89
Figura 29 - Início da degenerescência das raízes do tolete (pontas pretas) aos 49 DAP.....	89
Figura 30 - Distribuição da biomassa radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento irrigado.....	92
Figura 31 - Distribuição da biomassa radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento em sequeiro.....	93

Figura 32 - Dinâmica de crescimento das raízes secas (g.m^{-2}) cumulado sobre um metro de profundidade no tratamento irrigado e não irrigado	94
Figura 33 - Ramificações de uma raiz superficial na cultura irrigada (na esquerda) e na cultura em sequeiro (na direita) aos 179 DAP.....	98
Figura 34 - Distribuição do comprimento radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento irrigado.....	99
Figura 35 - Distribuição do comprimento radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento em sequeiro	99
Figura 36 - Dinâmica de crescimento das raízes em comprimento (m.m^{-2}) cumulado sobre um metro de profundidade no tratamento irrigado e não irrigado.....	101
Figura 37 - Relação entre biomassa (mg.cm^{-3}) e o comprimento (cm.cm^{-3}) das raízes para a cultura irrigada e não irrigada.....	102
Figura 38 - Comprimento específico das raízes até um metro de profundidade aos 125, 179, 241 e 322 dias DAP no tratamento irrigado	103
Figura 39 - Comprimento específico das raízes até um metro de profundidade aos 125, 179, 241 e 322 dias DAP no tratamento em sequeiro.....	104
Figura 40 - Comprimento específico em cm de raízes por mg de raízes em função da idade na área irrigada e não irrigada	105
Figura 41 - Taxa de exploração radicular do solo (%) em função da profundidade, aos 125, 179, 241 e 322 DAP na cultura irrigada	106

Figura 42 - Taxa de exploração radicular do solo (%) em função da profundidade, aos 125, 179, 241 e 322 DAP na cultura em sequeiro	107
Figura 43 - Relação entre as densidades radiculares médias (cm.cm^{-3} de solo) sobre um metro de profundidade, simuladas e observadas, na área irrigada.....	109
Figura 44 - Relação entre as densidades radiculares médias (cm.cm^{-3} de solo) sobre um metro de profundidade, simuladas e observadas, na área em sequeiro.....	109
Figura 45 - Relação entre as profundidades de enraizamento máximas (cm), até um metro de profundidade, simuladas e observadas, nas áreas irrigada e não irrigada.....	110
Figura 46 - Relação entre as variações da umidade média, até um metro de profundidade, simuladas e observadas, na área irrigada.....	111
Figura 47 - Relação entre as variações da umidade média, até um metro de profundidade, simuladas e observadas, na área em sequeiro.....	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição visual das diferentes camadas de solo a partir de uma trincheira.....	58
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os três tipos de modelos explanatórios quanto ao valor de previsão, científico, instrutivo e de aplicabilidade.....	39
Tabela 2 – Média e desvio padrão (entre parênteses) dos atributos químicos do solo, a partir de três amostras, em quatro camadas e oito horizontes em Latossolo Vermelho Amarelo em área Experimental do CTC, Piracicaba.....	59
Tabela 3 – Média e desvio padrão (entre parênteses) da concentração de micronutrientes, a partir de três amostras, em quatro camadas e oito horizontes em Latossolo Vermelho Amarelo em área Experimental do CTC, em Piracicaba.....	60
Tabela 4 - Média e desvio padrão (entre parênteses) a partir de três amostras dos atributos granulométricos em quatro camadas e oito horizontes em Latossolo Vermelho Amarelo em área Experimental do CTC, em Piracicaba.....	61
Tabela 5 - Variações do Kc para cana planta de ano	63
Tabela 6 - Média e desvio padrão (entre parênteses) das densidades aparentes das camadas de solo a partir de três amostras	65
Tabela 7 - Média e desvio padrão (entre parênteses) da massa seca de raízes mortas de quatro camadas de solo, a partir de nove amostragens, oito meses antes do plantio.....	66
Tabela 8 - Umidade (cm^3 água / cm^3 solo) a saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente (PMP) até um metro de profundidade.....	73

Tabela 9 - Biomassa radicular em mg.cm^{-3} nas culturas irrigadas e em sequeiro aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP. Letras maiúsculas diferentes indicam as diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as profundidades ou as distâncias para o mesmo sistema hídrico e as letras minúsculas indicam as diferenças entre os sistemas hídricos para uma mesma profundidade de solo ou distância da touceira.....	87
Tabela 10 - Correlações entre a massa seca radicular e a profundidade ou a distância da touceira, na área irrigada e em sequeiro, a diferentes idades (em DAP).....	96
Tabela 11 - Comprimento radicular em cm.cm^{-3} nas culturas irrigadas e em sequeiro aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP. Letras maiúsculas diferentes indicam as diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as profundidades ou as distâncias para o mesmo sistema hídrico e as letras minúsculas indicam as diferenças entre os sistemas hídricos para uma mesma profundidade de solo ou distância da touceira.....	98
Tabela 12 - Correlações entre o comprimento radicular e a profundidade ou a distância da touceira, na área irrigada e em sequeiro, a diferentes idades (em DAP).....	101

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD - Capacidade de água disponível

DAP - Dias após o plantio

IAF - Índice de área foliar ou *lai* nos símbolos

PIB - Produto interno bruto

PMP - Ponto de murcha permanente ou *l_{lr}* nos símbolos

LISTA DE SIGLAS

ALCA - Área de Livre Comércio das Américas

APSIM - Agricultural Productions Systems Simulator

CERES - Crop Environment Resource Synthesis

CIRAD - Centre de coopération Internationale em Recherches Agronomiques pour le
Développement

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira

DSSAT - Decision Support System for Agrotechnology Transfert

MOSICAS - Modèle de simulation de la croissance de la canne à sucre

SIMULEX - Simulateur d'expérimentations (Plate-Forme de simulation)

ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz"

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICASA - International Consortium for Agricultural Systems Applications

LISTA DE SÍMBOLOS

- A* - Parâmetro sem dimensão que depende da textura do solo
- asw* - Água disponível para as plantas (mm), similar à CAD das abreviaturas
- Δasw - Variação de lâmina de água do solo (mm) entre dois dias
- Cf* - Ascensão capilar (cm)
- Ch* - Chuva ou precipitação pluviométrica (mm)
- D* - Lâmina de água drenada (mm).
- dmst* - Aumento diário da biomassa seca total ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
- dulr* - Armazenamento hídrico a capacidade de campo (mm)
- E* - Evaporação real do solo (mm)
- EMR* - Distância média entre as raízes (cm)
- Eo* - Evapotranspiração do tanque classe A (mm)
- ep0* - Transpiração potencial (mm)
- Es* - Escoamento superficial (mm)
- Et* - Evapotranspiração máxima (mm)
- ETP* - Evapotranspiração potencial (mm)
- ETR* - Evapotranspiração real (mm)
- EX* - Taxa de exploração do solo pelas raízes (%)
- h(θ)* - Potencial mátrico (cm H_2O)
- h_m* - Leitura da coluna de mercúrio (cm Hg)
- h_c* - Altura do nível de mercúrio na cuba à superfície do solo (cm H_2O)
- In* - Intercepção da chuva pelas folhas (mm)
- Irr* - Lâmina de irrigação aplicada (mm)
- Kc* - Coeficiente cultural
- Ks* - Condutividade hidráulica saturada (mm. d^{-1})
- K(θ)* - Condutividade hidráulica do solo (mm. d^{-1})
- lai* - Índice de área foliar, ou IAF nas abreviaturas
- Llr* - Ponto de murcha permanente, ou PMP nas abreviaturas
- LR* - Densidade radicular media de comprimento (cm.cm^{-3})
- p_u* - Peso úmido da amostra de terra (g)

- p_s - Peso seco da amostra de terra (g)
- par - Radiação fotossinteticamente ativa (MJ m^{-2})
- $pari$ - Radiação fotossinteticamente ativa, interceptada (MJ m^{-2})
- $psic$ - Potencial foliar crítico (bar)
- r - Distância máxima de migração da água (cm)
- r^2 - Coeficiente de determinação
- RUE - Eficiência de utilização da radiação (g.MJ^{-1})
- sat - Armazenamento hídrico a saturação (mm)
- $swcon$ - Coeficiente de drenagem no modelo CERES
- $swdef$ - Taxa de satisfação hídrica
- $swdf1$ - Coeficiente de estresse hídrico
- $swdf2$ - Coeficiente de estresse hídrico
- T - Transpiração real da cultura (mm)
- $Tbase$ - Temperatura base para o crescimento foliar ou radicular ($^{\circ}\text{C}$)
- U - Parâmetro que depende da textura do solo
- z - Espessura da camada de solo (cm)
- zc - Profundidade da cápsula ($\text{cm H}_2\text{O}$)
- Θ - Umidade do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
- γ - Parâmetro sem dimensão que depende da textura do solo

RESUMO

Balanço hídrico e crescimento de raízes da cana-de-açúcar sob disponibilidade de água contrastante comparados ao modelo MOSICAS.

Com o objetivo de calibrar e avaliar o balanço hídrico do modelo de crescimento da cana-de-açúcar MOSICAS em condições brasileiras e estudar o efeito do estresse hídrico no desenvolvimento radicular foi instalado um experimento no campo Experimental do Centro de Tecnologia Canavieira. A umidade do solo e o crescimento radicular da variedade RB 72 454 foram estudados em sequeiro e sob irrigação garantindo condição ótima de fornecimento hídrico. Utilizaram-se como indicadores de crescimento das raízes vivas a sua massa de matéria seca, o seu comprimento e a sua profundidade máxima até um metro no solo, aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 dias após o plantio (DAP) e a profundidade máxima absoluta por ocasião da colheita. A cultura em sequeiro mostrou um sistema mais desenvolvido que a cultura irrigada nas camadas profundas (40-100 cm) a partir de 125 DAP. As plantas irrigadas apresentaram massa e comprimento radiculares significativamente superiores ($P < 0,05$) às plantas em sequeiro nas camadas superficiais aos 241 DAP, durante o período de seca. As plantas não irrigadas responderam às reduções da umidade no solo com a degenerescência radicular nas camadas secas e a emissão de novas raízes nas camadas mais úmidas. A profundidade máxima das raízes foi significativamente superior na cultura em sequeiro, comparada com a cultura irrigada, aos 125 e 332 DAP, que nessa última data atingiu 4,70 e 4,25 m na área em sequeiro e irrigada, respectivamente. A distribuição observada a partir de perfis verticais foi mais homogênea na área em sequeiro, apresentando uma melhor exploração do solo. Aproximadamente 50% dos impactos radiculares totais foram encontrados abaixo de 1 m de profundidade nos dois tratamentos, caracterizando um sistema radicular profundo da variedade RB 72 454. O número total de impactos maior na área em sequeiro, comparada com a área irrigada, sugeriu uma massa radicular maior naquela situação. Estes resultados mostraram a importância de estudar o sistema radicular e as propriedades do solo nas camadas profundas para entender melhor a ecofisiologia desta cultura. O estresse hídrico moderado, observado na condição de sequeiro durante o período estudado, não permitiu mostrar uma grande influência da irrigação na produção de cana-de-açúcar. A disponibilidade hídrica do solo afetou o crescimento radicular da cana-de-açúcar, que foi maior, em termos de profundidade máxima e de massa de raízes, na cultura em sequeiro. O cálculo do balanço hídrico ao longo do ciclo da cultura com o modelo MOSICAS mostrou uma boa correlação entre os valores simulados e observados de umidade média do solo até um metro de profundidade.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, balanço hídrico, crescimento, raízes, irrigação, estresse hídrico.

ABSTRACT

Water balance and root growth of sugar cane under contrasted water availability compared with the MOSICAS model.

In order to calibrate and evaluate under local conditions the water balance of the sugar cane growth model MOSICAS and to assess the effects of water stress on root growth a study was carried out at the Center of Sugar Cane Technology in Brazil. Soil moisture and root growth of the RB 72 454 variety were studied under rain fed and irrigation to assure optimal water supply. Root living dry matter, length and maximum depth were measured 34, 49, 125, 179, 241 and 322 days after planting (DAP), down to a depth of 1 m and at absolute maximum depth at harvesting. Rain fed crop presented a better root system development in the deep layers (40-100 cm) than the irrigated crop, from 125 DAP on. Densities of root length and root dry matter in the upper layers were significantly higher ($P < 0,05$) in the irrigated crop 241 DAP, during the dry period. The rain fed crop responded to variations in soil moisture by an increase in root death within dry layers and root growth in layers with higher water contents. The maximum root depth was significantly higher in the crop submitted to water stress, compared to the irrigated one, 125 and 332 DAP, reaching at this last date the depths of 4,25 m and 4,70 in the irrigated and rain fed areas, respectively. The distribution of root densities observed in vertical soil profiles was more homogenous in the rain fed area, showing a better exploration of the soil. About 50% of the number of root impacts counted down to the depth of 5 m were found beyond the depth of 1 m in the two treatments, showing the ability of the RB 72 454 variety to explore deep soil layers. The higher number of root impacts in the rain fed, compared to the irrigated one, suggested a higher biomass of roots. These results show the importance of studying the root system and soil properties in deep layers to gain insight into the ecophysiology of this crop. The moderate water stress observed throughout the study did not permit to show a clear influence of irrigation on crop yield. Soil water availability affected root growth of sugar cane, which was enhanced in terms of maximum depth and root mass under rain fed conditions. Changes in soil water content simulated by the MOSICAS model fitted well with observations down to 1 m deep.

Key words: sugar cane, water balance, growth, roots, irrigation, water stress.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o primeiro produtor mundial de cana-de-açúcar com uma produção em 2003 de aproximadamente 390 milhões de toneladas, possuindo também a maior área cultivada no mundo com mais de cinco milhões de hectares e gerando um milhão de empregos diretos. 45% da produção são destinados à produção de açúcar e 55% à produção de álcool, seja o anidro, principalmente para ser acrescentado à gasolina, seja o hidratado. O estado de São Paulo é responsável por mais da metade da área plantada onde a cultura da cana representa 29% do PIB agrícola (FNP, 2004). Diante a globalização do mercado, do crescimento das exigências do consumidor e das preocupações da sociedade sobre a saúde e o meio ambiente, os objetivos dos produtores agrícolas mudaram. A viabilidade duma exploração não depende mais só da busca da produtividade máxima, mas sim da otimização do sistema de produção e da sustentabilidade do uso dos recursos.

O desenvolvimento do conhecimento sobre a ecofisiologia vegetal e a informática, permitiram a criação de novas ferramentas de previsão de produção e de ajuda à decisão como os modelos ecofisiológicos. A modelagem na cultura de cana-de-açúcar começou nos anos 80 nos países que cultivam cana, como Austrália e África do Sul. Apesar da importância da cultura da cana-de-açúcar do país no cenário mundial, poucos estudos foram realizados com modelos matemáticos adaptados às variedades e condições brasileiras. A maior parte dos estudos com modelos forma utilizados somente para pesquisas (SILVA; BERGAMASCO; BERNARDES, 2000).

Em 1992, o Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement – CIRAD (França) iniciou o programa para o desenvolvimento do Modelo de Simulação do Crescimento da Cana-de-açúcar - MOSICAS na ilha francesa de Reunião. Funciona com um módulo de crescimento e um balanço hídrico (MARTINÉ et al., 1999) Seu sucesso na previsão de produção sob condições térmicas e hídricas variáveis, e disponibilidade do programa computacional pelos autores, favoreceram o interesse para a calibração e avaliação deste modelo nas condições brasileiras.

Uma parceria foi estabelecida entre a Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz - ESALQ, o CIRAD e o Centro de Tecnologia Canavieira – CTC (ex-COPERSUCAR) para desenvolver este trabalho. Dois estudos foram iniciados juntos: o primeiro sobre a calibração do

módulo de crescimento, conduzido por Carlos Suguitani, e o segundo sobre a calibração do balanço hídrico, apresentado nesta dissertação. Estes dois estudos foram conduzidos simultaneamente utilizando o mesmo experimento de campo, nas mesmas condições e com as mesmas variedades na fase de cana-planta, para avaliar o modelo. A inserção de coeficientes de estresse hídrico no modelo, limitando o crescimento da planta, permitiu abordar o efeito da falta de água sobre a produtividade da cana.

A expansão da área plantada para regiões com condições climáticas e edáficas diferentes das tradicionais acarretou, em muitos casos, no aumento das restrições hídricas para a cana. Com o custo crescente do transporte da cana, a irrigação das áreas próximas às usinas, aumentando sua produtividade, passa a ser uma estratégia interessante. Assim, o entendimento da resposta das variedades à falta de água e do efeito da irrigação adquire caráter prioritário na pesquisa e torna-se mais importante para a tomada de decisões.

Tendo em vista a hipótese de que a disponibilidade hídrica afeta o crescimento radicular da cana-de-açúcar, objetivou-se, com esta pesquisa, estudar em experimento esse processo sob condições contrastantes, e comparar os resultados experimentais com os de modelo matemático que também calculou o balanço hídrico.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Problemática da produção canavieira

2.1.1.1 Importância econômica

A cana-de-açúcar é uma planta interessante do ponto de vista agroindustrial em função dos seus diversos produtos, entre estes sendo principais:

- o açúcar, derivado da sacarose, composto principal da sua comercialização. Em 2003 foram produzidos, aproximadamente, 28,8 milhões de toneladas de açúcar no Brasil,
- o álcool etílico, combustível para motores e insumo em diversos processos industriais. Em 2003, aproximadamente 14,6 milhões de metros cúbicos de álcool etílico, incluindo anidro e hidratado, foram produzidos no Brasil,
- o bagaço, subproduto do processamento da cana, cuja combustão fornece energia,
- o melaço, ou mel final, reciclado na destilaria para produzir aguardente, ou utilizado nas rações do gado, nas indústrias alimentares e farmacêuticas (FNP, 2004).

Desde 1900, o consumo mundial de açúcar foi multiplicado por 15. A cana-de-açúcar produz 70% do açúcar do mundo, diante da produção de beterraba, que ficou estável em 30%. Em 2000, 96 milhões de toneladas de açúcar foram produzidas a partir de cana-de-açúcar, contra 39 milhões de toneladas a partir da beterraba (MARTINÉ, 2003). No Brasil, o uso do etanol como combustível já é uma realidade, seja para veículos que utilizam exclusivamente o álcool hidratado, seja na mistura de 24% de álcool anidro em toda a gasolina comercializada no país, seja nos motores flexíveis para uso de álcool ou gasolina (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo - UNICA, 2002). Alguns construtores de automóveis como, por exemplo, a General Motors e a Fiat, iniciaram a fabricação de modelos bicomcombustíveis no Brasil, e que já interessam a países como a China e o México (SILVA, 2003). Assim, além de ampliar a atividade industrial, destacar a nação com exportadora e estimular o desenvolvimento de novas regiões, a cultura da cana-de-açúcar fornece ao Brasil uma fonte alternativa ao petróleo na geração de energia (TOLEDO, 2003).

2.1.1.2 Problemática da cultura

A abertura dos mercados acelera a necessidade de otimização da produtividade e do uso dos recursos naturais. Nas regiões atualmente produtoras, o aumento de produtividade vai depender da otimização das intervenções como a irrigação. O aumento previsto do consumo dos produtos da cana-de-açúcar vai estimular a expansão da cultura para regiões com condições climáticas diversas. As dificuldades para prever-se o desempenho da lavoura é um dos pontos fracos da agroindústria canavieira no Brasil apesar da potencialidade de ferramentas como o sensoriamento remoto (BERNARDES, 2005; FORMAGGIO, 2004).

Em particular, o desenvolvimento da cultura canavieira necessita de um aprimoramento tecnológico contínuo na ampliação do período de colheita para reduzir os custos de infraestrutura das usinas, da introdução de variedades diferentes e um planejamento de colheita adaptado para conciliar, por parcela colhida, máxima produtividade de colmos e riqueza em sacarose. Assim, a maturação de cada variedade deve suceder-se no tempo para definir um período mais longo de colheita. O planejamento deve aliar a variabilidade de resposta à maturação dos cultivares e a época de plantio para responder a este desafio. Hoje, uma das dificuldades dos industriais é prever a data de maturação de cada variedade explorada e os modelos de crescimento são ferramentas interessantes para esta previsão em função dos múltiplos fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento (BEAUCLAIR, 2004).

2.1.2 Fisiologia e fenologia da cana-de-açúcar

2.1.2.1 Generalidades

A cana-de-açúcar é uma planta tropical e semi-perene, que foi difundida na China e Índia a partir da Nova Guiné (FAUCONNIER, 1991; LIMA, 1984). A cana teria chegado em 1532 ao litoral do Brasil (IAA, 1972) e foi em grande parte responsável pela ocupação econômica do país pelos portugueses.

A planta faz parte da família Poaceae e pertence ao Gênero *Saccharum*, que abrange seis espécies. Duas são selvagens (*S. spontaneum* e *S. robustum*) e as outras são cultivadas para o açúcar (*S. officinarum*, *S. sinense* e *S. barberi*) ou como legume para alimentação humana (*S.*

edule) (CASTRO; KLUGE, 2001). As variedades cultivadas atualmente são resultado do cruzamento complexo entre uma ou varias das espécies cultivadas com a espécie selvagem *S. spontaneum* ou mais raramente *S. robustum* (MARTINÉ, 2003).

A propagação da cana se faz com toletes ou pedaços de colmo plantados em sulcos. Os nós dos toletes originam raízes superficiais, que tem uma vida curta e que absorvem água e nutrientes para os brotos jovens, e as gemas do tolete originam brotos que emergem do solo. Da base desses brotos ocorrem perfilhos primários, que originarão raízes superficiais, de fixação e profundas, chamadas de raízes cordões e perfilhos secundários, e assim sucessivamente. Este fenômeno define a brotação e o perfilhamento ou ramificação subterrânea, todos como um caráter geral das gramíneas (CAMARGO, 1976). De acordo com Castro e Kluge (2001) a cana se desenvolve em função das reservas do tolete durante os trinta primeiros dias. A alimentação em água e nutrientes é assegurada pelas raízes de fixação do tolete. Noventa dias após o plantio, a cana depende unicamente das raízes emitidas pelos perfilhos.

A cana-de-açúcar tem como fatores mais importantes para a germinação, o crescimento e o desenvolvimento, elevada temperatura, intensa radiação e abundante umidade (CAMARGO, 1976). A cana mostra um bom crescimento entre 25 e 33°C, com um mínimo a 20°C e um máximo de 38°C (CÂMARA; OLIVEIRA, 1993; CASTRO; KLUGE, 2001). Uma redução significativa do sistema radicular observa-se com uma temperatura de 17,8°C. As gemas não brotam sob temperaturas abaixo de 8,5°C. A radiação solar afeta todos os estádios fenológicos da cana. Responde melhor a adubação e irrigação nas regiões de alta luminosidade. Sendo uma planta cujo processo fotossintético se dá pelo ciclo C4, o ponto de saturação lumínico é alto, com resposta favorável a elevadas intensidades luminosas (CASTRO; KLUGE, 2001). Segundo Lima (1984) e Fauconnier (1991), 1500 mm de precipitação pluvial anuais são requeridos pela cana, entretanto, Castro e Kluge, (2001) alegam que 1000 mm, bem distribuídos ao longo do ano, são suficientes para que a planta complete o ciclo de desenvolvimento.

A cana apresenta quatro estádios fenológicos: i) a brotação e emergência dos brotos, ii) o perfilhamento, iii) o período de grande crescimento, que inicia no perfilhamento e vai até o início de acumulação da sacarose e iv) a maturação com intensa acumulação da sacarose nos colmos, completando um ciclo. Em alguns casos o ciclo inclui a floração e frutificação, que são indesejáveis para a produção de colmos industrializáveis. A duração dos ciclos da cultura pode variar entre 11 e 20 meses, dependendo da época de plantio, se como cana de ano ou como cana

de ano-e-meio, e da variedade. Os colmos industrializáveis compõem-se de 10 a 16% de fibra e de 84 a 90% de caldo. No caldo, a água representa 75 a 82% e os sólidos solúveis representam 18 a 25%, e entre eles a sacarose compondo 14 a 24 % do caldo (CÂMARA; OLIVEIRA, 1993).

2.1.2.2 Relações hídricas e a cana-de-açúcar

As condições hídricas externas e internas são fatores importantes para o crescimento da planta. O crescimento cessa com uma umidade do solo igual ou inferior ao ponto de murcha permanente (PMP) e pode recomeçar com o retorno da umidade acima desse ponto. A cana é capaz retirar água do solo quando a umidade atinge valores de 2 a 4 % abaixo do PMP normalmente determinado em laboratório, com 15 atm de tensão. Assim, a fotossíntese e o acúmulo de sacarose podem continuar sem afetar a produção final (CAMARGO, 1976). As condições de umidade do solo para crescimento das plantas variam entre 25% e 45% de ocupação com água do volume de poros do solo para atingir um máximo entre 50 e 60% (LIMA, 1984).

As perdas por transpiração aumentam durante os seis primeiros meses com o desenvolvimento das folhas e então permanecem constantes (CASTRO; KLUGE, 2001). A transpiração aumenta com o incremento da temperatura do ar acima do mínimo de 15°C. A absorção e a transpiração são máximas para uma temperatura do solo superior a 23°C e nulas para temperaturas do solo inferiores a 18°C (FAUCONNIER, 1991). A evapotranspiração máxima da cana, E_t , em cobertura total e crescimento ativo, fica em torno de 1,2 vezes a evaporação do tanque classe A e definida como E_o , estabelecendo um coeficiente cultural (k_c) de igual valor, para diminuir até 1 para condições climáticas menos favoráveis (FAUCONNIER, 1991; THOMPSON, 1976). A relação E_t/E_o cresce linearmente da germinação, com valor de 0,4 até o fechamento das copas, com valor de 1,2 (THOMPSON, 1976). Os estudos sobre irrigação da cultura de cana mostram que o crescimento e a produção de açúcar são significativamente superiores aos controles não irrigados (ARAGÃO; PEREIRA, 1979; LEME; SCARDUA; ROSENFELD, 1981; ROSENFELD; LEME, 1984). Demétrio (1978) mostrou que uma lâmina de irrigação correspondente a 60% da evaporação do tanque Classe A é a melhor recomendação de irrigação, nas condições do estudo, com uma precipitação natural total de 1583 mm durante o ciclo.

As perdas de água da cana ocorrem por transpiração e exudação. A transpiração efetua-se pelos estômatos, que são aproximadamente duas vezes mais numerosos na superfície inferior das folhas que na superior, e pela cutícula. Entretanto, a presença de células buliformes faz com que a transpiração tenha taxas similares nas duas faces. A transpiração pode ser afetada pela variedade, umidade do solo, aplicação de fertilizantes sendo que o nitrogênio estimula a transpiração, e pelo enrolamento das folhas que ocorre quando a taxa de transpiração ultrapassa a de absorção e que diminui a transpiração de 10 a 20% (CAMARGO, 1976).

A absorção de água pode ser alterada pelos mesmos fatores que afetam a transpiração. A luz e a temperatura do ar e do solo aumentam a transpiração e por consequência a taxa de água absorvida. A umidade atmosférica também tem um papel importante, definindo a demanda atmosférica em água. Em condições de alta umidade atmosférica, os perfilhos podem emitir raízes aéreas na base da planta. A maior parte da água é absorvida através dos pêlos absorventes, porém, alguma absorção ocorre também pelas folhas. A área de pêlos absorventes depende da variedade e da idade da planta, definindo assim a capacidade de absorção da água da planta. A umidade do solo afeta fortemente a distribuição do sistema radicular, desenvolvendo raízes superficiais em condições de umidade alta e raízes profundas em condições de estresse hídrico. Baixa umidade igualmente estimula o desenvolvimento dos pêlos absorventes (CAMARGO, 1976).

Existe uma ótima correlação entre o consumo de água e a produção de colmos, onde água representa cerca de 70% da massa fresca total (CASTRO; KLUGE, 2001). A água apresenta grande importância para a cana-de-açúcar, principalmente nas primeiras fases de desenvolvimento, ou seja, na brotação, perfilhamento e estabelecimento. Na fase de crescimento intenso a importância da água na cultura diminui, chegando a ser considerado como quase insignificante no período de maturação (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000).

A eficiência no uso da água medida por Aragão e Pereira (1979) é de 9 g de colmos de cana-de-açúcar produzidos por litro de água evapotranspirada para todo o ciclo. Barbieri (1981) mostrou um consumo de água de 0,5 mm/dia na época da emergência e de 6,03 mm/dia na fase de pico de consumo, decaindo para 2,8 mm/dia no início da fase de maturação. Os consumos de água entre cana-planta e cana-soca apresentaram as mesmas variações temporais.

2.1.2.3 Sistema radicular

Os conhecimentos sobre o sistema radicular são importantes porque existe uma estreita correlação entre o seu desempenho e a adaptabilidade da cana para desenvolver-se em diferentes condições hídricas, bióticas, ou de texturas de solo (CAMARGO, 1976). No mesmo sentido os conhecimentos sobre a distribuição das raízes no solo, podem orientar a adubação, a irrigação e as intervenções de cultivo. O desempenho do sistema radicular pode ser componente genético, o que é importante para o melhoramento, como por exemplo, no aprimoramento da resistência às doenças ou ao estresse hídrico. Para Alvarez; Castro e Nogueira (2000) as características do sistema radicular de cana-de-açúcar têm um papel essencial para a regeneração das soqueiras após a colheita.

O sistema radicular é constituído pelas raízes emitidas pela zona radicular do tolete e pelas raízes emitidas pela zona radicular dos perfilhos. As raízes do tolete, finas e fibrosas, se desenvolvem até a aparição das raízes dos perfilhos mais grossas e profundas e depois morrem. As raízes emitidas a partir da base dos perfilhos são grossas, penetram no solo com um ângulo de 45 a 60° e ramificam-se até a terceira ordem, com uma diminuição gradativa do seu diâmetro (CAMARGO, 1976). Os tipos de raízes dos perfilhos são:

- raízes superficiais, fibrosas e ramificadas que tem um papel preponderante de absorção,
- raízes de fixação mais grossas e profundas,
- raízes cordões, em pequena quantidade, mas que podem atingir 4 a 6 metros de profundidade.

Na cana planta, aproximativamente 50% da massa seca das raízes ficam nos 25 primeiros cm de profundidade do solo e 90% nos 60 primeiros cm (BALL-COELHO et al., 1992) e 70% das raízes concentram-se nos primeiros 50 cm do solo (CÂMARA; OLIVEIRA, 1993). Após o corte, 17% das raízes morrem e o restante é substituído progressivamente pelas novas raízes da cana-soca. Na cana-soca, entre 62 e 69 % da matéria seca total de raízes localizam-se nos primeiros 50 cm, com 38-48 % das raízes vivas nos primeiros 30 cm (BALL-COELHO et al., 1992). De acordo com estes autores, a massa total radicular e o comprimento das raízes vivas são superiores numa cultura de cana-soca que numa cana-planta. Por outro lado, Fernandes (1979 apud ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000) observou que o sistema radicular de cana-planta é mais desenvolvido que o da rebrota.

As raízes da variedade SP 70-1143, no primeiro ano de rebrota, aparecem em maior quantidade em todas camadas do solo em cana crua em comparação com a cana queimada. Já no segundo ano de rebrota aparecem em maior quantidade em cana queimada. A variação na distribuição relativa das raízes nas primeiras camadas deve-se principalmente à variação da umidade do solo, que sendo maior na superfície do solo na cana crua não induz a crescimento de raízes em camadas mais profundas (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000). O estudo de Vasconcelos (2002) mostra que o sistema radicular é mais superficial para uma cana colhida crua e mecanicamente, devido a maior umidade do solo no período seco e maior teor em cálcio advindo da decomposição das palhas na superfície do solo, que para uma cana colhida queimada e manualmente. As raízes da soca são mais superficiais do que as da cana-planta, por causa do ciclo mais curto e da brotação dos toletes mais perto da superfície do solo. A incorporação de raiz durante o período de crescimento também pode constituir um significativo acréscimo de material orgânico ao solo e determina o volume efetivo de solo explorado pelas raízes (BALL-COELHO et al., 1992).

As variedades apresentam diferenças em crescimento radicular. Hermann (1997) mostrou, em estudo em Latossolo Vermelho Escuro Álico com textura média, que a variedade SP70-1284 apresentou menor massa de matéria seca de raiz que as variedades SP70-1143 e RB72 454, ficando essa última em situação intermediária. As três variedades apresentaram redução gradativa da massa de matéria seca de raízes em profundidade até 100 cm no solo. Já Krutman (apud CASAGRANDE, 1991) em solo aluvial argiloso não encontrou diferença marcante em massa de raízes e sua distribuição em profundidade entre as variedades POJ 2878 e CO 331, porém, houve uma maior concentração de raízes na superfície do solo, até 35 cm de profundidade.

2.1.3 Os modelos na agricultura

2.1.3.1 Definição

Um sistema sendo uma simplificação da realidade, um modelo é a representação deste sistema. Um modelo matemático permite quantificar o comportamento de um sistema. Ele pode ser uma equação ou conjunto de equações, que devem operar e expressar um sistema real e

simular suas mudanças, se o sistema for dinâmico (BERNARDES et al., 1998; LIMA, 1995).

Assim, a modelagem permite:

- organizar os conhecimentos para facilitar o entendimento do funcionamento de um sistema,
- auxiliar na interpretação de resultados experimentais,
- resumir grande quantidade de informações sobre um sistema,
- identificar informações em falta para entender o funcionamento de um sistema,
- fazer interpolações e previsões a partir de simulações,
- sugerir prioridades de recursos e linhas de pesquisa,
- simular situações não experimentáveis.

2.1.3.2 Classificação dos modelos matemáticos

Existem vários tipos de modelos matemáticos, geralmente classificados em modelos empíricos ou explanatórios (LIMA, 1995):

- os modelos empíricos descrevem relações entre variáveis sem referir-se a qualquer estrutura biológica ou física que possa existir entre elas. Eles são baseados em experiências e observações, excluindo os sub-sistemas a priori, e operam com uma mesma escala de organização entre variáveis de entrada e resultados. São geralmente satisfatórios para uso em previsão interpolando dentro da faixa de valores na qual foram desenvolvidos;
- os modelos explanatórios, mais complexos, desenvolvem funções matemáticas que representam os conhecimentos e as hipóteses que relatam o comportamento observado dos fenômenos. Eles são utilizados para previsão inclusive em faixa que extrapole aquela na qual foram desenvolvidos. Os modelos explanatórios de simulação, aplicados ao sistema solo-planta-atmosfera, descrevem os processos fisiológicos da planta e do solo, fisicamente ou quimicamente. Ao contrário dos modelos empíricos, os modelos explanatórios explicam fenômenos pelo desempenho dos subsistemas na escala inferior. Penning De Vries et al. (1989) classificam estes modelos, que analisam o sistema na sua integralidade e descrevendo os processos inter-relacionados quantitativamente em: preliminares, compreensivos e simplificados (Tabela 1). Os modelos preliminares têm estrutura simples. Os compreensivos representam o sistema no qual os elementos essenciais são entendidos e incorporados. Modelos simplificados são resumos dos modelos compreensivos.

Tabela 1 - Comparação entre os três tipos de modelos explanatórios quanto ao seu valor de previsão, científico, instrutivo e de aplicabilidade

Tipos de modelos explanatórios	Valor de previsão	Valor científico	Valor instrutivo	Valor de aplicabilidade
Modelos preliminares	+	+++	++	+
Modelos compreensivos	++	+++	+	++
Modelos simplificados	+++	+	+++	+++

Fonte: Penning De Vries et al., 1989.

Na década de 80, começou o desenvolvimento dos modelos fisiológicos de previsão de safra. Tais modelos procuram simular o crescimento e o desenvolvimento das plantas usando relações fisiológicas como fotossíntese, produção de fitomassa, florescimento, enchimento de grãos e uso de água pela cultura, entre outros. Os modelos ecofisiológicos integram as relações entre os fatores do ambiente, como clima, solo e as intervenções humanas, com a fisiologia da planta, para assim definir e quantificar um ecossistema agrícola. Assim, estes modelos procuram quantificar os efeitos do ambiente no crescimento e na produtividade das culturas (PENNING DE VRIES et al., 1989).

Os modelos de simulação de crescimento podem ser: (i) modelos científicos que auxiliam no entendimento dos processos fisiológicos e interações no ecossistema agrícola, ou (ii) modelos de engenharia que utilizam a ciência para resolver um determinado problema como manejo de irrigação ou otimização do uso de nitrogênio. Matthews et al., 2000 apud Lima (1995), propõem separar os modelos utilizados para pesquisas, daqueles para tomadas de decisão ou dos usados como ferramenta para treinamento e educação.

Os modelos são ferramentas adaptadas para responder a estas questões. A cana, sendo uma planta de ciclo relativamente longo, a sua modelagem pode diminuir os custos de estudos, reduzindo as superfícies e amostras necessárias de experimento de campo. No mesmo sentido, o grande número de cenários encontrados nesta cultura aumenta a necessidade de desenvolver modelos ecofisiológicos (SILVA; BERGAMASCO; BERNARDES, 2000).

2.1.3.3 Calibração, avaliação e análise de sensibilidade

Calibrar um modelo consiste no ajuste de seus parâmetros para que as variáveis resposta reproduzam, com a maior proximidade possível, um conjunto de dados observados. A calibração procura a reprodução, a mais fiável possível, dos fenômenos naturais e por consequência consiste da tentativa de obter-se uma concordância entre os dados medidos no campo e os resultados simulados. Isso chama a atenção sobre a necessidade de uma colheita precisa dos dados no campo. Uma re-calibração pode ser feita para reajustar os parâmetros para condições diferentes de solo, da cultura, etc. (LIMA, 1995).

A avaliação necessita a comparação dos resultados simulados e das observações. Esta comparação permite apreciar o desempenho do modelo em varias situações. A avaliação baseia-se sobre um registro completo dos fatores que influam sobre o crescimento e o desenvolvimento da planta, como o clima, o solo, as intervenções agrícolas (LIU; BOTNER; SAKAMOTO, 1989).

A análise de sensibilidade é um teste da reação do modelo à mudança de parâmetros. Este teste revela se alterações em parâmetros produzem ou não mudanças significativas nos resultados simulados. É uma maneira interessante para avaliar quais os parâmetros que são mais sensíveis aos efeitos do ambiente ou do manejo sobre a produtividade (GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995).

2.1.4 Modelagem na cultura de cana-de-açúcar

A viabilidade econômica de qualquer exploração depende da produtividade do sistema. Os modelos fisiológicos são importantes ferramentas para estimativa da produtividade e para orientar o manejo e o planejamento da produção. Baseado sobre o entendimento do funcionamento do agroecossistema, esta ferramenta qualifica e quantifica as interações que existem entre o clima, a planta e o solo, a partir de equações matemáticas. Num contexto de otimização econômica e de produção sustentável, a pesquisa deve enfrentar uma grande variedade de problemas biofísicos e socioeconômicos e geralmente exige tempo e recursos financeiros importantes. Os modelos permitem avaliar, a partir de simulações, a influência de vários cenários técnicos sobre a produção, rapidamente e a baixo custo (PENNING DE VRIES, 1989).

No Brasil, a modelagem do crescimento como ferramenta de manejo e planejamento ainda não é muito desenvolvida e utilizada, devido à falta de modelos adaptados às condições brasileiras, de produtores ou técnicos treinados, e de material de informática. Assim, apesar do país ter a produção e a área cultivada de cana-de-açúcar mais importante do mundo, os seus produtores ainda utilizam muito pouco os softwares no processo produtivo agrícola da cana-de-açúcar. As pesquisas sobre os efeitos de diversos cenários de adubação, irrigação, espaçamento, controle de pragas e doenças na produtividade são inúmeras. Mas os estudos que inter-relacionam os fatores do ambiente como clima e solo com a fisiologia da cana e seu reflexo no crescimento a produtividade são poucos. Modelos de crescimento da cana existem há 15 anos em outros países produtores de cana com Austrália, África do Sul e a uma escala menor, França (BERGAMASCO; et al., 2002; BERNARDES et al., 2002; SILVA; BERGAMASCO; BERNARDES, 2000).

Num contexto de aumento do consumo mundial de açúcar, com 30 MT até a 2010 segundo Martiné (2003), e de álcool combustível, devido ao aumento da população mundial e do consumo por pessoa, a cultura de cana deve dispor rapidamente de modelos de otimização da produtividade. Além desta comprovação, a estagnação da produção de beterraba e a redução das áreas disponíveis nos estados brasileiros, onde as terras já são valorizadas, vão estimular os produtores para desenvolver novas técnicas para aumentar a produtividade e longevidade das culturas.

Ademais, sendo uma planta de ciclo longo e de funcionamento relativamente simples, a cana é um material vegetal interessante para desenvolver um modelo ecofisiológico. Assim, grande é o interesse de calibrar, nas condições brasileiras, um modelo que já foi desenvolvido e avaliado, como o modelo francês MOSICAS. A modelagem do balanço hídrico faz parte integrante dos modelos de crescimento. Ela avalia a disponibilidade da água no solo para a cultura, sendo este um dos principais fatores que afeta o seu crescimento. Além disso, esta modelagem permite prever as perdas por drenagem, evaporação e escoamento superficial. O estudo dos fluxos de água numa cultura é uma ferramenta indispensável para conhecer as perdas de água, e para responder as exigências da planta durante o ciclo e assim melhorar as dosagens e reposições de irrigação, adubação ou tratamentos fitossanitários.

Os modelos mais utilizados para simular a produção de açúcar e a biomassa seca e fresca dos colmos industrializáveis são: i) Agricultural Productions Systems Simulator (APSIM-

sugarcane), ii) Q-CANE da Austrália e iii) CANEGRO da África do Sul. Os três modelos baseiam-se em conceitos e definições de variáveis de estado e fluxos diferentes entre si. Entretanto, usam a mesma seqüência de passos para simular a produção de açúcar, através da seqüência de três eventos:

- interceptação da radiação incidente útil pela área foliar, o índice de área foliar *lai* (m^2 de folha por m^{-2} de solo) sendo modelado a partir da temperatura do ar,
- converção da radiação útil interceptada em biomassa,
- partição desta biomassa nos diferentes componentes da planta, entre eles o açúcar.

Uma avaliação destes modelos em condições de estresse ainda não foi realizada. No caso do modelo CANEGRO, o grande número de variáveis que ele exige praticamente inviabiliza a sua utilização por pequenos produtores e mesmo para algumas usinas. No Brasil, o modelo SIMCANA foi construído por Pereira e Machado em 1986, mas não foi avaliado ou utilizado em larga escala ou em comparação com dados de plantios comerciais (BERGAMASCO et al., 2002; INMAN-BAMBER, 1991; O'LEARY, 2000; SILVA; BERGAMASCO; BERNARDES, 2000).

2.1.5 O modelo MOSICAS

2.1.5.1 Descrição

A análise dos pontos fracos e a falta de documentação disponível sobre os modelos existentes, associadas à demanda dos produtores e industriais do setor canavieiro na Ilha de Reunião, estimularam o CIRAD para construir um novo modelo de simulação de crescimento da cana-de-açúcar, chamado MOSICAS. Este modelo ecofisiológico permite, a partir de variáveis de entrada de obtenção simples, como os dados tradicionais meteorológicos, de solo, da planta e do manejo cultural, de calcular variáveis climáticas, como a evapotranspiração máxima e real, a soma térmica; de solo como a capacidade de água disponível (CAD) e a taxa de drenagem; e da planta como o crescimento, partição, morfologia e produtividade, entre outros (Figura 1) (MARTINÉ, 2000). O modelo MOSICAS pode ser considerado como compreensivos pela classificação de Penning De Vries et al. (1989).

Figura 1 - Esquema simplificada dos processos, fluxos, estados e variáveis integrados no modelo MOSICAS

As simulações para o desenvolvimento do modelo e sua calibração na Ilha de Reunião foram realizadas com parâmetros da variedade R570, largamente plantada naquelas condições. Assim este modelo se compõe de dois módulos dinâmicos, um módulo de crescimento e um balanço hídrico, funcionando com intervalo de cálculo diário. O balanço hídrico calcula os fluxos de drenagem, as perdas por evaporação do solo e por transpiração, as ascensões capilares e a taxa de satisfação hídrica (lâmina de água disponível / CAD) sobre o perfil radicular. Para estes diferentes cálculos, o balanço hídrico usa a área foliar computada pelo módulo de crescimento.

2.1.5.2 A plataforma SIMULEX

O modelo se integra num programa de simulação chamado “Simulateur d’expérimentations” - SIMULEX desenvolvidos pelo CIRAD. Essa plataforma de simulação foi criada para facilitar o uso dos modelos, como o MOSICAS, numa ferramenta de ajuda à decisão

para o manejo de grandes áreas de culturas agrícolas (MARTINÉ; COMBRES; MÉZINO, 2001; TODOROFF et al., 2000) (Figura 2). Um Sistema de Informação Geográfica - SIG foi integrado para organizar no espaço, os resultados simulados.

Figura 2 - Descrição da plataforma SIMULEX

As funções do SIMULEX são o manejo dos dados, a integração de modelos em vários módulos, à simulação do estado da cultura como a produtividade em colmos e a riqueza em açúcar, do estado do solo com o armazenamento em água, e das variáveis bioclimáticas como a demanda em água (Figura 3). As simulações são realizadas fazendo variar os parâmetros, os tratamentos, os sistemas de irrigação em tipo e frequência de aplicação de água, por exemplo.

Figura 3 - Funcionalidades da plataforma SIMULEX

2.1.5.3 O módulo de simulação do crescimento

O módulo de crescimento é organizado seguindo três processos clássicos de funcionamento (Figura 4):

- a interceptação da radiação útil ou fotossinteticamente ativa (*par*) por unidade de *lai* que permite o cálculo da radiação útil interceptada (*pari*),
- a conversão da radiação útil interceptada em biomassa seca (*dmst*),
- a partição desta biomassa seca nos diferentes componentes: raízes, folhas, colmos e sacarose.

Outros aspectos importantes que atuam sobre o crescimento como o estado hídrico dos colmos e do solo e os estádios fenológicos, são tomados em consideração neste módulo. Os coeficientes de estresse hídrico variam entre 0 (estresse máximo) e 1 (sem estresse) (SLABBERS, 1980) e são aplicados nos cálculos do desenvolvimento e senescência da área foliar, da conversão e da partição da biomassa de colmos industrializáveis entre fibras e sacarose.

Como a cana-de-açúcar não apresenta mudanças bem definidas entre as fases fenológicas, os principais estádios de desenvolvimento da planta são usualmente definidos por uma acumulação dos graus-dia. A temperatura *tbase* correspondendo ao limite inferior de temperatura para a aparição das folhas, os graus-dia são calculados a partir da diferença entre a temperatura *tbase* e a temperatura média diária.

Figura 4 – Modelo de elaboração da sacarose e dos colmos industrializáveis

2.1.5.4 O módulo do balanço hídrico

2.1.5.4.1 Importância do balanço hídrico

O manejo da água na agricultura precisa levar em conta a demanda climática e a reserva de água no solo disponível para as plantas. O estudo da dinâmica da água no ecossistema atmosfera-plantasolo envolve a avaliação da capacidade de reserva em água do solo, considerado como um tanque com limite de preenchimento e dos fluxos de entrada e saída deste tanque, e o manejo eficiente dessa reserva de água para produção agrícola (SINGELS; KENNEDY; BEZUIDENHOUT, 1998).

O conceito do solo como um tanque é útil para facilitar o cálculo da quantidade de água disponível para a planta e avaliar os riscos de estresse hídrico. É o estoque de água numa parte de porosidade do solo que permite às plantas transpirarem sem que ocorra recarga em água com chuva ou irrigação. Todavia, a representação dos movimentos da água no solo é mais complexa. A água pode drenar para fora da zona radicular e durante a umectação de um solo seco, as partículas do solo podem reter mais fortemente a água, indisponibilizando-a para as plantas. Por consequência, os métodos para avaliar a água disponível para planta no solo necessitam aproximações, mas o conceito permite calcular o balanço hídrico e o impacto sobre a produção (RITCHIE, 1981).

A modelagem do balanço hídrico torna-se mais comum com a necessidade de melhorar o desenvolvimento tecnológico da agricultura, ganhar precisão nas estimativas de produtividade, melhorar o manejo do sistema de produção, planejar irrigação em função dos recursos hídricos, etc. Também, os conhecimentos sobre o movimento da água no solo são essenciais para solucionar os problemas de drenagem, de conservação da água, poluição e para controlar a infiltração ou o escoamento superficial (runoff) (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV, 1972). Num contexto de terras não disponíveis nos estados grandes produtores de cana-de-açúcar e de aumento da demanda, a irrigação seria um meio de exploração das terras menos adaptadas e de redução da variabilidade entre ciclos da produção. Além disso, a irrigação de áreas próximas às usinas, aumentando sua produtividade, seria uma estratégia mais interessante do que realizar novos plantios que implicarão em um custo elevado de transporte.

Os fatores que influenciam o balanço hídrico, como as características de atmosfera, planta e solo, são interdependentes. Mas o estudo da dinâmica do balanço da água no solo deve avaliar cada fator e as interações entre eles, para simplificar o modelo.

2.1.5.4.2 Funcionamento do balanço hídrico no modelo MOSICAS

O balanço hídrico utilizado no modelo modelo “Crop Environment Resource Synthesis” - CERES, trazendo alguns melhoramentos desenvolvidos por outros autores, foi adotado para a construção do módulo de balanço hídrico do modelo MOSICAS. O modelo CERES tem a vantagem de ser bem documentado e disponível (International Consortium for Agricultural Systems Applications - ICASA), além de apresentar uma dinâmica e um intervalo de cálculo diário que correspondem bem com o módulo de crescimento do MOSICAS. Os modelos de tipo CERES são modelos de simulação dos processos fisiológicos de cultura, desenvolvidos pelo Grassland, Soil and Water Research Laboratory (JONES; KINIRY, 1986).

O modelo CERES-Maize foi desenvolvido durante os anos 1980, nos Estados Unidos, para modelar o crescimento da cultura de milho. Este tipo de modelo fisiológico procura simular o crescimento e o desenvolvimento das plantas usando relações matemáticas baseadas na teoria fisiológica, tais como fotossíntese, produção de fitomassa, florescimento, enchimento de grãos e uso de água pela cultura (COSTA, 1992). Segundo Lima (1995), o modelo CERES é uma ferramenta interessante de decisão de manejo de culturas, de previsão de produtividade em grande escala, e de análise de risco multianual para planejamento estratégico de definição de necessidades de pesquisa. Usa as condições atmosféricas, algumas características simples do solo, os parâmetros do cultivar e as práticas de manejo como variáveis de entrada. A temperatura do ar é a principal variável que influencia o desenvolvimento da cultura. O CERES foi calibrado e avaliado para outras culturas nas condições tropicais, como a cana-de-açúcar.

Os autores Jones e Kiniry (1986) mostram a necessidade de uma caracterização precisa dos solos e de uma boa estimativa do conteúdo de água no solo para reduzir a margem de erros nas simulações e incluíram a subdivisão do solo em camadas para o cálculo do balanço hídrico. Este submodelo multicamadas foi elaborado com o objetivo de avaliar, com relações empíricas simples, o fluxo de drenagem à base das diferentes camadas de solo, exploradas pelo sistema radicular, e foi avaliado por Comerma; Guenni e Medina (1985) na Venezuela. Os valores do

teor em água no solo, simulados pelo modelo, e determinados em camadas do solo, foram comparados com medidas de campo. Este estudo permitiu concluir que o submodelo simulava, de maneira bastante precisa e naquela situação, o movimento da água no solo para assim prever o grau de estresse hídrico (LIMA, 1995). Este submodelo foi modificado para versão melhorada por Gabrielle; Menasseri e Houot (1995), integrando a condutividade hidráulica do solo.

O submodelo do balanço hídrico é unidimensional, seguindo um eixo vertical e funcionando com intervalo temporal de cálculo diário. Para cada unidade temporal, a infiltração, a drenagem, a evapotranspiração e a redistribuição dos fluxos são determinadas. O movimento da água simulado pelo submodelo é representado pela água que se infiltra e preenche o perfil, camada por camada, até que seja atingido o conteúdo de água correspondente à capacidade de campo naquelas camadas. A drenagem à base da ultima camada caracteriza a drenagem profunda. A quantidade de água final numa camada depende do conteúdo de água inicial da mesma camada, da capacidade de campo, das entradas hídricas (precipitação e irrigação), das ascensões capilares da camada inferior, das perdas por evaporação (para a camada superficial do solo) e das perdas por transpiração (dependentes da densidade radicular na camada considerada). A quantidade de água na última camada é função do teor hídrico e do tempo, e sua drenagem depende do gradiente hidráulico (GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995). As variações dos teores em água do solo são calculadas cada dia com a equação do balanço hídrico (eq. 1), na qual as entradas de água no sistema solo são iguais às saídas de água:

$$\Delta A_{sw} = Ch + Irr - In - E - T - Es - D \quad (1)$$

onde :

- ΔA_{sw} é a variação de lâmina de água do solo (mm) entre dois dias,
- Ch é a chuva ou precipitação pluviométrica (mm),
- Irr é a lâmina de irrigação aplicada (mm),
- T é a transpiração real do povoamento (mm),
- E é a evaporação real do solo (mm),
- In é a interceptação da chuva pelas folhas (mm), não considerada no modelo CERES,
- Es é o escoamento superficial, considerado nulo em terreno com declive inferior a 3%,
- D é a lâmina de água drenada (mm).

A precipitação pluviométrica, a lâmina de irrigação e a evapotranspiração potencial *ETP* (da qual depende a evapotranspiração real), são as variáveis de entrada e a lâmina de água na camada de solo e a lâmina de água drenada são as variáveis de saída (GRANIER et al., 1999). A profundidade do perfil de solo, ou profundidade efetiva, estudado e dividido em diferentes camadas, representa a parte do solo explorado pelo sistema radicular. A profundidade efetiva é a profundidade responsável pelo suprimento de 95 % da água transpirada pela planta. A profundidade estudada varia geralmente entre 1 e 2 metros, dependendo do sistema radicular considerado. A determinação da espessura de cada camada depende da repartição das raízes no solo. A camada entre 0 e 20 cm é importante, pois ela representa a sede da evaporação do solo, do desenvolvimento das raízes superficiais e da decomposição da matéria orgânica.

O funcionamento diário deste balanço decompõe-se em cinco etapas: cálculo dos fluxos de drenagem, das perdas de água por evapotranspiração e dos movimentos ascendentes da água no solo por capilaridade, determinação da densidade e profundidade radicular e cálculo, sobre o perfil radicular, da lâmina de água disponível.

O balanço hídrico utiliza o *lai* calculado pelo módulo de crescimento e fornece a este módulo duas variáveis essenciais para seu funcionamento: a transpiração potencial *ep0* e a taxa de satisfação hídrica *swdef*, compreendida entre 0 e 1. Esta taxa corresponde, sobre o perfil radicular, à fração de água disponível para a planta (lâmina útil do dia considerado) dividida pela reserva utilizável de água ou CAD: eq. (2)

$$swdef = asw / CAD \quad (2)$$

2.1.5.4.3 Movimento da água no solo

2.1.5.4.3.1 Drenagem acima da saturação

Este modelo a compartimentos é construído com o objetivo de avaliar com relações empíricas simples, o fluxo de drenagem à base das diferentes camadas de solo, exploradas pelo sistema radicular. Neste balanço multicamada, cada camada de solo é representada como uma reserva possuindo três níveis de água características (Figura 5), determinados com a curva de

retenção que representa a variação da umidade do solo em função do potencial mátrico $h(\theta)$ no PMP (llr), capacidade de campo ($dulr$) e saturação (sat).

A lâmina da capacidade de água disponível para a planta numa camada i de solo, $CAD_{(i)}$, corresponde, assim, à diferença entre a lâmina de água na capacidade de campo $dulr_{(i)}$ e a lâmina de água no PMP dessa camada $llr_{(i)}$: eq. (3)

$$CAD_{(i)} = dulr_{(i)} - llr_{(i)} \quad (3)$$

Figura 5 - Representação de uma camada de solo como um tanque e os três níveis de água características

Os fluxos de drenagem devidos à atração gravitacional, e que ocorrem após precipitações ou irrigações, são calculados. Sendo a área plana, para simplificar o cálculo, as perdas por escoamento superficial podem ser negligenciadas e integram-se na drenagem. A partir de um armazenamento inicial de água em cada camada de solo, as precipitações e irrigações são acrescentadas. O volume de água acima da saturação de cada camada drena livremente para a camada inferior. O volume de água drenada acima da capacidade do campo é limitado pela condutividade do solo da camada considerada. No modelo MOSICAS, a drenagem é calculada, diariamente, através do método “tipping bucket”.

Cada camada de solo é associada a um tanque de água onde a água disponível Asw no solo varia entre o PMP e a saturação.

No dia j , o modelo calcula a quantidade de água disponível na primeira camada de solo i (mm), considerando que não tem drenagem: eq. (4)

$$Asw_{i(j)} = Asw_{i(j-1)} + Ch_{(j)} + Irr_{(j)} - E_{i(j)} - (R_i \times T_{(j)}) - Es_{(j)} \quad (4)$$

Se a quantidade de água for superior a quantidade correspondente à saturação da camada i , sat (mm), uma drenagem pode ser calculada: eq. (5)

$$D_{i(j)} = Asw_{i(j)} - sat_i \quad (5)$$

No dia j , a quantidade de água disponível na camada de solo $i+1$ (mm), é calculada como seguinte: eq. (6)

$$Asw_{i+1(j)} = Asw_{i+1(j-1)} + D_{i(j)} - E_{i+1(j)} - (R_{i+1} \times T_{(j)}) \quad (6)$$

Se a quantidade de água for superior a quantidade correspondente à capacidade do campo da camada $i+1$, uma drenagem pode ser calculada: eq. (7)

$$D_{i+1(j)} = Asw_{i+1(j)} - sat_{(i+1)} \quad (7)$$

2.1.5.4.3.2 Drenagem acima da capacidade do campo

A drenagem na base da última camada representa a drenagem total do perfil considerado. No modelo CERES, a drenagem na base de cada camada, representada pela água em excesso da capacidade de campo, é reduzida por o coeficiente constante $swcon$. Este coeficiente, sem unidade, varia entre 0 e 1 e representa a quantidade de água que percola, e corresponde a camada a menor permeável (GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995).

Os movimentos da água, no balanço hídrico do modelo MOSICAS, são determinados a partir do método desenvolvido no modelo CERES, adaptado por Gabrielle; Menasseri e Houot (1995). Estes autores utilizam a lei de Darcy que permite levar em consideração as variações das características do solo nas diferentes camadas. A introdução da noção de condutividade hidráulica $K(\theta)$ (cm d^{-1}) permite melhorar a avaliação das perdas de água por drenagem, representando o movimento da água no solo em função das características do solo.

A quantidade de água em excesso da capacidade do campo D (mm) na base de uma camada, drena em função da condutividade hidráulica $K(\theta)$ (mm. d^{-1}) e não mais de uma vez só, por dia, como é representado no método “tipping bucket”: eq. (8)

$$D = K(\theta) = K_s e^{A(\theta - \text{Sat})} \quad (\Delta t = 1 \text{ dia}) \quad (8)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica saturada (mm. d^{-1}) (CAMPBELL; CAMPBELL, 1982; DRIESSEN, 1986 apud GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995), A é um parâmetro sem dimensão que depende da textura do solo (DAVIDSON et al., 1969 apud GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995), Sat é o teor em água a saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (DRIESSEN, 1986 apud GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995) e θ é a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Neste caso, $swcon$ é substituído por A , $K(\theta)$ e γ e a ascensão capilar é calculada diariamente: eq. (9)

$$Cf_{i \rightarrow i-1} = K \left(\frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \right) \frac{h(\theta_{i-1}) - h(\theta_i) - \Delta z}{\Delta z} \quad (9)$$

onde h (cm) representa a pressão mátrica: eq. (10)

$$h(\theta) = e^{\sqrt{\ln(\text{Sat}/\theta) / \gamma}} \quad (10)$$

onde γ é um parâmetro sem dimensão que depende da textura do solo (DRIESSEN, 1986 apud GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995).

2.1.5.4.3 Ascensão capilar

Igualmente, os movimentos ascendentes da água no solo conduzindo ao novo equilíbrio dos potenciais hídricos, em função da umidade do solo, da espessura da camada de solo e da condutividade hidráulica do solo são determinados. Estes movimentos por capilaridade (ascensão capilar) Cf (cm) são calculados diariamente da camada i até a camada $i-1$, onde θ_i e θ_{i-1} são os teores de água nas camadas i e $i-1$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), e z_i e z_{i+1} são as espessuras (cm) (GABRIELLE; MENASSERI; HOUOT, 1995): eq. (11)

$$C_{f \rightarrow i-1} = \left[0,88.e^{17,7(\theta-llr)_{med}} \right] \frac{(\theta_i - \theta_{i-1}) + (llr_i - llr_{i-1})}{\Delta z} \quad (11)$$

onde $(\theta-llr)_{med}$ é a media, entre as duas camadas, do teor de água em excesso do llr , e $\Delta z = (z_i + z_{i-1})/2$.

2.1.5.4.3.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial (*ETP*) é a perda de água para atmosfera na forma de vapor de uma cultura em desenvolvimento ativo (grama < 10cm de altura), em condições hídricas não limitantes ou de um tanque Classe A. A evapotranspiração real (*ETR*) é a perda efetiva de água de uma cultura qualquer, nas condições atuais de água em qualquer estágio de desenvolvimento da planta. *Et* ou evapotranspiração máxima é a perda de água de uma cultura qualquer em desenvolvimento ativo, nas condições hídricas não limitantes. Na maior parte dos modelos o cálculo da evapotranspiração é feito com a equação de Penman (1948 apud PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997), que modela a evaporação de uma superfície livre de água. Esta equação é mais utilizada para calcular a evapotranspiração potencial, isto é, no caso de uma cultura que transpira sem estresse hídrico, livremente. A evapotranspiração real representa a limitação da evapotranspiração potencial, simulada por outros modelos. A transpiração da cultura e a evaporação do solo podem diminuir, abaixo da taxa potencial, em diferentes períodos de estresse (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

O modelo MOSICAS utiliza o método de Ritchie (1972) que separa a evaporação do solo, ou seja, as perdas em água devidas à demanda climática com a evaporação direta da água da camada superior do solo, da transpiração da planta. A evaporação do solo é determinada com o método de Ritchie (1972) a partir das propriedades físicas do solo (umidade, textura), da evaporação potencial do solo que depende da evapotranspiração potencial calculada pela equação combinada de Penman-Monteith (MONTEITH; UNSWORTH, 1990) e das características de crescimento das plantas, especificamente o índice de área foliar (*lai*). A evaporação *E* é distribuída entre as diferentes camadas do solo seguindo um coeficiente de extinção que depende do teor hídrico, da espessura e da profundidade de cada camada. No cálculo da evaporação da água do solo, este método considera as fases de evaporação da água das camadas do perfil e da superfície de solo. A *fase I* ou a fase de evaporação da água à taxa constante é controlada pela

energia que atinge a superfície, representando aproximadamente 90% da taxa potencial. A duração dessa fase é influenciada pela taxa de evaporação, isto é, pela demanda atmosférica, pela profundidade do solo e por suas propriedades hidráulicas, ou seja, sua capacidade de suprir a superfície com água. A interface entre a *fase 1* e a transição para a *fase 2* depende do parâmetro U ; a etapa 1 continua até atingir o limite superior deste coeficiente de evaporação que varia com a textura do solo (6 mm em areia, 9 mm em solo argiloso e 12 mm em solo barrento-argiloso) representando a lâmina da água evaporada acumulada até o final da *fase 1*. Durante a *fase 2* ou fase de recessão, a superfície seca e a evaporação ocorre no interior do solo, restringida e controlada pelas condições meteorológicas e pelas características do solo, como a condutividade hidráulica. A evaporação torna-se uma função do tempo, decrescente a partir do início da etapa 2.

A transpiração é calculada em função da evapotranspiração potencial e do estágio de desenvolvimento da cultura. A transpiração T e a evaporação são limitadas por diferentes processos e devem ser calculadas separadas (TANNER; JURY, 1976). A transpiração depende do estresse hídrico da planta, isto é da extração da água pelas raízes nas camadas mais ou menos profundas, do potencial de água no solo, e do controle de abertura ou fechamento dos estômatos. A transpiração total representa uma perda de água sobre o perfil do solo. No modelo MOSICAS, a transpiração total depende do lai e atinge o valor da transpiração potencial para um valor do lai determinado pelo usuário do modelo. O cálculo da perda de água devida à transpiração, para uma camada de solo determinada, é o produto da transpiração total pela porcentagem de raízes presentes na camada.

A evapotranspiração real total é calculada com a soma da evaporação do solo desnudo E e da evaporação da cultura T em função das porcentagens de cobertura do solo e da cultura, isto é do estágio de desenvolvimento.

2.1.5.4.3.5 Distribuição radicular

A determinação da densidade e profundidade radicular em função da velocidade de alongação das raízes no solo em profundidade, da temperatura e da umidade do solo é importante como variável de entrada no modelo. O conhecimento da distribuição das raízes em termo de comprimento radicular, nas diferentes camadas de solo, permite distribuir a transpiração total entre cada camada e assim definir a fração da transpiração relativa a cada camada, em função da

sua densidade radicular. Segundo Maertens (1970) a absorção é realizada sobre o comprimento total das raízes e preferencialmente perto da base da parte aérea de algumas gramíneas.

A distribuição radicular pode ser modelada ou avaliada com amostragens radiculares para cada camada de solo estudada, sobre uma superfície representativa da área plantada. Vasconcelos (2002) mostra que amostragens em perfil são mais adequadas que com o trado (com apenas duas subamostras e uma posição) que superestima a quantidade de raízes. O método do trado apresenta a vantagem de ser menos destrutivo e de avaliar a massa radicular. Ele pode ser representativo da distribuição radicular com um número suficiente de amostragens realizadas a diversas distâncias da fileira do plantio. Assim, com um número adequado de amostras, o método do trado será usado neste experimento.

2.1.5.4.3.6 Coeficientes de estresse hídrico

Finalmente, o balanço hídrico permite determinar a lâmina de água disponível ou útil para a cultura asw (mm), ou CAD, e por conseqüência o nível de estresse hídrico. Nos modelos de crescimento, a determinação do coeficientes de estresse a partir do balanço hídrico é importante para conhecer a ação do déficit ou do excesso de água sobre o crescimento e por conseqüência sobre a produção.

O estresse hídrico, na maioria dos modelos, reduz a velocidade da expansão da área foliar, e a eficiência de utilização da radiação RUE via dois fatores de estresse hídrico do solo que variam entre 0 (estresse máxima) e 1 (sem estresse) (KEATING et al., 1999). O fator $swdf1$ no modelo MOSICAS reduz a RUE , isto é a fotossíntese líquida, e a transpiração. Este fator é menos sensível ao déficit hídrico. O fator $swdf2$ no modelo MOSICAS é mais sensível ao estresse hídrico e reduz a velocidade dos processos de expansão celular, isto é a expansão da área foliar por dia.

Os dois coeficientes de estresse hídrico são calculados em função da capacidade de água disponível no solo e da transpiração.

Para Martiné (2003):

- se $swdef > (1,5 * sh)$, então $swdf2 = 1$, senão: eq. (12)

$$swdf2 = swdef / (1,5 * sh) \quad (12)$$

- se $swdef > sh$, então $swdf1=1$, senão: eq. (13)

$$swdf1 = swdef/sh \quad (13)$$

onde: eq. (14) e eq. (15)

$$swdef = A_{sw}/CAD \quad (14)$$

$$sh = 0,94 - 0,26 * psicr/ETP \text{ (SLABBERS, 1980)} \quad (15)$$

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área experimental

A experimentação foi conduzida em área do Centro de Tecnologia Canavieira-CTC localizado perto da cidade de Piracicaba (SP), sendo a altitude de 566 metros, a latitude de 22° 42' Sul e a longitude de 47° 33' Oeste.

O clima da região é tropical e, segundo Köppen, mesotérmico com inverno seco (Cwa) transição para mesotérmico com inverno úmido (Cfa). Observam-se um período seco e frio entre abril e setembro e um período úmido e quente entre outubro e março. As precipitações médias anuais são de 1288 mm com um máximo de 222 mm no mês de janeiro e um mínimo de 26 mm no mês de julho. As temperaturas médias variam entre 24,6°C (no mês de fevereiro) e 17,4°C (no mês de julho). Os dados diários do clima foram medidos pela estação meteorológica automática do CTC e correspondem ao intervalo das 7 horas da manhã do dia anterior até as 7 horas da manhã do dia em questão.

A área é de topografia relativamente plana, com média de 3 % de declividade e, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 1999), o solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, distrófico, bem drenado, conforme a descrição visual (Quadro 1) e atributos químicos com alguns macro e micronutrientes além de granulométricos apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4 respectivamente. A amostragem do solo foi realizada com uma repetição na trincheira para caracterizar os diferentes horizontes de solo e com três repetições, aleatoriamente na área estudada, para análise de terra das camadas 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm de profundidade.

Ap	0-9 cm; cinzento escuro; textura média; grumosa moderada pequena; granular fraca pequena e grãos simples de quartzo; terra solta, poros pequenos e médios abundantes; solto a muito friável, plástico e ligeiramente pegajoso a pegajoso; transição difusa e ondulada. Muitas raízes.
A2	9-22 cm; bruno amarelado claro; textura média; alguns grumos, blocos subangulares e angulares, pequenos a médios, fracos; friável, pouco plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e difusa. Quantidade moderada de raízes.
A/B	22-37 cm; bruno amarelado; textura média; blocos subangulares, grande a médios, fraco; friável, pouco plástico e ligeiramente pegajoso. Porção em que existe aspecto e feições de macro estruturação.
Bw1	37-49 cm; bruno amarelado; textura média; estrutura maciça porosa que se desfaz em blocos subangulares, grande a médios, fraco; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.
Bw2	49-79+ cm; bruno amarelado; textura média; estrutura maciça porosa mais evidente característico, blocos subangulares, médios a grandes, moderado a fraco; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.
Bw3	79-113 cm; bruno amarelado; textura média; estrutura maciça porosa que se desfaz em blocos subangulares, médios a grandes, moderado a fraco; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. Raízes longas, abundantes.
Bw4	113-145 cm; bruno amarelado; textura média; estrutura maciça porosa que se desfaz em blocos subangulares, grandes, moderado a fraco; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. Raízes longas, abundantes.
Bw5	145-177 cm; bruno amarelado; textura média; estrutura maciça porosa que se desfaz em blocos subangulares, grandes, moderado a fraco; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. Raízes longas, abundantes.

Quadro 1 - Descrição visual das diferentes camadas de Latossolo Vermelho Amarelo a partir de uma trincheira em área Experimental do CTC, Piracicaba

Tabela 2 - Média e desvio padrão (entre parênteses) dos atributos químicos do solo, a partir de três amostras, em quatro camadas e oito horizontes em Latossolo Vermelho Amarelo em área Experimental do CTC, Piracicaba

Profun- didade (cm)	Ph CaCl ₂	MO (g.kg ⁻¹)	P (mg.dm ⁻³)	K -----	Ca -----	Mg -----	Al (mmolc. dm ⁻³)	H -----	SB -----	T -----	V (%)	m (%)
0-20	4,0 (0,1)	13,7 (1,5)	20,0 (4,6)	2,4 (2,6)	2,7 (3,8)	1,7 (1,2)	18,0 (1,7)	62,3 (11,0)	6,7 (7,5)	87,1 (6,7)	8,0 (8,7)	20,3 (0,6)
20-40	4,1 (0,1)	10,3 (2,5)	39,7 (27,2)	0,9 (0,8)	4,0 (2,7)	2,3 (0,6)	13,0 (4,0)	61,3 (13,4)	7,2 (2,7)	81,5 (14,6)	9,7 (5,7)	15,7 (2,1)
40-60	4,1 (0,1)	6,3 (2,9)	20,7 (6,0)	0,2 (0,2)	4,3 (0,6)	2,0 (0,0)	12,3 (1,6)	45,0 (14,0)	6,6 (0,7)	76,4 (14,5)	10,3 (2,5)	20,0 (3,5)
60-100	4,5	4,0	1,0	0,0	7,0	2,0	4,0	25,0	9,0	38,0	24,0	11,0
A1	3,9	11,0	17,0	0,9	0,0	1,0	18,0	62,0	1,9	81,9	2,0	22,0
A2	3,8	11,0	17,0	0,9	0,0	1,0	19,0	74,0	1,9	94,9	2,0	20,0
A/B	4,0	7,0	27,0	0,1	3,0	2,0	12,0	49,0	5,1	66,1	8,0	18,0
Bw1	4,2	4,0	6,0	0,0	4,0	3,0	10,0	35,0	7,0	52,0	13,0	19,0
Bw2	4,2	3,0	1,0	0,0	3,0	3,0	11,0	34,0	6,0	51,0	12,0	22,0
Bw3	4,2	2,0	2,0	0,0	2,0	2,0	7,0	29,0	4,0	40,0	10,0	18,0
Bw4	4,6	1,0	5,0	0,0	2,0	1,0	2,0	24,0	3,0	29,0	10,0	7,0
Bw5	4,5	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	23,0	1,0	25,0	4,0	4,0

Tabela 3 - Média e desvio padrão (entre parênteses) da concentração de micronutrientes, a partir de três amostras, em quatro camadas de solo e oito horizontes em Latossolo Vermelho Amarelo em área Experimental do CTC, Piracicaba

Profundidade (cm)	S (mmolc.dm ⁻³)	B (mmolc.dm ⁻³)	Cu (mmolc.dm ⁻³)	Fe (mmolc.dm ⁻³)	Mn (mmolc.dm ⁻³)	Zn (mmolc.dm ⁻³)
0-20	66,3 (16,5)	0,2 (0,1)	0,4 (0,0)	36,0 (8,7)	6,3 (2,1)	0,3 (0,1)
20-40	69,7 (7,8)	0,2 (0,0)	1,3 (0,8)	41,3 (5,0)	5,3 (1,1)	0,5 (0,1)
40-60	97,7 (36,2)	0,1 (0,1)	0,9 (0,6)	37,0 (27,4)	5,7 (4,5)	0,3 (0,3)
60-100	169,0	0,1	0,0	3,0	0,0	0,0
A1	75,0	0,3	0,4	45,0	4,0	0,4
A2	144,0	0,1	0,6	45,0	6,0	0,4
A/B	101,0	0,1	0,4	32,0	14,0	0,4
Bw1	119,0	0,1	0,2	13,0	4,0	0,0
Bw2	175,0	0,1	0,0	6,0	1,0	0,0
Bw3	167,0	0,1	0,0	5,0	1,0	0,0
Bw4	183,0	0,1	0,0	4,0	1,0	0,0
Bw5	96,0	0,1	0,0	2,0	0,0	0,0

Tabela 4 - Média e desvio padrão (entre parênteses) a partir de três amostras dos atributos granulométricos em quatro camadas de solo e oito horizontes em Latossolo Vermelho Amarelo em área Experimental do CTC, Piracicaba

Profundidade (cm)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe de Textura
0-20	3,7 (0,6)	10,0 (1,7)	25,3 (2,1)	6,7 (4,6)	54,3 (2,3)	Argilosa
20-40	3,3 (1,2)	9,7 (1,5)	23,3 (1,5)	6,7 (2,3)	57,0 (0,0)	Argilosa
40-60	4,0 (1,0)	10,7 (1,5)	26,0 (1,7)	5,3 (2,3)	54,0 (5,2)	Argilosa
60-100	2,0	7,0	26,0	6,0	59,0	Argilosa
A1	3,0	12,0	32,0	4,0	49,0	Argilosa
A2	4,0	13,0	30,0	5,0	48,0	Argilosa
A/B	3,0	11,0	26,0	4,0	56,0	Argilosa
Bw1	3,0	9,0	23,0	4,0	61,0	Muito argilosa
Bw2	2,0	8,0	25,0	4,0	61,0	Muito argilosa
Bw3	2,0	7,0	26,0	4,0	61,0	Muito argilosa
Bw4	2,0	8,0	26,0	4,0	60,0	Muito argilosa
Bw5	2,0	7,0	22,0	10,0	59,0	Argilosa

2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Este trabalho integra-se num experimento global de calibração e avaliação do modelo MOSICAS, que alia o estudo da parte aérea da cana-de-açúcar e do módulo de crescimento do modelo e que será descrito por Carlos Suguitani, com o estudo do sistema radicular e o módulo de balanço hídrico do modelo e descrito na presente dissertação. Neste experimento global foram estudadas quatro variedades, mantidas em condições hídricas ótimas visando calibrar o modelo e em sequeiro para determinar os coeficientes de estresse hídrico e avaliar o efeito da falta de água no crescimento da cultura. A otimização das condições hídricas foi garantida pela irrigação por aspersão que complementou a adição de água por precipitação pluvial para manter a evapotranspiração potencial.

No presente estudo, o balanço hídrico do modelo MOSICAS, a umidade do solo e a densidade radicular, foram estudados em somente uma variedade. Foi escolhida a RB 72 454 por

ser uma das mais cultivadas nos estados de São Paulo e na região meridional brasileira e que tem boa estabilidade e ampla adaptabilidade. Apresenta perfilhamento médio, com colmos eretos, empalhados, de diâmetro médio e de cor verde clara com manchas de cera escurecidas. Os entrenós são médios, alinhados em leve ziguezague e as gemas são ovaladas, pequenas, com almofada estreita. O capitel é médio, com folhas dispostas em forma contorcida, de largura e comprimento médios. As novas espigadas, podem apresentar-se dobradas nas pontas, e as inferiores curvadas no terço inferior. Há uma só aurícula, lanceolada, de tamanho médio. A bainha é esverdeada, mas com áreas arroxeadas, com pouco joçal (ARIZONO, et al., 1999).

Nos blocos casualizados, três sob irrigação e dois em sequeiro, cada parcela é composta por dez fileiras de doze metros sendo, quatro fileiras centrais como locais de avaliação da parte aérea, quatro fileiras de amostragem destrutiva das raízes e duas fileiras externas como bordaduras. Três e quatro fileiras de 12 metros da variedade RB 72 454 foram escolhidas numa parcela irrigada e numa outra em sequeiro, respectivamente. As camadas do perfil do solo, onde o sistema radicular e a umidade do solo foram estudados, juntamente com as propriedades físico-químicas do solo, foram nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-100 cm. O modelo foi construído e por consequência calibrado até 100 cm de profundidade, mas um perfil radicular feito em trincheira aberta até a profundidade máxima com a presença de raízes no momento da colheita, poderia mostrar a necessidade de se trabalhar, no futuro, sobre um perfil mais profundo.

2.2.3 Plantio e tratos culturais

De acordo com a análise química do solo, uma calagem foi realizada na área, 45 dias antes do plantio, com cinco toneladas/ha de calcário para elevar o pH e a saturação das bases. Uma subsolagem e uma gradagem foram feitas antes do plantio. O experimento foi plantado no dia 29 de outubro de 2004 com o espaçamento entre fileiras de 1,4 metro e com a densidade de 15 gemas por metro linear. A adubação foi realizada durante o plantio. Tensiômetros de mercúrio foram instalados no dia 09 de novembro de 2004 para medir o potencial da água nas diferentes camadas de solo. A cultura foi mantida livre da competição com ervas daninhas durante todo o período de estudo através capinas. O corte final do experimento foi realizado no dia 26 de setembro de 2005.

2.2.4 Condições meteorológicas

Os dados medidos diariamente foram: o dia Juliano, a temperatura máxima (°C), a hora da temperatura máxima, a temperatura mínima (°C), a hora da temperatura mínima, a temperatura média (°C), a radiação global e líquida (MJ m^{-2}), o F. calor (kJ m^{-2}), a precipitação pluviométrica (mm), a umidade relativa (%), a velocidade máxima e média do vento (m s^{-1}), o sentido do vento, a temperatura do solo a 5, 25 e 50 cm (°C). A evapotranspiração potencial foi calculada com a equação de Penman-Monteith (mm/dia) a partir da temperatura do ar, da umidade relativa, da velocidade do vento e da radiação líquida.

A lâmina semanal aplicada por irrigação, para manter a umidade do solo na capacidade de campo até um metro de profundidade, foi determinada a partir do método Thornthwaithe e Mather (1955) descrito pelos autores Pereira; Villa Nova e Sedyama (1997). Foi atribuído para a CAD um valor de 100 mm, em função dos dados médios medidos pelo CTC e das curvas de retenção obtidas *in situ*. Os valores do coeficiente da cultura (K_c) para cada fase da cana planta de ano, utilizadas no CTC e no cálculo do balanço hídrico, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Variações do K_c para cana planta de ano

Idade (meses)	Duração (dias)	K_c
0 – 2	60	0,40
2 – 3	30	0,75
3 – 3,5	15	0,95
3,5 – 5	45	1,10
5 – 10	150	1,25
10 – 11	30	0,95
11 - corte	---	0,70

2.2.5 Atributos do solo

Antes do plantio da aérea experimental foi feita uma trincheira até 2 metros de profundidade para delinear as camadas estudadas e amostrar terra para determinar a densidade do

solo, a condutividade hidráulica e estabelecer a curva de retenção. Varias amostragens foram também feitas aleatoriamente, na superfície, na mesma área para a análise química do solo.

O perfil estudado foi dividido em função da análise física e visual do solo em quatro camadas: 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-100 cm, o total representando a profundidade efetiva da exploração radicular.

A caracterização do solo foi feita, para cada camada, a partir da granulometria, da densidade do solo, da curva de retenção e da condutividade hidráulica na saturação, para cada camada. A granulometria foi determinada pelo método da pipeta no laboratório. A massa específica do solo (kg.m^{-3}) foi calculada a partir do peso seco de amostras de terra realizadas com cilindros volumétricos com 4 cm de diâmetro e 3 cm de altura e secas por 72 horas na estufa a 105°C . A amostragem foi realizada na parte alta, média e baixa de cada camada de solo a partir da trincheira. As densidades aparentes das camadas do solo são apresentadas na Tabela 6. As curvas de retenção, que representam a relação entre o potencial da água e a umidade do solo, foram também construídas a partir dos dados do campo. As medidas de umidade do solo foram realizadas após 72 horas de secagem a 105°C com amostras indeformadas de terra e o potencial foi determinado a partir das leituras dos tensiômetros. As umidades com base de peso U (%) foram dadas por: eq. (16)

$$U = ((p_u - p_s) / p_s) \times 100 \quad (16)$$

onde p_u e p_s são respectivamente o peso úmido e seco da amostra de terra. O potencial matricial $h(\theta)$ (cm) foi dado por: eq. (17)

$$h(\theta) = -12,6 h_m + h_c + z_c \quad (17)$$

onde h_m é a leitura da coluna de mercúrio (cm Hg); h_c , a altura do nível de mercúrio na cuba a superfície do solo (cm H_2O), e z_c , a profundidade da cápsula (cm H_2O). Os cilindros de terra foram retirados nas duas áreas de amostragem de raízes (irrigada e em sequeiro), durante todo o período do ciclo da cultura, entre dois a seis metros dos tensiômetros e a mesma distância da touceira que os aparelhos a mercúrio (12, 35 e 70 cm), com três repetições. A condutividade hidráulica a saturação ($K_s(\theta)$, mm.dia^{-1}) foi determinada no laboratório.

Tabela 6 - Média e desvio padrão (entre parênteses) das densidades aparentes das camadas de solo a partir de três amostras

Profundidade (cm)	Densidade aparente (g.cm ³)
0-20	1,37 (0,08)
20-40	1,35 (0,09)
40-60	1,15 (0,09)
60-100	1,13 (0,05)

Quatro baterias de tensiômetros a mercúrio foram instaladas as profundidades 10, 30, 50 e 80 cm nas fileiras de amostragem das raízes. Uma bateria foi posicionada na aérea irrigada na entrelinha a 35 cm da fileira de plantio para controlar a eficiência da irrigação e três baterias foram colocadas na aérea em sequeiro a 12, 35 e 70 cm da touceira. Estes tensiômetros indicaram o potencial total da água no solo. As variações de umidade do solo foram calculadas a partir das curvas de retenção. Foi acrescentado um tensiômetro a 1,5 m de profundidade na parte não irrigada para detectar a presença eventual de raízes profundas, a amostragem de raízes sendo realizada apenas até um metro de profundidade. As leituras foram realizadas aproximadamente a cada dois dias.

2.2.6 Distribuição e crescimento radicular

A amostragem das raízes da variedade RB 72 454 foi efetuada na área irrigada e não irrigada para determinar o crescimento da massa seca das raízes (g.m⁻²), a densidade radicular (mg.cm⁻³ de solo e cm.cm⁻³ de solo) e a profundidade máxima atingida pelas raízes.

A distribuição das raízes e o crescimento radicular foram avaliados neste estudo para definir a distribuição da transpiração nas diferentes camadas no solo e para determinar a fração de matéria seca alocada nas raízes. O modelo MOSICAS foi originalmente calibrado para cana-soca, considerando a alocação da biomassa total seca nas raízes constante em 10%; e que após o primeiro corte, o sistema radicular da cana-planta é progressivamente substituído pelo sistema radicular da cana-soca. No caso de uma cana-planta, aqui estudada, o sistema radicular inicial é inexistente e o crescimento e a distribuição deste sistema teriam que ser estudados nas condições de clima, de solo e de genética deste trabalho.

Oito meses antes do plantio, uma amostragem dos antigos sistemas radiculares foi realizada na área estudada para verificar a ausência de raízes vivas antes do início do projeto. Nove pontos de amostragens foram escolhidos aleatoriamente na área total. As raízes foram retiradas juntas com terra com uma sonda de 5,5 cm de diâmetro interno, desenvolvida pelo Departamento Florestal da ESALQ, que pode coletar amostras indeformadas até 1 m de profundidade, sem abrir trincheiras no solo. Este método do trado apresentou a vantagem de avaliar a massa e o comprimento radicular e não apenas a distribuição das raízes no solo como no método do perfil. Segundo Chopart e Marion (1994), uma amostra representativa da área estudada deve representar 0,06% da área total. Estes autores estimaram a $0,63 \text{ m}^3$ por hectare o volume de solo amostrado necessário para caracterizar a biomassa radicular total e a profundidade de enraizamento. As raízes foram separadas da terra por meio de lavagem com jato d'água em peneira de malha de 2 mm, distinguindo, por diferença de densidade e de aspecto morfológico, as raízes mortas e vivas. Em seguida, procederam-se a secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70°C , por três dias e a pesagem em balança de precisão. A partir de 24 raízes de tamanho diferente, foi verificado que a secagem não alterou o comprimento delas. Apenas raízes mortas foram observadas, pretas no exterior como no interior. A Tabela 7 apresenta a massa radicular encontrada em cada camada antes do plantio.

Tabela 7 - Média e desvio padrão (entre parênteses) da massa seca de raízes mortas de quatro camadas de solo, a partir de nove amostragens, oito meses antes do plantio

Profundidade (cm)	Massa seca de raízes mortas (mg.cm^{-3})
0-20	0,27 (0,16)
20-40	0,21 (0,12)
40-60	0,17 (0,13)
60-100	0,10 (0,03)

Aos 34, 49, 125, 179, 242 e 322 dias após o plantio (DAP) foram coletadas novas amostras indeformadas de solo contendo raízes, com a sonda de 5,5 cm de diâmetro interno, até 1 m de profundidade. Esse método, realizado com cultura instalada, permite a amostragem de raízes sem a abertura de trincheira, que podia alterar as medidas da parte aérea da cultura, realizadas nas fileiras perto da aérea de amostragem radicular. Os demais procedimentos seguiram mesma

metodologia descrita para a amostragem realizada antes do plantio. Foram retiradas nove amostras de solo para a variedade RB 72 454, para cada camada e cada área (irrigada e em sequeiro), sendo três repetições a 12 cm, três a 35 cm e três a 70 cm da touceira, num eixo perpendicular à fileira de plantio. Assim de acordo com o balanço hídrico do modelo MOSICAS e as camadas estudadas, as amostragens foram realizadas até um metro de profundidade. Sempre foi respeitado no mínimo um metro de distância entre cada posição de amostragem, escolhida aleatoriamente a cada data de coleta. Os pontos de amostragem a 12 cm, 35 cm e 70 cm da touceira foram calculados para representar, com uma mesma ponderação, todas as distâncias das touceiras (0-23 cm, 23-46 cm e 46-70 cm). Para simplificar o estudo do sistema radicular da cultura, a amostragem das raízes admitiu a simetria da distribuição das raízes em relação à fileira de plantio. Sendo responsáveis da absorção hídrica, apenas as raízes vivas foram submetidas aos mesmos tratamentos previamente descritos, ou seja, lavagem e secagem. Para melhor distinguir as raízes mortas das vivas, as raízes pretas, geralmente consideradas como mortas, foram cortadas para observar a parte central. Quando esta parte fosse branca, a raiz era considerada como viva, mostrando ainda a existência de uma atividade radicular. Quando esta parte fosse preta, a raiz era considerada como morta. A massa seca radicular foi obtida em pesagem com balança de precisão, e calculada a fração de raízes presentes por camada de solo, em mg.cm^{-3} de solo, e sua distribuição por área do terreno, em g.m^{-2} . Em seguida, as raízes secas foram distribuídas em placas de vidro e submetidas à digitalização em scanner. O comprimento total, em m.m^{-2} foi quantificado através do programa SIARCS 3.0 desenvolvido pela EMBRAPA.

Aos 332 DAP (dia do corte), foi feita uma trincheira em cada tratamento para observar a distribuição e a profundidade máxima das raízes. Para cada sistema hídrico, as raízes foram contadas por quadricula (5cm x 5cm) a partir de quatro perfis. Estes perfis de 70 cm de comprimento foram posicionados perpendicularmente a fileira de plantio, localizando-se então da fileira até a metade da entrelinha, e separados entre si por dois metros de distância.

2.2.7 Análise estatística

A cada idade, as densidades de raízes (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo e em cm de raízes. cm^{-3} de solo) entre os dois sistemas hídricos foram comparadas por ANOVA (programa

Systat). A influência da profundidade e da distância foi estudada separadamente a partir de análise de variância ($P < 0,05$).

As correlações foram determinadas a partir do programa SAS ($P < 0,05$).

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Condições meteorológicas

Os dados de temperatura média, precipitação pluvial, precipitação por irrigações e balanço hídrico climatológico, referentes aos períodos de novembro 2004 até abril 2005 e de abril 2005 até setembro 2005 estão representados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

O ciclo da cana planta iniciou-se sem deficiência hídrica nos dois tratamentos. A primeira irrigação por aspersão foi realizada 109 DAP para atingir a capacidade de campo na área irrigada. Nesta área, as irrigações sucessivas permitiram manter o armazenamento em água do solo acima de 80% da CAD praticamente durante o ciclo inteiro. A partir de 165 DAP, observou-se pelas leituras dos tensiômetros, uma diminuição da eficiência do fornecimento hídrico. Devido às características do solo argiloso da área e as quantidades importantes de água fornecidas por aspersão para suprir a demanda hídrica da cultura, ocorreram perdas superficiais em água por escoamento com a formação de uma camada de solo mais compactada. Esta observação conduziu a aumentar a frequência de irrigação e diminuir as lâminas aplicadas permitindo assim molhar o solo em profundidade até o final do ciclo. A última irrigação foi realizada 320 DAP e então paralisada para favorecer o acúmulo de açúcar nos colmos.

Figura 6 – Temperatura média (°C), precipitações pluvial e de irrigações (mm) e armazenamento hídrico do solo até 1 metro de profundidade na área irrigada (% CAD) do primeiro até 166 DAP

Figura 7 – Temperatura média (°C), precipitações pluvial e de irrigações (mm) e armazenamento hídrico do solo até 1 metro de profundidade na área irrigada (% CAD) de 166 até 332 DAP

2.3.2 Caracterização da água no solo

2.3.2.1 Curvas de retenção

A umidade das diferentes camadas de solo foi calculada a partir do potencial hídrico do solo medido pelos tensiômetros e da curva de retenção elaborada. *In situ*, e para cada camada de solo, as curvas de retenção foram elaboradas a partir das umidades medidas de três repetições com base de volume do solo e das leituras dos tensiômetros. Estes aparelhos permitiram medir o potencial da água no solo até apenas aproximadamente 1000 cm H₂O. Acima deste valor ocorreu o rompimento da coluna de mercúrio. Os pontos obtidos *in situ* foram submetidos ao modelo Soil Water Retention Curve, versão 2.00, desenvolvido na ESALQ pelos autores Dourado-Neto et al. (2000) para definir as equações das curvas de retenção com o modelo de Van Genuchten (1980) que permite estabelecer uma relação entre o potencial mátrico da água e a umidade no solo. As Figuras 8, 9, 10 e 11 mostram as curvas de retenção para as camadas 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-100 cm respectivamente.

Figura 8 – Curva de retenção da camada 0-20 cm obtida *in situ*

Figura 9 – Curva de retenção da camada 20-40 cm obtida *in situ*

Figura 10 – Curva de retenção da camada 40-60 cm obtida *in situ*.

Figura 11 – Curva de retenção da camada 60-100 cm obtida *in situ*

A umidade a 300 cm H₂O é geralmente considerada como a umidade representativa da capacidade de campo. Entretanto, segundo Colman (1947), Haise; Haase e Jensen (1955), Jamison e Kroth (1958), Reichardt (1978) e Salter e Williams (1965), esta umidade subestima a capacidade de água disponível. Haise; Haase e Jensen (1955) e Maclean e Yager (1972) mostraram que a umidade a 100 cm H₂O caracterizou melhor a capacidade de campo para um solo argiloso. Por conseqüência, para não subestimar a reserva hídrica útil para as plantas, a umidade a 100 cm H₂O foi adotada neste trabalho como sendo a umidade a capacidade de campo.

As curvas de retenção obtidas *in situ* caracterizaram o solo presente neste estudo. A capacidade do campo, as curvas apresentaram uma drenagem lenta, caracterizando os solos a caráter argiloso. Estes solos mostram geralmente uma proporção maior de microporos que os solos arenosos, impedindo assim uma drenagem rápida (VILAIN, 1997). Também, a umidade de um solo argiloso no PMP (15 000 cm H₂O) mostra valores próximos de 19% (REICHARDT, 1987; VILAN, 1997) como se pode observar nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

As curvas de retenção permitiram a determinação dos níveis característicos da água nas diferentes camadas. A CAD (mm) na camada *i*, de espessura *z* (m) foi calculada a partir das umidades com base de volume a 100 cm H₂O (*dulr_(i)* em %) e a 15 000 cm H₂O (*llr_(i)* em %) com a equação: eq. (18)

$$CAD_{(i)} = (dulr_{(i)} - llr_{(i)}) \times z \times 10 \quad (18)$$

Assim, a CAD totalizou 108 mm sobre um metro de profundidade: 25 mm para a camada 0-20 cm, 17 mm para a camada 20-40 cm, 19 mm para a camada 40-60 cm e 47 mm para a camada 60-100 cm.

A Tabela 8 apresenta para cada camada de solo estudada neste trabalho a umidade a saturação (*sat*), a capacidade de campo (*dulr*) e o PMP (*llr*) que foram utilizadas na calibração do modelo MOSICAS.

Tabela 8 - Umidade (cm^3 água / cm^3 solo) a saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente (PMP) até um metro de profundidade

Profundidade (cm)	Saturação	Capacidade de campo	PMP
0-20	0,39	0,26	0,14
20-40	0,39	0,27	0,19
40-60	0,40	0,27	0,18
60-100	0,54	0,26	0,14

2.3.2.2 Umidade no solo

Os valores da umidade no solo para cada camada encontram-se nas Figuras 12 e 13 para a área irrigada e nas Figuras 14 e 15 para a área não irrigada. Observaram-se as maiores variações da umidade nas camadas superficiais que secaram ou se umedeceram mais rapidamente que as camadas mais profundas.

Na área irrigada, o fornecimento hídrico por aspersão permitiu manter uma umidade do solo favorável para a cultura (perto da capacidade do campo), exceto para a camada 0-20 cm que secou mais rapidamente entre duas irrigações. Dois dias após a primeira irrigação realizada no dia 15 de fevereiro de 2005 (109 DAP) a Figura 12 mostra um aumento da umidade no solo para cada camada. 127 DAP a cana foi cortada acidentalmente ao lado dos tensiômetros o que podia afetar bastante as leituras. 137 DAP, os tensiômetros foram trocados de lugar, nas mesmas fileiras de amostragem de raízes, a dez metros da área cortada. Entre 166 e 182 DAP, observou-se de novo uma diminuição da umidade no solo até 80 cm devido às perdas por escoamento superficial durante as irrigações. Uma lâmina de 40 mm aplicada 166 DAP permitiu molhar apenas até 20 cm de profundidade. Comparada com a chuva do dia 157 após o plantio que molhou o solo até 80

cm de profundidade, a ineficiência da irrigação foi detectada. Esta observação induziu a modificação na frequência e nas quantidades de água aplicadas, que passaram a ser com lâminas menores e mais frequentemente. A partir de 182 DAP, observou-se o aumento da umidade no solo até 80 cm de profundidade.

Figura 12 – Umidade do solo até 80 cm de profundidade de 13 até 166 DAP, na área irrigada

Figura 13 – Umidade do solo até 80 cm de profundidade de 166 DAP até o corte, na área irrigada

Figura 14 – Media da umidade do solo até 150 cm de profundidade de 13 até 166 DAP, na área não irrigada (n=3)

Figura 15 – Media da umidade do solo até 150 cm de profundidade de 166 DAP até o corte, na área não irrigada (n=3)

Para a determinação da umidade do solo a 150 cm de profundidade, as curvas de retenção estabelecidas para a camada 60-100 cm foram utilizadas. Não foram observadas diferenças importantes de densidade, textura e composição química entre estas duas profundidades, justificando o uso da mesma curva de retenção. A umidade do solo na área não irrigada foi inferior a umidade na área irrigada sobre um metro de profundidade entre aproximadamente 110 e 140 DAP, entre 160 e 250 DAP e entre 270 e 332 DAP. Entretanto o déficit hídrico não foi superior a 50% da CAD entre 30 e 150 cm de profundidade na cultura em sequeiro. A partir de 100 DAP, observou-se a diminuição constante da umidade do solo a 1,5 metros. Esta diminuição correspondeu com o início dos períodos de seca e também com o crescimento radicular que atingiu 1 metro de profundidade aproximadamente 140 DAP (Figura 18). Durante períodos de deficiência hídrica, a cana pode emitir raízes profundas até seis metros de profundidade (CASAGRANDE, 1991; EVANS, 1935 apud DILLEWIJN, 1952).

As chuvas sucessivas não permitiram manter um nível suficiente da umidade no solo para atender a demanda da cultura, prejudicando o desenvolvimento vegetal, o que era visível ao observar a pequena altura e o aspecto geral das plantas na área em sequeiro, comparadas com aquelas da área irrigada. Entretanto, dados sobre a parte aérea das plantas são necessários para confirmar esta tendência. As Figuras 16 e 17 apresentam o aspecto visual das duas culturas, irrigada e em sequeiro, respectivamente, 185 DAP.

Figura 16 – Aspecto visual da cultura irrigada, 185 DAP, a seta representando uma altura de 2 m

Figura 17 – Aspecto visual da cultura em sequeiro, 185 DAP, a seta representando uma altura de 2 m

2.3.3 Crescimento e distribuição radicular

2.3.3.1 Profundidade e distribuição radicular

A Figura 18 apresenta a dinâmica de enraizamento da cultura irrigada e em sequeiro com as profundidades máximas das raízes encontradas durante as amostragens aos 34, 49, 125 e 179 DAP e durante a contagem dos impactos radiculares realizada aos 332 DAP. Uma vez o sistema radicular tendo atingido um metro de profundidade, as amostragens seguintes com a sonda não permitiram observar as raízes mais profundas. A velocidade de alongação das raízes no solo em profundidade foi de $0,72 \text{ cm.dia}^{-1}$ na cultura irrigada e de $0,80 \text{ cm.dia}^{-1}$ na cultura em sequeiro, a relação entre a profundidade de enraizamento sendo linear com a idade da cultura, do plantio até 179 DAP. Este resultado verificou a mesma relação linear encontrada no trabalho de Chopart e Marion (1994), em Bouaké (Senegal). Estes autores mostraram uma velocidade média de alongação das raízes no solo em profundidade de $0,85 \text{ cm.dia}^{-1}$ numa cultura de cana irrigada entre 45 e 113 DAP. Dillewijn (1952) encontrou uma velocidade máxima de $0,30 \text{ cm.dia}^{-1}$ num solo argiloso. A diferença de velocidade de alongação das raízes no solo em profundidade entre os diferentes autores podia ser explicada pela diferença de temperatura (graus.dia^{-1}), de textura de solo e de variedade. Também, o método da escavação utilizado no trabalho de Chopart e Marion (1994) permitiu melhor observar as raízes profundas com remoção de um volume de solo importante.

A Figura 18 sugere uma velocidade de alongação das raízes no solo em profundidade superior na cultura não irrigada a partir de 125 DAP. A 12 cm da touceira, a profundidade máxima de enraizamento foi significativamente superior na área não irrigada, 125 DAP. Com uma primeira irrigação aplicada aos 109 DAP, as duas culturas acompanharam as mesmas condições de umidade do solo até esta data. No estudo de Smith, 1998 apud Smith; Inman-Bamber e Thorburn (2005), a velocidade de alongação das raízes foi também superior na cultura não irrigada, com $0,20 \text{ cm.dia}^{-1}$, comparada a velocidade de alongação radicular em profundidade na cultura irrigada, com $0,17 \text{ cm.dia}^{-1}$.

Figura 18 – Profundidade máxima de enraizamento em função da idade de uma cultura irrigada e não irrigada

Vários fatores podem afetar o crescimento radicular e a dinâmica de enraizamento como a carga genética (CAMARGO, 1976; DILLEWIJN, 1952; VASCONCELOS, 2002), a textura, a densidade, a fertilidade, a comunidade biótica e a umidade do solo (AGUIAR, 1978; CASAGRANDE, 1991; SOBRAL; GUIMARÃES, 1992; TROUSE; HUMBERT, 1961), o clima e o sistema de colheita (VASCONCELOS, 2002).

A umidade do solo afeta fortemente a distribuição do sistema radicular, desenvolvendo raízes superficiais em condições de alta umidade e raízes profundas em condições de estresse hídrico. As camadas secas de solo formam um obstáculo mecânico ao crescimento radicular. As raízes, encontrando menor resistência, crescem mais profundamente (MAERTENS, 1964). Além de um processo mecânico, existe também um processo hormonal no desenvolvimento das raízes em condição de falta de água. No início de um período de seca, o crescimento radicular é estimulado pela parte aérea, com transporte de hormônios (auxinas, citocininas) e fotoassimilados nas raízes. Por consequência, uma cana plantada durante o período de estiagem será mais resistente à seca que uma cana plantada durante a estação das chuvas (CASAGRANDE, 1991). Baixa umidade igualmente estimula o desenvolvimento dos pêlos absorventes que pode ser 3 a 4 vezes maior nos solos secos que nos solos úmidos (DILLEWIJN, 1952).

A Figura 19 apresenta a cartografia dos impactos radiculares nos dois tratamentos. A Figura 20 mostra a distribuição do número dos impactos radiculares em função da profundidade. O sistema radicular atingiu 4,25 m e 4,70 m de profundidade na área irrigada e em sequeiro,

respectivamente. A profundidade máxima das raízes foi significativamente superior na área não irrigada aos 332 DAP. Os períodos sucessivos de estresse hídrico moderado, estimularam o crescimento das raízes nas camadas profundas apesar de que não se encontrou grande diferença de profundidade das raízes entre os dois sistemas hídricos. Aproximativamente 50% dos impactos foram localizados abaixo de 1 m de profundidade nos dois tratamentos. Encontraram-se 51, 27, 14, 6 e 2 % dos impactos na área não irrigada e 55, 23,2, 15,3, 6,3 e 0,2 % na área irrigada nas camadas 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 e 4-5 m, respectivamente. A profundidade importante atingida pelas raízes das plantas irrigadas mostrou a influência do fator genético para a variedade RB 72 454 no crescimento radicular. Inforzato, 1959 apud Casagrande (1991) encontrou 22% da massa total radicular da variedade Co290 entre 110 e apenas 210 cm de profundidade confirmando a diferença de exploração radicular entre as variedades.

Figura 19 – Número médio de impactos radiculares por quadricula de 25 cm² em função da distância para a fileira de plantio (cm) e da profundidade (m) na área irrigada (A) e em sequeiro (B) (n=4)

Figura 20 – Número médio de impactos radiculares por quadricula de 25 cm² em função da profundidade (cm) na área irrigada e em sequeiro (n=4)

Baran; Bassereau e Gillet (1974) observaram também uma distribuição mais profunda das raízes de uma cultura de um ano de idade sob frequência de irrigação reduzida (intervalos de 21 dias contra intervalos de 7 e 14 dias). Igualmente o estudo de Van Antwerpen, 1998 apud Smith; Inman-Bamber e Thorburn (2005), comparou o sistema radicular de uma cultura de cana irrigada e outra em sequeiro e encontrou profundidades radiculares mais importantes na cultura em sequeiro.

Comparando os dois tratamentos, observou-se uma concentração de raízes maior na área não irrigada entre 0,40 e 2,5 m de profundidade (Figuras 19 e 20).

Estes resultados sobre a exploração das camadas profundas de solo mostraram a importância da correção em profundidade e da manutenção da fertilidade do solo e a conseqüente possibilidade de absorção dos elementos lixiviados nas camadas profundas.

2.3.3.2 Biomassa radicular

As figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 mostram a biomassa seca radicular (em mg de raízes vivas e secas. cm^{-3} de solo) nas áreas irrigadas e em sequeiro, 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP, respectivamente.

	23,33 cm	46,66 cm	70 cm
20 cm	0,114 0,093	0 0	0 0
40 cm	0 0	0 0	0 0
60 cm	0 0	0 0	0 0
100 cm	0 0	0 0	0 0

Figura 21 – Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 34 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho)

Figura 22 – Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 49 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho)

Figura 23 – Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 125 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho)

Figura 24 – Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 179 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho)

Figura 25 – Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 241 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e não irrigada (dados em vermelho)

	23,33 cm	46,66 cm	70 cm
20 cm	0,320 0,340	0,402 0,322	0,378 0,346
40 cm	0,228 0,168	0,282 0,185	0,324 0,249
60 cm	0,069 0,146	0,095 0,166	0,095 0,166
80 cm	0,028 0,139	0,022 0,144	0,019 0,158
100 cm			

Figura 26 – Biomassa radicular (em mg de raízes secas. cm^{-3} de solo) por camada até um metro de profundidade, 322 DAP, na aérea irrigada (dados em preto) e em sequeiro (dados em vermelho)

Sendo as variáveis “distância da touceira” e “profundidade” dependentes, as análises de variância das densidades foram realizadas separadamente. As variâncias foram comparadas entre tratamentos (irrigado e em sequeiro) e profundidades (0-20, 20-40, 40-60 e 60-100 cm) a partir das densidades médias das três distâncias (12, 35 e 70 cm da touceira). Da mesma forma, as variâncias foram comparadas entre tratamentos (irrigado e em sequeiro) e distâncias (12, 35 e 70 cm da touceira) a partir das densidades medias das cinco profundidades (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm). Sendo a distribuição das densidades normal, os dados não foram transformados. A Tabela 9 mostra as diferenças significativas de biomassa radicular ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$) ao nível de 5% de probabilidade entre as plantas irrigadas e não irrigadas aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP. As letras maiúsculas mostram as diferenças entre as profundidades ou as distâncias para o mesmo sistema hídrico e as letras minúsculas mostram as diferenças entre os sistemas hídricos para uma mesma profundidade de solo ou distância da touceira.

Aos 34 DAP, nos dois tratamentos, a Figura 21 mostra a presença de raízes vivas até apenas 20 cm de profundidade e 12 cm de distância da touceira, na entrelinha. Os dados referentes à análise de variância mostram não haver diferença estatística significativa na densidade radicular ao nível de 5% de probabilidade entre os dois sistemas hídricos (Tabela 9). Até 109 DAP, não houve irrigação e as duas culturas conheceram as mesmas condições hídricas,

com precipitações suficientes para o bom desenvolvimento da parte aérea e subterrânea das plantas. A Figura 27 mostra a gema branca intumescida e o desenvolvimento das raízes do tolete, responsáveis, neste estágio, da absorção hídrica e mineral.

Tabela 9 - Biomassa radicular em mg.cm^{-3} nas culturas irrigada e em sequeiro aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP.

Letras maiúsculas diferentes indicam as diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as profundidades ou as distâncias para o mesmo sistema hídrico e as letras minúsculas indicam as diferenças entre os sistemas hídricos para uma mesma profundidade de solo ou distância da touceira

Idade (DAP) / Sistema hídrico	Profundidade (cm)				Distância (cm)		
	0-20	20-40	40-60	60-100	12	35	70
34 DAP /							
Cultura irrigada	0,038Aa	0	0	0	0,023Aa	0	0
Cultura não irrigada	0,031Aa	0	0	0	0,019Aa	0	0
49 DAP /							
Cultura irrigada	0,044Aa	0,003Ba	0	0	0,026Aa	0,004Ba	0
Cultura não irrigada	0,038Aa	0,019Ba	0	0	0,034Aa	0Ba	0
125 DAP /							
Cultura irrigada	0,234Aa	0,122Ba	0,055Ca	0,001Da	0,099Aa	0,075Aa	0,074Aa
Cultura não irrigada	0,209Aa	0,154Ba	0,128Bb	0,006Ca	0,138Aa	0,119Aa	0,066Aa
179 DAP /							
Cultura irrigada	0,280Aa	0,183Ba	0,103Ca	0,039Da	0,134Aa	0,150Aa	0,109Aa
Cultura não irrigada	0,433Aa	0,225Ba	0,157Cb	0,098Db	0,208Aa	0,206Aa	0,193Aa
241 DAP /							
Cultura irrigada	0,352Aa	0,281Ba	0,058Ca	0,013Ca	0,131Aa	0,131Aa	0,168Aa
Cultura não irrigada	0,139Ab	0,123Ab	0,123Ab	0,127Ab	0,119Aa	0,136Aa	0,141Aa
322 DAP /							
Cultura irrigada	0,366Aa	0,278Ba	0,086Ca	0,023Da	0,135Aa	0,165Aa	0,167Aa
Cultura não irrigada	0,336Aa	0,201Ba	0,159Ba	0,147Bb	0,186Aa	0,192Aa	0,215Aa

Figura 27 – Desenvolvimento das raízes do tolete aos 34 DAP

Aos 49 DAP, a entrelinha foi ainda pouca explorada com raízes presentes até 35 cm da touceira na área irrigada e apenas até 12 cm na área em sequeiro. As culturas irrigadas e em sequeiro tendo acompanhado as mesmas condições hídricas, os dois sistemas radiculares não apresentam diferenças significativas (Tabela 9). Ao nível da fileira de plantio, as raízes exploraram as duas primeiras camadas nos dois tratamentos. O desenvolvimento das raízes dos perfilhos foi observado durante a segunda amostragem das raízes, 49 DAP (Figura 28). A Figura 29 mostra o início da degenerescência da ponta das raízes do tolete neste estágio. À medida que ocorre o desenvolvimento, as raízes de fixação perdem sua função e morrem e a planta passa a depender unicamente das raízes dos perfilhos a partir do terceiro mês (CÂMARA; OLIVEIRA, 1993). A morte progressiva das raízes de fixação e do tolete é explicada pela competição com as raízes dos perfilhos que suprem os colmos em água e nutrientes, diretamente, sem passar pelo tolete. Assim experiências sobre a brotação da cana, sem a presença das raízes dos perfilhos, mostraram que as raízes do tolete podem viver até sete meses ou mais com um bom desenvolvimento da parte aérea (DILLEWIJN, 1952). A vida das raízes dos perfilhos também é limitada. Cada novo perfilho emite novas raízes que podem substituir a função das raízes do perfilho de origem. Este rejuvenescimento, controlado pela periodicidade do perfilhamento, é importante porque ele permite à planta adaptar-se as variações das condições do ambiente.

Figura 28 – Raízes grossas dos perfilhos aos 49 DAP

Figura 29 – Início da degenerescência das raízes do tolete (pontas pretas) aos 49 DAP

As Figuras 28 e 29 mostram também as diferenças morfológicas dos dois tipos de raízes: as raízes finas do tolete e as raízes grossas dos perfilhos. As raízes de fixação do tolete, finas, fibrosas, superficiais e ramificadas, se desenvolvem durante aproximadamente trinta dias de brotação, até a aparição das raízes dos perfilhos primários, posteriormente dos secundários, e assim sucessivamente, mais grossas, brancas e profundas (DILLEWIJN, 1952). As raízes dos perfilhos apresentam uma coifa mais larga e resistente e uma estrutura menos fibrosa com um crescimento mais rápido, conferindo uma maior capacidade de penetração no solo. Este tipo de

raízes cresce seguindo as direções que apresentam de menor resistência, como canais formando pelos insetos, outras raízes ou raízes velhas.

Aos 125 DAP, a entrelinha foi inteiramente explorada pelas raízes nos dois sistemas hídricos exceto na ultima camada 60-100 cm, a 70 cm da touceira. As raízes colonizaram mais rapidamente o solo na direção horizontal que vertical. A partir de 125 DAP, a distância horizontal a touceira não teve efeito na densidade radicular; o solo sendo explorado simultaneamente pelas raízes das plantas das fileiras adjacentes. A partir dos perfis (Figura 19), foi observado uma distribuição horizontal homogênea das raízes. Observaram-se raízes na camada 60-100 cm apenas na área não irrigada, a 12 e 35 cm da touceira e na área irrigada a 35 cm da fileira de plantio. As densidades radiculares foram significativamente superiores na camada 0-20 cm nos dois tratamentos que nas camadas mais profundas (Tabela 9). A cultura não irrigada mostrou um sistema radicular significativamente mais desenvolvido na camada profunda 40-60 cm que a cultura irrigada. A camada 60-100 cm era ainda pouco explorada.

Aos 179, 241 e 322 DAP, a aérea amostrada foi inteiramente colonizada pelos dois sistemas radiculares. Aos 179 DAP, as densidades radiculares foram significativamente superiores na camada 0-20 cm nos dois tratamentos (Tabela 9). A cultura irrigada mostrou densidades radiculares semelhantes à cultura em sequeiro nas camadas superficiais (0-20 e 20-40 cm) e significativamente inferiores nas camadas profundas (40-60 e 60-100 cm). Aos 241 DAP, a cultura irrigada mostrou densidades radiculares superiores à cultura em sequeiro nas camadas superficiais (0-20 e 20-40 cm) e significativamente inferiores nas camadas profundas (40-60 e 60-100 cm). As raízes superficiais na cultura irrigada não encontraram a resistência mecânica que opõem os solos secos à penetração radicular. A distribuição da biomassa foi mais superficial na cultura irrigada e homogênea sobre um metro de profundidade na cultura não irrigada. Aos 322 DAP, houve um aumento da biomassa radicular das plantas não irrigadas nas camadas superficiais devido ao aumento das precipitações e das temperaturas neste período. Houve uma readaptação do sistema radicular ao ambiente. Não se observou diferença significativa de biomassa seca radicular entre os dois tratamentos exceto na camada 60-100 cm onde o desenvolvimento das raízes das plantas não irrigadas foi maior. Este resultado foi também observado na Figura 19. O estudo de Aguiar (1978) mostrou que durante o período de estiagem, as primeiras raízes a morrerem são as superficiais, encontradas entre 0 e 20 cm de profundidade. Durante este mesmo período, observou-se um aumento da massa seca de raízes vivas nas

camadas de solos mais profundas (20-40 e 40-60 cm). Durante o período de chuva, as raízes superficiais foram também as primeiras a se renovarem. Durante esta estação, ocorreu uma diminuição da massa seca de raízes vivas na camada 20-60 cm de solo. Segundo Alvarez; Castro e Nogueira (2000), a variação na distribuição relativa das raízes nas primeiras camadas deve-se principalmente à variação da umidade do solo.

Aos 322 DAP, na área não irrigada, encontraram-se 34, 20, 16, 15 e 15 % da biomassa seca total sobre um metro de profundidade nas camadas 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, respectivamente. Observou-se uma distribuição semelhante dos impactos radiculares na mesma área com 50, 18, 9, 10 e 13% dos impactos sobre um metro de profundidade nas camadas 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, respectivamente. Estes resultados foram consistentes com os valores encontrados por Hermann (1997) para a mesma variedade aos 438 DAP (mês de junho): 23, 20, 20, 19 e 18 % da biomassa radicular nas camadas 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, respectivamente.

Estes resultados mostraram a existência de um gradiente horizontal e vertical de crescimento das raízes durante o ciclo da cultura. Conseqüentemente, destaca-se a importância de diferentes distâncias (da fileira de plantio até a entrelinha) e profundidades (superiores a 1 metro) de amostragem em relação à touceira para melhor representar o sistema radicular inteiro da cana.

As Figuras 30 e 31 mostram a distribuição da biomassa radicular média para cada camada de solo na área irrigada e não irrigada, respectivamente, aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP. Na cultura irrigada a densidade radicular diminuiu com a profundidade durante o ciclo da cana-planta. Os estudos de Chopart e Marion (1994) mostraram aos 113 DAP que esta diminuição podia ser assimilada a uma curva exponencial até 60 cm de profundidade e linear mais profundamente. Estes autores encontraram valores de densidade radicular similares: aproximadamente, entre 1 e 0,3 mg.cm⁻³ na camada 0-20 cm, entre 0,3 e 0,1 mg.cm⁻³ na camada 20-40 cm, entre 0,1 e 0,05 mg.cm⁻³ na camada 40-60 cm e entre 0,05 e 0,01 mg.cm⁻³ na camada 60-100 cm.

Aos 241 DAP, na área irrigada, a Figura 30 mostra o desenvolvimento radicular importante até 40 cm de profundidade e a morte das raízes profundas devido a uma umidade ótima mantida nas camadas superficiais por aspersão. Na cultura não irrigada a densidade radicular diminuiu também com a profundidade até 179 DAP. 241 DAP, durante o período seco e frio, observou-se a morte das raízes superficiais e o desenvolvimento radicular mais intenso na

camada 60-100 cm (Figura 31). O período 179-241 DAP foi marcado por um déficit hídrico mais importante que os períodos anteriores, favorecendo assim a exploração das camadas profundas. Rethman; Venter e Lindeque (1997) observaram o aumento da massa radicular de uma gramínea (*Cenchrus ciliaris*) submetida a estresse hídrico na camada 40-100 cm e o diminuo na camada 0-20 cm. Igualmente, sob o efeito da falta de água, a massa radicular de uma cultura de milho dobrou na camada 66-99 cm (JESKO; NAVARA; DEKANKOVA, 1997).

Aos 322 DAP, correspondendo ao início do período chuvoso e quente, observou-se o aumento do crescimento radicular superficial na cultura em sequeiro. Nesta idade, sobre um metro de profundidade, as raízes mortas representaram em media 33 e 8% da massa seca total na área não irrigada e irrigada, respectivamente. Estas observações mostraram a adaptabilidade do sistema radicular às variações da umidade no solo com a morte das raízes nas camadas secas e crescimento nas camadas mais úmidas.

Figura 30 – Distribuição da biomassa radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento irrigado

Figura 31 – Distribuição da biomassa radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento em sequeiro

A Figura 32 mostra a dinâmica do crescimento radicular durante o ciclo na área irrigada e não irrigada. Para os dois tratamentos, inicialmente o desenvolvimento do sistema radicular foi lento para depois aumentar entre 2 e 8 meses após o plantio e posteriormente estabilizar-se exceto aos 322 DAP na cultura não irrigada. Chopart e Marion (1994) descreveram a mesma dinâmica de crescimento radicular exponencial no início do ciclo de uma cultura de cana irrigada. Da mesma forma, Dillewijn (1952) observou que o crescimento do sistema radicular é lento no início do ciclo, com a emissão e morte das raízes do tolete, aumentando gradualmente com o estabelecimento da cultura para depois diminuir no final do ciclo. O diminuo da massa radicular na cultura não irrigada até 1 metro 241 DAP pode ser explicado pelo aumento da exploração profunda das raízes observada nas Figuras 19 e 20. A Figura 32 mostra de novo a importância do estudo do sistema radicular integral e não apenas sobre 1 metro de profundidade par melhor entender a capacidade de absorção hídrica das plantas e o efeito do estresse hídrico no desenvolvimento da parte aérea.

Figura 32 – Dinâmica de crescimento das raízes secas (g.m^{-2}) acumulado sobre um metro de profundidade no tratamento irrigado e não irrigado

Observaram-se diferenças significativas de massa seca radicular em g.m^{-2} , cumulada sobre um metro de profundidade, entre as duas culturas. A área não irrigada mostrou uma biomassa superior ($P < 0,05$) aos 179 e 322 DAP, a primeira irrigação sendo realizada 109 DAP. Aos 34, 49, 125 e 241 DAP as duas culturas não apresentaram diferenças significativas. Aos 6 meses, para a variedade Co. 290, Inforzato e Alvarez (1957) encontraram $1,7 \text{ t.ha}^{-1}$ de raízes até um metro de profundidade, confirmando os resultados do trabalho apresentado aqui com 2 t.ha^{-1} na cultura não irrigada. Aos 12 meses (fevereiro), os mesmos autores encontraram $6,5 \text{ t.ha}^{-1}$, sendo superior aos valores encontrados neste trabalho aos 322 DAP (setembro), talvez devido às diferenças de solo, de clima, de variedade, de ciclo e de idade. No estudo de Inforzato e Alvarez (1957), os 12 meses de cultura correspondiam ao mês de fevereiro, mais favorável para o crescimento radicular.

A contagem dos impactos totalizou 700 e 470 impactos até 5,2m de profundidade na cultura em sequeiro e na cultura irrigada, respectivamente, sugerindo uma massa radicular total mais importante na área não irrigada. As plantas submetidas à falta de água podem mostrar queda

de produtividade apesar de apresentar uma biomassa igual ou superior as plantas não estressadas. Numa cultura de milho, as plantas submetidas ao estresse hídrico apresentaram uma massa radicular igual às plantas irrigadas e uma queda de 50% da produtividade (JESKO; NAVARA; DEKANKOVA, 1997). Rosenfeld (1989) mostrou uma redução de 65 % da produção de cana submetida a estresse hídrico. Existem varias hipóteses segundo as quais a massa de raízes profundas emitidas durante um estresse hídrico não compensou a queda de produtividade de uma cultura:

- a presença de raízes mortas mais importantes na área não irrigada podia indicar um “gaste” maior de energia e de fotoassimilados no processo de renovação do sistema radicular (turn over),
- o ácido abscísico produzido nas raízes presentes nas camadas de solo mais secas podia atuar negativamente sobre a parte aérea (diminuo da fotossíntese, da expansão foliar...),
- as raízes mais profundas não encontraram as condições favoráveis de absorção (solo mais pobre, toxidez, aeração reduzida...),
- o estresse hídrico não atua da mesma forma sobre a produtividade segundo sua intensidade, sua duração e o estágio da planta submetida ao estresse,
- as quantidades de água nas camadas profundas foram insuficientes para atender a demanda da planta,
- num solo seco, aproximativamente 50% da massa radicular pode ficar ineficiente na absorção de água e elementos minerais.

As relações entre a parte aérea e a parte subterrânea de uma planta são importantes. Além do transporte de água, nutrientes, carboidratos, proteínas entre as raízes e as folhas, existem sinais trocados entre as duas partes para regular o seu crescimento. Existem sinais hidráulicos, hormonais e elétricos das raízes no início de um período de estresse hídrico para a parte aérea que responde com o transporte de fotoassimilados e hormônios favorecendo o crescimento das raízes. O ácido abscísico favorece o aumento do número dos pêlos absorvente, do diâmetro e do potencial osmótico das raízes (HARTUNG; TURNER, 1997; NEUMANN et al., 1997). Durante estresses hídricos de intensidade ou duração mais importantes estes sinais radiculares reduzem a transpiração, a expansão foliar e por consequência o transporte de substâncias estimulantes nas raízes. O crescimento das raízes cessa com uma umidade do solo igual ou inferior ao PMP (CAMARGO, 1976). Segundo Neumann et al. (1997) o sinal hidráulico, ou seja o aumento do

potencial da água no xilema por equilíbrio com o potencial exterior, é predominante. Este processo é físico e permite reduzir a água disponível para as células das folhas e por consequência a expansão celular. Este mecanismo também permite diminuir o grau de abertura dos canais iônicos das membranas e o fluxo de mensageiros secundários como Ca^{2+} que ativam as mudanças metabólicas (elongação celular e acumulação de solutos para ajustamento osmótico). Ocorre assim uma redução da extensibilidade da parede e da extensão celular na parte aérea.

A Tabela 10 mostra as correlações que existem entre a massa radicular e a distância a touceira ou a profundidade, nos dois tratamentos, para as idades estudadas. Observou-se uma correlação negativa ($P < 0,05$) entre a massa seca das raízes e a profundidade a partir de 49 e 125 DAP, na área irrigada e não irrigada, respectivamente, exceto aos 241 DAP na cultura não irrigada. A Tabela 10 indicou uma correlação negativa ($P < 0,05$) entre a massa radicular e a distância a touceira apenas aos 49 DAP nos dois tratamentos.

Tabela 10 - Correlações entre a massa seca radicular e a profundidade ou a distância da touceira, na aérea irrigada e em sequeiro, a diferentes idades (em DAP)

Variável	Tratamento	34 DAP	49 DAP	125 DAP	179 DAP	241 DAP	322 DAP
Profundidade	Irigado	-0,31 P=0,06	-0,38 P=0,02	-0,79 P<0,0001	-0,77 P<0,0001	-0,84 P<0,0001	-0,89 P<0,0001
	Sequeiro	-0,32 P=0,06	-0,32 P=0,05	-0,75 P<0,0001	-0,70 P<0,0001	-0,09 P=0,60	-0,67 P<0,0001
Distância	Irigado	-0,29 P=0,08	-0,34 P=0,04	-0,11 P=0,52	-0,14 P=0,42	0,12 P=0,45	0,11 P=0,52
	Sequeiro	-0,29 P=0,08	-0,37 P=0,02	-0,27 P=0,10	-0,08 P=0,66	0,26 P=0,13	0,13 P=0,43

2.3.3.3 Comprimento radicular

A Tabela 11 mostra as diferenças significativas de comprimento radicular (cm de raízes.cm⁻³ de solo) ao nível de 5% de probabilidade entre as plantas irrigadas e não irrigadas aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP. As análises de variâncias foram realizadas nas mesmas condições descritas no capítulo precedente. As letras maiúsculas mostram as diferenças entre as

profundidades ou as distâncias para o mesmo sistema hídrico e as letras minúsculas mostram as diferenças entre os sistemas hídricos para uma mesma profundidade de solo ou distância da touceira.

Aos 34 e 49 DAP, os dados referentes à análise de variância não indicaram diferença estatística significativa no comprimento radicular ao nível de 5% de probabilidade entre os dois sistemas hídricos (Tabela 11). Aos 49 DAP, nos dois tratamentos, o comprimento das raízes foi significativamente superior na camada 0-20 cm e na posição 12 cm da touceira que no resto de volume de solo estudado.

Aos 125 DAP, a cultura não irrigada mostrou um comprimento radicular maior na camada 40-60 cm que a cultura irrigada. Não se observaram diferenças significativas entre as distâncias de amostragem nos dois tratamentos.

Aos 179 DAP, o comprimento das raízes em cm.cm^{-3} de solo na cultura não irrigada foi significativamente superior à cultura irrigada ($P < 0,05$) na camada 0-20 cm. Nos dois tratamentos, a densidade radicular em cm.cm^{-3} de solo foi significativamente superior na camada 0-20 cm. A Figura 33 mostra a ramificação intensa das raízes superficiais das plantas não irrigadas. O estresse hídrico moderado estimulou a exploração radicular com a formação de raízes mais compridas, finas e ramificadas.

Aos 241 DAP, a cultura irrigada mostrou densidades radiculares em cm.cm^{-3} de solo significativamente superiores ($P < 0,05$) na camada 0-20 cm e inferiores nas camadas profundas (40-60 e 60-100 cm) a aquelas da cultura em sequeiro. Estes resultados sugeriram a existência de dois processos simultâneos durante um estresse hídrico: formação de novas raízes mais profundas nas camadas mais úmidas e degenerescência das raízes nas camadas de solo mais secas com manutenção de uma massa radicular mínima. Num solo seco, a planta investiria mais nas raízes profundas com uma alocação preferencial dos fotoassimilados nas raízes em crescimento.

Tabela 11 - Comprimento radicular em cm.cm^{-3} nas culturas irrigadas e em sequeiro aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP. Letras maiúsculas diferentes indicam as diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as profundidades ou as distâncias para o mesmo sistema hídrico e as letras minúsculas indicam as diferenças entre os sistemas hídricos para uma mesma profundidade de solo ou distância da touceira

Idade (DAP) /	Profundidade (cm)				Distância (cm)		
Sistema hídrico	0-20	20-40	40-60	60-100	12	35	70
34 DAP /							
Cultura irrigada	0,070Aa	0	0	0	0,042Aa	0	0
Cultura em sequeiro	0,066Aa	0	0	0	0,019Aa	0	0
49 DAP /							
Cultura irrigada	0,060Aa	0,008Ba	0	0	0,035Aa	0,005Ba	0
Cultura em sequeiro	0,045Aa	0,013Ba	0	0	0,034Aa	0Ba	0
125 DAP /							
Cultura irrigada	0,343Aa	0,193Ba	0,086Ca	0,005Da	0,136Aa	0,116Aa	0,118Aa
Cultura em sequeiro	0,357Aa	0,254Ba	0,170Cb	0,015Da	0,183Aa	0,181Aa	0,122Aa
179 DAP /							
Cultura irrigada	0,344Aa	0,191Ba	0,155Ba	0,039Ca	0,169Aa	0,206Aa	0,189Aa
Cultura em sequeiro	0,522Ab	0,271Ba	0,181Ca	0,246Bb	0,284Ab	0,301Ab	0,294Aa
241 DAP /							
Cultura irrigada	0,449Aa	0,288Ba	0,095Ca	0,032Ca	0,156Aa	0,184Aa	0,199Aa
Cultura em sequeiro	0,189Ab	0,190Aa	0,161Cb	0,248Bb	0,198Ab	0,216Aa	0,202Aa
322 DAP /							
Cultura irrigada	0,450Aa	0,305Ba	0,139Ca	0,059Da	0,187Aa	0,211Aa	0,210Aa
Cultura em sequeiro	0,457Aa	0,275Ba	0,215Ca	0,265Bb	0,277Ab	0,294Ab	0,315Ab

Figura 33 – Ramificações de uma raiz superficial na cultura irrigada (na esquerda) e na cultura em sequeiro (na direita) aos 179 DAP

As Figuras 34 e 35 mostram a distribuição do comprimento radicular médio para cada camada de solo na área irrigada e em sequeiro, respectivamente, aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP.

Figura 34 – Distribuição do comprimento radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento irrigado

Figura 35 – Distribuição do comprimento radicular aos 34, 49, 125, 179, 241 e 322 DAP no tratamento em sequeiro

Na cultura irrigada e não irrigada, o comprimento radicular por volume de solo diminuiu com a profundidade durante o ciclo da cana-planta exceto aos 179, 241 e 322 DAP na área não

irrigada na camada 60-100 cm. Na aérea irrigada, o comprimento radicular aumentou com a idade das plantas, mais rapidamente nas camadas superficiais que nas camadas profundas. Na cultura não irrigada, o comprimento radicular aumentou com a idade das plantas sobre um metro de profundidade, até 179 DAP. Aos 241 DAP, a Figura 35 mostra a morte das raízes superficiais devido a um solo mais seco e um desenvolvimento radicular mais intenso na camada 60-100 cm. Aos 322 DAP, as precipitações mais freqüentes favoreceram o crescimento superficial das raízes na área não irrigada. Antwerpen, 1998 apud Smith; Inman-Bamber e Thorburn (2005), encontrou densidades radiculares máximas variando entre 0,5 e 2,7 cm.cm^{-3} . Valores de 5,3 e 1,3 cm.cm^{-3} foram medidas por Ball-Coelho et al. (1992) no Brasil e Reghenzani, 1993 apud Smith; Inman-Bamber e Thorburn (2005) na Austrália, respectivamente, mostrando a grande variabilidade de densidade radicular. Neste trabalho, a densidade radicular média máxima atingiu aproximadamente 0,5 cm.cm^{-3} .

A Figura 36 mostra a dinâmica de crescimento das raízes em termo de comprimento cumulado sobre um metro de profundidade, nos dois sistemas hídricos.

Aos 34 e 49 DAP, não houve diferença significativa ($P < 0,05$) no comprimento radicular entre os dois tratamentos.

Aos 125 e 241 DAP, os dois tratamentos não apresentaram diferenças significativas no comprimento radicular cumulado sobre um metro de profundidade (Figura 36).

Aos 179 e 322 DAP, houve diferença significativa ($P < 0,05$) no comprimento radicular entre os dois tratamentos, a cultura não irrigada apresentando um comprimento das raízes superior.

A Tabela 12 mostra as correlações que existem entre o comprimento radicular e a distância a touceira ou a profundidade, nos dois tratamentos, para as idades estudadas. Observou-se uma correlação negativa ($P < 0,05$) entre o comprimento das raízes e a profundidade a partir de 34 DAP, nos dois tratamentos, exceto aos 241 DAP na cultura não irrigada. A Tabela 12 indicou uma correlação negativa ($P < 0,05$) entre o comprimento radicular e a distância a touceira apenas aos 49 DAP na área irrigada e aos 34 e 49 DAP na área não irrigada.

Figura 36 – Dinâmica de crescimento das raízes em comprimento (m.m^{-2}) cumulado sobre um metro de profundidade no tratamento irrigado e não irrigado

Tabela 12 - Correlações entre o comprimento radicular e a profundidade ou a distância da touceira, na aérea irrigada e em sequeiro, a diferentes idades (em DAP)

Variável	Tratamento	34 DAP	49 DAP	125 DAP	179 DAP	241 DAP	322 DAP
Profundidade	Irrigado	-0,35 P=0,04	-0,45 P=0,01	-0,86 P<0,0001	-0,68 P<0,0001	-0,88 P<0,0001	-0,91 P<0,0001
	Sequeiro	-0,36 P=0,03	-0,37 P=0,03	-0,82 P<0,0001	-0,60 P<0,0001	0,33 P=0,05	-0,56 P=0,0004
Distância	Irrigado	-0,32 P=0,06	-0,39 P=0,02	-0,06 P=0,73	-0,44 P=0,79	0,13 P=0,45	0,08 P=0,64
	Sequeiro	-0,33 P=0,05	-0,40 P=0,02	-0,27 P=0,23	-0,01 P=0,94	0,16 P=0,36	0,15 P=0,39

2.3.3.4 Comprimento radicular específico

O comprimento radicular específico expressado em cm de raízes por mg de raízes é um indicador interessante de ramificação e de diâmetro das raízes. Contrariamente as raízes grossas, as raízes finas apresentam comprimentos específicos elevados. É igualmente um termo de passagem entre o peso e o comprimento das raízes. A relação entre as raízes finas e grossas é a

mais determinante nas variações dos comprimentos específicos em função da profundidade e distância horizontal a touceira (CHOPART; MARION, 1994).

A Figura 37 mostra a relação que existe entre a massa e o comprimento das raízes na aérea irrigada e não irrigada. Observou-se a mesma relação linear para os valores baixos de massa e comprimento nos dois tratamentos. Esta tendência declinou para os valores mais elevados de biomassa nas duas áreas, devido a uma porcentagem mais importante de raízes grossas nas amostras mais pesadas.

Figura 37 – Relação entre biomassa (mg.cm⁻³) e o comprimento (cm.cm⁻³) das raízes para a cultura irrigada e não irrigada

As figuras 38 e 39 mostram a variação do comprimento específico radicular em função da profundidade aos 125, 179, 241 e 322 DAP nos dois tratamentos. Não houve diferença significativa ($P < 0,05$) aos 125, 179 e 241 DAP entre os dois sistemas hídricos sobre um metro de profundidade exceto aos 241 e 322 DAP, na camada 60-100 cm onde o comprimento específico na área irrigada foi superior. Para cada tratamento, o comprimento específico não variou com a idade e com a profundidade até 60 cm. Na cana irrigada, a partir de 125 DAP, as raízes presentes na camada 60-100 cm apresentaram um comprimento específico significativamente superior, mostrando, por consequência, uma morfologia mais finas. Isso pode ser explicado pelo fato que o

diâmetro médio das raízes diminuiu com a profundidade e que as partes apicais das raízes apresentaram uma taxa de matéria seca menor. Na cana não irrigada, as raízes presentes na camada 60-100 cm apresentaram um comprimento específico significativamente superior aos 125 e 179 DAP. Aos 241 e 322 DAP, não houve diferença de comprimento específico entre todas as camadas indicando uma progressão mais profunda do sistema radicular. O comprimento específico das raízes não variou com as distâncias horizontais a touceira para cada idade, cada tratamento e durante o ciclo inteiro.

Figura 38 – Comprimento específico das raízes até um metro de profundidade aos 125, 179, 241 e 322 dias DAP no tratamento irrigado

Figura 39 – Comprimento específico das raízes até um metro de profundidade aos 125, 179, 241 e 322 dias DAP no tratamento em sequeiro

A Figura 40 não indica um efeito da idade no comprimento específico médio das raízes sobre um metro de profundidade. Não se observou diferença significativa entre os dois tratamentos. Isso indicou que não houver variação importante na proporção entre raízes grossas e finas durante o ciclo.

Figura 40 – Comprimento específico em cm de raízes por mg de biomassa radicular seca em função da idade na área irrigada e não irrigada

2.3.3.5 Exploração radicular

Os dados sobre a biomassa e o comprimento das raízes são importantes no estudo do crescimento radicular. A biomassa informa sobre as alocações entre a parte aérea e subterrânea e o comprimento é um indicador de absorção e de nutrição. Entretanto, eles não dão informação sobre a distribuição das raízes no solo e por consequência sobre a capacidade de exploração do solo do sistema radicular e finalmente sobre a eficiência do carbono alocado na parte subterrânea.

A partir da densidade média de comprimento para cada camada de solo (LR em cm.cm^{-3}), é possível avaliar a distância média entre as raízes (EMR em cm) (NEWMAN, 1969): eq. (19)

$$EMR = 1,13 / LR^{1/2} \quad (19)$$

Quando a distância média entre duas raízes é superior a duas vezes a distância de migração do elemento mineral estudado ou da água, não existe competição entre estas raízes e a taxa de exploração do solo é maior. Inversamente, uma distância reduzida entre as raízes não permite uma exploração otimizada do volume total do solo. A taxa de exploração do solo pelas

raízes (EX em %), ou seja, a porcentagem do volume de solo útil para a absorção hídrica e mineral de uma cultura é uma informação útil sobre a qualidade do enraizamento e sobre o acesso das raízes a água (CHOPART, 1999): eq. (20) e (21)

$$EX = r^2 / 3(EMR/2)^2 \quad \text{se} \quad EMR/2 > r \quad (20)$$

ou

$$EX = 1 - EMR/3r \quad \text{se} \quad EMR/2 < r \quad (21)$$

onde r é a distância máxima de migração da água ($r=5\text{cm}$) (BLANCHET et al., 1974).

Este modelo assumiu que as raízes são equidistantes no volume considerado e que o potencial de absorção hídrico é igual sobre o comprimento total das raízes.

A variação da taxa de exploração do solo em função da profundidade aos 125, 179, 241 e 322 DAP, na cultura irrigada e na cultura não irrigada, é representada nas figuras 41 e 42, respectivamente. Devido a uma distância média superior a 5 cm entre raízes no tratamento irrigado na camada 60-100 cm, a taxa de exploração foi menor que no tratamento não irrigado.

Figura 41 – Taxa de exploração radicular do solo (%) em função da profundidade, aos 125, 179, 241 e 322 DAP na cultura irrigada

Figura 42 – Taxa de exploração radicular do solo (%) em função da profundidade, aos 125, 179, 241 e 322 DAP na cultura em sequeiro

De acordo com o método apresentado neste capítulo, a taxa de exploração foi elevada (entre 74 e 90%) até 60 cm de profundidade nos dois tratamentos aos 125, 179, 241 e 322 DAP. Durante todo o ciclo, a cultura não irrigada apresentou um volume maior de solo explorado pelas raízes que a cultura irrigada, nas camadas profundas de solo (60-100 cm). Uma taxa de exploração radicular importante durante um estresse hídrico permite aumentar o acesso à água e elementos nutricionais e por consequência a resistência à falta de água. Entretanto, os perfis realizados aos 332 DAP (Figura 19) não mostraram uma distribuição homogênea nos dois tratamentos, podendo assim alterar os resultados encontrados sobre as taxas de exploração.

2.3.4 Modelagem

A modelagem do balanço hídrico foi realizada com o modelo MOSICAS para comparar os resultados de umidade de solo e de crescimento radicular simulados e observados.

Otimizações sucessivas de alguns parâmetros, influenciando o armazenamento da água no solo e o crescimento radicular, foram necessárias:

- o índice foliar da variedade RB 72 454, medido no campo de novembro 2004 até setembro 2005, no trabalho de Carlos Suguitani, foi integrado no modelo MOSICAS para avaliar as perdas por transpiração;

- a condutividade hidráulica do solo a saturação, medida no laboratório, foi utilizada para avaliar as perdas por drenagem;

- o coeficiente de eficiência da irrigação por aspersão utilizado no modelo foi de 0,75 ao longo do ciclo;

- a velocidade de alongação das raízes no solo em profundidade foi modificada no balanço hídrico do modelo MOSICAS. Uma velocidade de $0,03 \text{ cm} \cdot (\text{grau dia})^{-1}$, correspondendo à velocidade de alongação radicular na parcela não irrigada, foi integrada no modelo;

- a densidade radicular máxima em $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ de solo usada para a modelagem do balanço hídrico foi a densidade radicular máxima observada no campo, ou seja $0,5 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ de solo;

- o coeficiente usado no modelo para descrever a evolução da densidade radicular em função da idade foi modificado a partir das observações realizadas no campo durante o ciclo.

As Figuras 43 e 44 apresentam a relação entre as variações da densidade radicular média sobre um metro de profundidade simulada e observada na área irrigada e não irrigada, respectivamente.

Nos dois tratamentos, a densidade de raízes foi influenciada por vários fatores com a umidade e a profundidade do solo, a idade da cultura entre outros. Apenas uma relação simples entre a idade da cultura e a densidade radicular foi integrada no modelo. Esta relação não explicou todas as observações e por consequência seria interessante, num trabalho futuro, achar uma relação mais complexa entre o crescimento das raízes e os fatores genéticos e ambientais.

Figura 43 – Relação entre as densidades radiculares médias (cm.cm⁻³ de solo) sobre um metro de profundidade, simuladas e observadas, na área irrigada

Figura 44 – Relação entre as densidades radiculares médias (cm.cm⁻³ de solo) sobre um metro de profundidade, simuladas e observadas, na área em sequeiro

A Figura 45 compara a velocidade de elongação das raízes no solo em profundidade simulada pelo modelo e observada na área irrigada e não irrigada. Apenas uma mesma relação para os dois tratamentos entre a profundidade e a idade da cultura foi integrada nos cálculos do balanço hídrico. Como para a densidade radicular, seria útil achar uma relação explicativa da variação da profundidade de enraizamento máximo em função da idade da cultura, da umidade do solo, da compactação ou da temperatura do solo.

Figura 45 – Relação entre as profundidades de enraizamento máximas (cm), até um metro de profundidade, simuladas e observadas, nas áreas irrigada e não irrigada

As Figuras 46 e 47 apresentam a relação entre as variações da umidade média do solo até um metro de profundidade simulada e observada na área irrigada e não irrigada, respectivamente.

Observou-se uma forte relação entre as umidades simuladas e observadas na área irrigada ($r^2=0,64$) e não irrigada ($r^2=0,70$). Entretanto o armazenamento foi subestimado no final do ciclo na área irrigada e superestimado no início do ciclo nos dois tratamentos.

Um aumento da eficiência da irrigação ocorreu no final do ciclo na área irrigada, devido à aplicação de lâminas menores de água para prever as perdas superficiais. No modelo, uma eficiência de 0,75 foi aplicada para todo o ciclo da cana-planta, o que pode explicar a subestimação da umidade do solo.

Figura 46 – Relação entre as variações da umidade média, até um metro de profundidade, simuladas e observadas na área irrigada

Figura 47 – Relação entre as variações da umidade média, até um metro de profundidade, simuladas e observadas na área em sequeiro

Na área não irrigada, observou-se um aumento da umidade simulada do solo mais importante que a umidade determinada no campo, após uma chuva de 115 mm, 207 DAP. No modelo, a totalidade dos 115 mm foi utilizada para aumentar o armazenamento hídrico do solo. Na realidade, um aporte de uma quantidade importante de água num solo argiloso, seco e

apresentando uma declividade de 3%, favoreceu as perdas hídricas por escoamento superficial, devido à infiltração lenta caracterizando este tipo de solo.

Finalmente, os resultados de Carlos Suguitani sobre a parte aérea mostraram que o estresse hídrico moderado não conduziu a diferenças importantes de altura, de índice foliar e de produtividade entre os dois níveis de disponibilidade hídrica. As plantas estressadas responderam com variações de densidade radicular e conseguiram compensar a falta moderada de água. A irrigação aumentou a produtividade final, média das 4 variedades, em apenas de 8 t.ha⁻¹, com a aplicação de 900 mm por aspersão. Totalizando 154 t.ha⁻¹ na área irrigada, a irrigação não pareceu economicamente viável nas condições climáticas deste estudo. A modelagem do crescimento da cana-planta nas condições brasileiras mostrou a importância de melhorar ou desenvolver os pontos seguintes:

- achar uma relação entre os fatores ambientais e a densidade radicular,
- integrar no modelo um coeficiente de redução da velocidade de alongação das raízes no solo em profundidade e de partição da biomassa em função da textura do solo,
- realizar uma análise de sensibilidade do modelo a vários parâmetros,
- relacionar a massa radicular determinada no módulo de crescimento da planta e o comprimento radicular determinado no módulo do balanço hídrico,
- adquirir dados sobre o comprimento radicular nas camadas profundas de solo e realizar o balanço hídrico sobre a profundidade total de enraizamento,
- adquirir dados sobre o sistema radicular da cana-soca para modelar a queda de produtividade em função do número de cortes,
- adquirir dados sobre a resposta da cana à falta de água. Avaliar o efeito da intensidade e da duração do estresse hídrico em função da idade da cultura e integrar estas informações no modelo MOSICAS.

2.3.4 Considerações finais

A interpretação dos resultados agregados induz a algumas considerações, que são apresentadas a seguir.

- a) A profundidade máxima das raízes foi superior na cultura submetida a um estresse hídrico, comparada com a cultura irrigada aos 125 e 332 DAP. Aos 332 DAP, as raízes atingiram 4,70 e 4,25 m na área em sequeiro e irrigada, respectivamente. A distribuição observada a partir de perfis verticais foi mais homogênea na área não irrigada, apresentando uma melhor exploração do solo. Aproximadamente 50% dos impactos radiculares totais foram encontrados abaixo de 1 m de profundidade nos dois tratamentos, caracterizando o sistema radicular profundo da variedade RB 72 454. O número total de impactos maior na área não irrigada, comparada com a área irrigada, sugeriu uma massa radicular maior.
- b) O sistema radicular (biomassa e comprimento) na cultura irrigada apresentou uma distribuição superficial, concentrado entre 0 e 60 cm de profundidade até 322 DAP.
- c) A cultura não irrigada mostrou uma biomassa seca e um comprimento radiculares significativamente maiores nas camadas superficiais que nas camadas profundas até 179 DAP. Aos 241 DAP, o sistema radicular mostrou uma distribuição homogênea sobre um metro de profundidade. A amostragem realizada até um metro de profundidade não permitiu avaliar a massa e o comprimento total das raízes e mostrou a importância de estudar o sistema radicular e o solo (fertilidade, compactação...) nas camadas profundas. Aos 322 DAP, a massa e comprimento radicular foram mais importantes na camada 0-20 cm. A planta respondeu as variações da umidade no solo com a degenerescência radicular nas camadas secas e a emissão de novas raízes nas camadas mais úmidas.
- d) A cultura não irrigada mostrou um sistema mais desenvolvido que a cultura irrigada nas camadas profundas (40-100 cm) a partir de 125 DAP. As plantas irrigadas apresentaram uma massa e um comprimento radiculares superiores as plantas estressadas nas camadas superficiais aos 241 DAP, durante o período de seca.
- e) Existiram correlações negativas entre:

- a densidade radicular (em mg.cm^{-3} de solo e em cm.cm^{-3} de solo) e a distância a touceira apenas aos 49 DAP, nos dois tratamentos. A partir de 125 DAP, a massa e o comprimento das raízes por volume de solo não variaram com a distância a touceira, nos dois sistemas hídricos;
 - a densidade das raízes (em mg.cm^{-3} de solo e em cm.cm^{-3} de solo) e a profundidade a partir de 49 DAP na cultura irrigada e a partir de 125 DAP na cultura em sequeiro. Aos 241 DAP, a biomassa não variou com a profundidade até um metro na área não irrigada.
- f) O comprimento específico das raízes (em cm.mg^{-1}) não variou com as distâncias horizontais, com os tratamentos e com a idade até 60 cm de profundidade. Para os dois tratamentos e para cada idade o comprimento específico radicular foi superior na camada 60-100 cm exceto aos 241 e 322 DAP, na área não irrigada. Aos 241 e 322 DAP, o comprimento específico foi superior na camada 60-100 cm, na área irrigada, comparada a área não irrigada.
- g) A taxa de exploração do solo pelas raízes, avaliada nos dois tratamentos, foi superior na cultura não irrigada na camada 60-100 cm, de 125 DAP até o corte.
- h) A modelagem do balanço hídrico com o modelo MOSICAS mostrou uma boa relação entre as variações da umidade média do solo sobre um metro de profundidade simuladas e observadas.
- i) O estresse hídrico moderado observado durante o período estudado não permitiu mostrar grande influência da irrigação na produção de cana-de-açúcar.

3 CONCLUSÕES

O estudo do sistema radicular da cana-planta feito em Latossolo Vermelho Amarelo permitiu tirar as seguintes conclusões:

3.1.A disponibilidade hídrica no solo afetou o crescimento radicular da cana-de-açúcar, que foi maior, em termos de profundidade máxima do sistema radicular e de massa de raízes, na menor disponibilidade hídrica.

3.2.A modelagem do balanço hídrico com o modelo MOSICAS gerou valores de umidade média do solo até um metro de profundidade que apresentaram uma boa relação com os valores observados.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J.M.F. de. **Observações sobre sistema radicular de cana planta (*Saccharum* spp.)**. 1978. 24 p. Trabalho (Graduação) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1978.
- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R. de C.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Sciencia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.4, p. 653-659, 2000.
- ARAGÃO, O.P.; PEREIRA, J.R. Comportamento da cana-de-açúcar sob diferentes regimes de irrigação. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.93, n.3, p. 162-179, mar. 1979.
- ARIZONO, H.; MATSUOKA, S.; GHELLER, A.C.A.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H.P.; BASSINELLO, A.I. **Guia das principais variedades RB**. Araras: UFSCar, CCA, DBV, 1999. 15 p.
- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; THESSSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.142, p. 297-305, 1992.
- BARAN, R.; BASSEREAU, D.; GILLET, N. Measurement of available water and root development on an irrigated sugar cane crop in the Ivory Coast. **Proceedings of the International Society Sugar Cane Technology**, Pretoria, n.15, p. 726-735, 1974.
- BERGAMASCO, A.F.; RODRIGUES, L.H.A.; SILVA, F.C.; TRIVELIN, P.C.O. Estudo da dinâmica do nitrogênio no sistema solo - cana-de-açúcar através da modelagem matemática. CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p. 225-233.
- BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 1981. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.
- BEAUCLAIR, E.G.F. de. Planejamento e estimativa da produção de cana. **Visão agrícola**, Piracicaba, n.1, p. 24-27, jan./jun. 2004.
- BERNARDES, M.S. Álcool brasileiro evaporado pelo clima ignorado. **Opiniões**, Ribeirão Preto, p. 16, jul./set. 2005.
- BERNARDES, M.S.; TERUEL, D.A.; SPAROVEK, G.; DOURADO NETO, D. Modelos ambientais e sustentabilidade. In: WORKSHOP NACIONAL DE AGRICULTURA SUSTENTÁVEL EM REGIÕES TROPICAIS DE RELEVO ACIDENTADO, 3., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1998. 1 CD-ROM.

BERNARDES, M.S.; SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E.R.; SADER, S.L.; BARBOSA, A.M. Comparação entre a produtividade real e a simulada através de modelo matemático, avaliada em cinco variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p. 477-482.

BLANCHET, R. ; BOSC, M.; MAERTENS, C.; PUECH, J. Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. I) influence de l'humidité du sol et des flux hydriques sur l'absorption des éléments minéraux par les racines. **Annales Agronomie**, Paris, n.25, p.681-696, 1974.

CÂMARA, G.M. S.; OLIVEIRA, E.A.M. de. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. 242 p.

CAMARGO, P.N. **Fisiologia de la caña de azúcar**. México: Comisión Nacional de la Industria Azucarera, 1976. 59 p. (Serie Divulgación Técnica IMPA Folleto, 6).

CAMPOS, H. de. **Estatística aplicada à experimentação com cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1984. 292 p.

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

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. **Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira**. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138 p.

CHOPART, J.L; MARION, D. Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. In : NOTE TECHNIQUE IDESSA, 7., 1994, Bouaké. **Anais...** Bouaké: IDS, 1994. p. 1-28.

CHOPART, J.L. **Relations entre état physique du sol, systèmes racinaires et fonctionnement hydrique du peuplement végétal: outils d'analyse *in situ* et exemples d'études en milieu tropical à risque climatique élevé**. 1999. 114p. Thèse (Docteur en Agronomie) – Université Joseph Fourier – Grenoble 1 – Sciences et Géographie, Grenoble, 1999.

COLMAN, E.A. A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.63, p. 277, 1947.

COMERMA, J.; GUENNI, L.; MEDINA, G. Validacion del balance hidrico del modelo CERES-Maiz en la zona de Maracay, Estado Aragua- Venezuela. **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 35, p. 115-132, 1985.

COSTA, M.M.G. **Aplicação de dois modelos de previsão de safra agrícola para a cultura de milho na microregião de Ribeirão Preto, SP**. 1992. 198p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

DAMMAN, G. **Etude et modelisation du fonctionnement hydrique de plantations d'eucalyptus au Congo**. 2001. 45p. Mémoire de DAA (Mention Physique des Surfaces Naturelles et Génie Hydrologique) - École Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier, 2001.

DEMÉTRIO, V.A. **Efeitos da água do solo e temperatura ambiente no rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1978. 98 p. Tese (Doutorado em Engenharia Rural) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1978.

DILLEWIJN, C. V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botânica, 1952. 371 p.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K; BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, p. 191-192, 2000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

FARONI, C.E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FAUCONNIER, R. **La canne à sucre**. Paris: Edition Maisonneuve et Larose, Collection le Technicien d'Agriculture Tropicale, 1991. 165 p.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrinannual 2005: anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, 2004, 500 p.

FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto: um olhar espacial sobre os canaviais. **Visão agrícola**, Piracicaba, n.1, p. 28-31, jan./jun. 2004.

GABRIELLE, B.; MENASSERI, S.; HOUOT, S. Analysis and field evaluation of the CERES models' water balance component. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p. 1402-1411, 1995.

GRANIER, A.; BRÉDA, N.; BIRON, P.; VILLETTE, S. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. **Ecological Modelling**, Kassel, v.116, p. 269-283, 1999.

HAISE, H.R.; HAASE, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies on some Great Plains soils: 2. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.19, p. 20-25, 1955.

HARTUNG, W.; TURNER, N.C. Absciscic acid relations in stressed roots. In: ALTMAN, A; WAISEL, Y. **Biology of root formation and development**. New York: Plenum Press, 1997. p. 147-154.

HERMANN, E.R. **Desempenho vegetativo e produtivo de três variedades de cana-de-açúcar submetidas a doses de calcário e de gesso**. 1997. 72 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

HILLEL D.; KRENTOS V.D.; STYLIANOV Y. Procedure and test of an internal method for measuring soil hydraulic conductivity in situ. **Soil Science**, Baltimore, v.114, p. 395-400, 1972.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J.; KIMBALL, B.A.; NAKAYAMA, F.S. The dependence of bare soil albedo on soil watercontent. **Journal of Applied Meteorology**, Santa Mônica, v.14, n.1, p.109-113, 1975.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. Co. 290, em solo tipo terra-roxa-legítima. **Bragantia**, Campinas, v.16, n.1, p.1-13, out. 1957.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, Pretoria, v.8, p. 93-99, 1991.

INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL. **Brasil / açúcar**. Rio de Janeiro, 1972. 243 p. (Coleção Canavieira, 8).

JAMISON, V.C.; KROTH, E.M. Available moisture storage capacity in relation to textural composition and organic matter content of several Missouri soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.22, p.189-192, 1958.

JESKO, T.; NAVARA, J.; DEKANKOVA, K. Root growth and water uptake by flowering maize plants under drought conditions. In: ALTMAN, A; WAISEL, Y. **Biology of root formation and development**. New York: Plenum Press, 1997. p. 270.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development**. College station: Texas A&M University Press, 1986. 194 p.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.61, p. 253-271, 1999.

LEME, E. J. A.; SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Consumo de água da cana-de-açúcar irrigada por sulcos de infiltração. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TECNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 2., 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: STAB, 1981. p. 277-311.

LIMA, G.A. **Cultura da cana-de-açúcar**. Fortaleza: IOCE, 1984. 159 p.

LIMA, M.G. de. **Calibração e avaliação do modelo Ceres-Maize em condições tropicais do Brasil**. 1995. 119p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LIU, W.T.H.; BOTNER, D.M.; SAKAMOTO, C.M. Application of Ceres-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.45, n.3, p. 299-312, 1989.

MAC LEAN, A.H.; YAGER, T.U. Available water capacities of Zambian soils in relation to pressure plate measurements and particle size analysis. **Soil Science**, Baltimore, v.113, n.1, p. 23-29, 1972.

MAERTENS, C. **Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées**. 1964. 162 p. Thèse (Docteur en Agronomie) - Université de Toulouse, Toulouse, 1964.

MARTINÉ, J.F. **Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle**. 2003. 132 p. Thèse (Docteur en Agronomie) - Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2003.

MARTINÉ, J.F. ; COMBRES, J.C. ; MEZINO, M. Une plate-forme de simulation comme outil d'analyse et d'aide à la décision : SIMULEX. In : ACTES DE L'AFCAS/GPS, 2001, Yaoundé. **Anais...** Yaoundé : CIRAD, 2001. p. 91-103.

MARTINÉ, J.F.; LEBRET, P. ; COMBRES, J.C. ; LARICHAUDRY, R. de; JEANNETTE, M. ; MEZINO, M. Modeling sugarcane growth, In : CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHES AGRONOMIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT. **Biophysical function models and diagnostic tools: sugarcane programme, anual report**. Montpellier, 1999. p. 48-49.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmetal physics**. 2th.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291 p.

NACHABE, M.H. Refining the definition of field capacity in the literature. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, p. 230-232, July/Aug. 1998.

NEUMANN, P.; CHAZEN, O.; BOGOSLAVSKY, L.; HARTUNG, W. Role of root derived ABA in regulating early leaf growth responses to water deficits. In: ALTMAN, A; WAISEL, Y. **Biology of root formation and development**. New York: Plenum Press, 1997. p.147-154.

NEWMAN, J. A method of estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v.3, p.139-145, 1966.

O'LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSSEN, D.M.; BERGE, H.F.M.; BAKEMA, A. **A simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271 p.

PEREIRA, A.N.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

QUEIROZ, A.S.; BERNARDES, M.S.; COELHO, R.D.; KRONKA, P.F.B. Avaliação preliminar do bulbo molhado através da tensiometria em sistema de irrigação por gotejamento em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p. 573-580.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1978. 119 p.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1987. 188 p.

RETHMAN, N.F.G.; VENTER, P.S.; LINDEQUE, J.P. Influence of water stress on the mass of roots of buffelgrass selections and on their distribution. In: ALTMAN, A; WAISEL, Y. **Biology of root formation and development**. New York: Plenum Press, 1997. p. 249-252.

RITCHIE, J.T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.58, p. 81-96, 1981.

ROSENFELD, U.; LEME, E.J.A. Produtividade da cana-de-açúcar irrigada por aspersão, Estudo de épocas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 3., 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: STAB, 1984. p. 77-84.

ROSENFELD, U. **Período crítico de deficiência hídrica para a cana planta em cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 1989. 89 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils: 1. **Journal of Soil Science**, Edinburgh, v.16, p. 1-15, 1965.

SILVA C. GM inicia vendas do Corsa bicombustível. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 26 jun. 2003. p. B8.

SILVA, F.C. da; BERGAMASCO, A.F.; BERNARDES, M.S. Modelos aplicados a cultura da cana-de-açúcar: CANEGRO e outros. In: WORKSHOP INTERNACIONAL: MODELAGEM DE PROCESSOS PARA SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO DE CULTURAS, 2000, Campinas. **Proceedings: Workshop, palestras...** Campinas: Embrapa-CNPTIA/International Consortium for Agricultural System Applications, 2000. 1 CD-ROM.

SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. IRRICANE: a simple computerised irrigation scheduling method for sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technology Associated**, Pretoria, n.72, p. 117-122, 1998.

SLABBERS, P.J. Practical prediction of actual evapotranspiration. **Irrigation Science**, Heidelberg, v.1, p. 185-196, 1980.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p. 169-183, 2005.

SOBRAL, A.F. de; GUIMARÃES, V.O. S. Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.27, v.2, p. 287-292, fev. 1992.

TANNER, C.B.; JURY, W.A. Estimating Evaporation and Transpiration from a Row Crop during Incomplete Cover. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, p. 239-243, 1976.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **The South African Sugar Journal**, Pretoria, p. 593-635, Nov. 1976.

TODOROFF, P.; MARTINÉ, J.F.; BONHOMME, R.; CABIDOCHÉ, Y.M.; LECANU, G.; SOUMAYET, G.; GABRIELLE, B. Modelling sugarcane growth, In: CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHES AGRONOMIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT. **Biophysical function models and diagnostic tools: sugarcane programme, anual report**. Montpellier, 2000. p. 48-52.

TOLEDO, L.R. Combustível para a cana. **Globo Rural**, São Paulo, ano 18, p. 36-44, ago. 2003.

TROUSE, J.A.C.; HUMBERT, R.P. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. **Soil Science**, Baltimore, v.91, p. 208-217, 1961.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. **Aspetos sociais, econômicos e tecnológicos da produção de açúcar e álcool no Estado de São Paulo: 2001/2002**. São Paulo, 2002. 28 p.

VASCONCELOS, A.C.M de. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

VILAIN, M. **La production végétale: les composantes de la production**. 3^{ème} éd. Paris: Lavoisier Tec&Doc, 1997. 478 p.