

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

INFLUÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO DOSSEL VEGETATIVO SOBRE O
CONSUMO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CULTURA DO FEIJOEIRO
(*Phaseolus vulgaris* L.)

POR
GERSON ARAUJO DE MEDEIROS

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Gerson Araujo de Medeiros e aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de janeiro de 1996. Campinas 04 de março de 1996

Orientador:

Dr. Flávio Bussmeyer Arruda

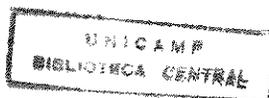
Flávio Bussmeyer Arruda
Presidente da Banca

Dissertação apresentada em cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Água e Solo.

Campinas, SP

Fevereiro de 1996

9620507



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	TUNICAMP
	M 467 i
V.	E.
TOMBO BU/	29232
PROC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	03/12/96
N.º CPD	

CM.00095030-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M467i

Medeiros, Gerson Araujo de

Influência do desenvolvimento do dossel vegetativo sobre o consumo de água e coeficiente de cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) / Gerson Araujo de Medeiros.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Flávio Bussmeyer Arruda.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Feijão. 2. Irrigação. 3. Irrigação agrícola. 4. Evapotranspiração. 5. Lisímetro. I. Arruda, Gerson Araujo de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola.. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao FAEP (Fundo de Apoio à Pesquisa - UNICAMP) pelo suporte financeiro ao trabalho.

Ao Prof. Dr. Flávio Bussmeyer Arruda pela orientação segura e participação nesse trabalho, sem a qual o presente trabalho não teria atingido o seu atual nível.

Ao Prof. Dr. Newton Roberto Boni pela coordenação do projeto junto ao FAEP, e pelas sugestões apresentadas para a melhoria do presente estudo.

Aos pesquisadores e funcionários da Seção de Irrigação e Drenagem do Instituto Agrônomo pelo apoio e incentivo durante a condução do experimento.

Ao chefe da Seção de Irrigação e Drenagem do IAC, Dr. Emílio Sakai, por ter colocado toda a estrutura da Seção à disposição do presente trabalho.

À Seção de Climatologia Agrícola pelo fornecimento de todos os dados meteorológicos necessários ao presente trabalho.

Aos pesquisadores da Seção de Climatologia Agrícola do IAC, Dr. Orivaldo Brunini e Dr. Marcelo Bento Paes de Camargo pelas contribuições dadas ao presente trabalho

À administração do Centro Experimental de Campinas do IAC pelo apoio dado, em termos de material humano e equipamento, para a realização do presente trabalho.

Ao pesquisador Edmilson D'Ambrosio da Seção de Leguminosas do IAC pela orientação dada sobre o manejo da cultura do feijoeiro.

Ao Departamento de Água e Solo e ao seu chefe na época, Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani, por ter permitido o meu afastamento para a realização da coleta de dados do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Edson Eiji Matsura e Prof. Dr. Roberto Testezlaf pelas sugestões apresentadas para melhoria do presente estudo.

Ao Sr. Robison Orsini, pela confecção dos desenhos e serviço de digitalização de fotografias.

A todos os amigos que me incentivaram e me apoiaram durante o tempo em que estive envolvido com o atual trabalho.

Dedico esse trabalho aos meus pais Gustavo Medeiros e Lais Araujo de Medeiros por terem sido o meu exemplo de perseverança e por terem me ensinado o caminho para uma vida honrada.

Ofereço essa tese à minha família Gisela e Juan Lucas, com quem compartilho os melhores momentos de minha vida.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
RESUMO.....	xxii
SUMMARY.....	xxiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Características do local.....	20
3.2. Características físico-químicas do solo.....	22
3.2.1. Retenção e condutividade da água no solo.....	24
3.3. Cultura.....	26
3.4. Delineamento experimental no campo.....	27
3.5. Manejo de irrigação no campo.....	29
3.6. Instalação e condução da cultura.....	29
3.6.1. Campo.....	30

3.6.2. Evapotranspirômetros.....	31
3.7. Balanço hídrico.....	33
3.7.1. Campo.....	33
3.7.2. Evapotranspirômetros.....	37
3.8. Evapotranspiração de referência (ET_0).....	38
3.8.1. Método do tanque classe A.....	38
3.8.2. Método de Penman Modificado.....	40
3.9. Coeficiente de cultura (k_c).....	41
3.10. Resistência estomática.....	42
3.11. Cobertura vegetal e índice de área foliar.....	43
3.12. Altura da planta.....	45
3.13. Fitomassa e produção final.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1. Condições climáticas.....	46
4.2. Irrigações.....	50
4.3. Tensão de água no solo.....	52
4.3.1. Campo.....	52
4.3.2. Evapotranspirômetros.....	57
4.4. Resistência estomática.....	59
4.4.1. Campo.....	59
4.4.2. Evapotranspirômetros.....	61
4.5. Desenvolvimento da cultura.....	62
4.5.1. Altura de planta.....	62

4.5.2. Porcentagem de cobertura vegetal.....	65
4.5.2.1. Campo.....	65
4.5.2.2. Evapotranspirômetros.....	67
4.5.3. Índice de área foliar.....	69
4.5.3.1. Campo.....	69
4.5.3.2. Evapotranspirômetros.....	72
4.5.4. Fitomassa.....	75
4.5.4.1. Campo.....	75
4.5.4.2. Evapotranspirômetros.....	79
4.5.5. Produção final.....	81
4.6. Balanço hídrico.....	85
4.6.1. Balanço hídrico nos evapotranspirômetros.....	85
4.6.2. Balanço hídrico no campo.....	89
4.7. Coeficiente de cultura.....	94
4.7.1. Evapotranspirômetros.....	94
4.7.2. Campo.....	98
4.8. Relação entre o coeficiente de cultura, porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) e índice de área foliar (IAF).....	102
4.8.1. Evapotranspirômetros.....	102
4.8.2. Campo.....	114
4.9. Análise temporal do coeficiente de cultura.....	117
5. CONCLUSÕES.....	127
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Mapa da área onde foi conduzido o experimento com cultura do feijoeiro, no CEC, na área experimental da Seção de Irrigação e Drenagem do IAC, em Campinas - SP.....	21
2	Esquema de instalação da estação evapotranspirométrica.....	28
3	Vista da cultura do feijoeiro semeada nos evapotranspirômetros, aos 35 DAE, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	32
4	Valores diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, e evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e do tanque classe A, no ano de 1994, ocorridas em Campinas - SP.....	47

Figura		Página
5	Evapotranspiração de referência acumulada, calculada pelos métodos de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e tanque classe A, ocorridas em 1994, em Campinas - SP.....	49
6	Lâminas de irrigação aplicadas durante o ensaio do feijoeiro no campo, em 1994, em Campinas-SP.....	51
7	Tensão da água no solo nas profundidades de 10 e 20 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 14 plantas/m ² , em Campinas - SP.....	53
8	Tensão da água no solo nas profundidades de 30, 40 e 50 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 14 plantas/m ² , em Campinas - SP.....	54
9	Tensão da água no solo nas profundidades de 10 e 20 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 28 plantas/m ² , em Campinas - SP.....	55

Figura		Página
10	Tensão da água no solo nas profundidades de 30, 40 e 50 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 28 plantas/m ² , em Campinas - SP.....	56
11	Tensão média de água no solo (kPa) e desvio padrão, determinada a 5 e 10 cm de profundidade nos evapotranspirômetros, através de sensor eletrométrico do tipo Colman e tensiômetros, respectivamente, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	58
12	Resistência estomática total medida em folhas do feijoeiro, nas diferentes densidades de semeadura e nos evapotranspirômetros, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	60
13	Altura média de planta (cm) da cultura do feijoeiro, e os respectivos desvios padrões, para as diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	63
14	Altura média de planta (cm) da cultura do feijoeiro nos evapotranspirômetros, e seus respectivos desvios padrões, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	64
15	Porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) da cultura do feijoeiro nos tratamentos de diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	66

Figura		Página
16	Porcentagem de cobertura vegetal média (%CVeg) da cultura do feijoeiro nos evapotranspirômetros, e desvios padrões, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	68
17	Índice de área foliar (IAF) da cultura do feijoeiro para as diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	70
18	Valores de porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) relacionados ao índice de área foliar (IAF) na cultura do feijoeiro, para os diferentes tratamentos de densidade populacional, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	73
19	Valores estimados de IAF para o feijoeiro plantado nos evapotranspirômetros ao longo do tempo, e valores medidos no dia do desbaste (25 DAE) e na colheita (83 DAE), no ano de 1994, em Campinas - SP.....	74
20	Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, assim como de suas componentes obtidas através da partição das plantas, para o tratamento de 14 plantas/m ² , no ano de 1994, em Campinas - SP.....	76
21	Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, assim como de suas componentes obtidas através da partição das plantas, para o tratamento de 28 plantas/m ² , no ano de 1994, em Campinas - SP.....	77

Figura		Página
22	Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, para diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	80
23	Curva do coeficiente de cultura basal do feijoeiro, calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), para períodos de 5 dias, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	96
24	Curva do coeficiente de cultura para o feijoeiro, com uma densidade populacional de 14 plantas/m ² , calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e tanque Classe A, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	99
25	Curva do coeficiente de cultura para o feijoeiro, com uma densidade populacional de 28 plantas/m ² , calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e tanque classe A, no ano de 1994, em Campinas - SP.....	100

Figura		Página
26	Coeficiente de cultura basal (k_{cb}) para a cultura do feijoeiro, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), durante o período de 4 a 24 DAE, em função da porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg), em Campinas - SP.....	104
27	Coeficiente de cultura basal (k_{cb}) para a cultura do feijoeiro, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), durante o período de 4 a 24 DAE, em função do índice de área foliar (IAF), no ano de 1994, em Campinas - SP.....	105
28	Varição do coeficiente de cultura basal (k_{cb}) com relação à porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg), para períodos seqüenciais de 5 dias, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), durante 27 a 58 DAE na cultura do feijoeiro em Campinas - SP.....	108
29	Varição do coeficiente de cultura basal (k_{cb}) com relação à porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg), para a cultura do feijoeiro, no período de 72 a 81 DAE, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), em Campinas - SP.....	111

Figura	Página
<p>30 Coeficiente de cultura (k_C), observado e simulado para o tratamento de 28 plantas/m², calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), em função da cobertura vegetal (%CVeg), durante o ciclo da cultura do feijoeiro, no ano de 1994, em Campinas - SP.....</p>	115
<p>31 Coeficiente de cultura (k_C), observado e simulado para o tratamento de 28 plantas/m², calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), em função do índice de área foliar (IAF), durante o ciclo da cultura do feijoeiro, no ano de 1994, em Campinas - SP.....</p>	116
<p>32 Curva do coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva do coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária da %CVeg, para uma população de 14 plantas/m², em função de dias após o plantio (DAP).....</p>	118

Figura		Página
33	Curva do coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva do coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária da %CVeg, e valores médios observados do coeficiente de cultura através da técnica do balanço hídrico de campo, para uma população de 28 plantas/m ² , em função de dias após o plantio (DAP).....	119
34	Curva do coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva do coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária do IAF, para uma população de 14 plantas/m ² , em função de dias após o plantio (DAP).....	120
35	Curva do coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva do coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária do IAF, e valores médios observados do coeficiente de cultura através da técnica do balanço hídrico de campo, para uma população de 28 plantas/m ² , em função de dias após o plantio (DAP).....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Análise física do Latossolo Roxo, unidade Barão Geraldo, Campinas, SP.....	23
2	Análise da fertilidade do Latossolo Roxo, unidade Barão Geraldo, Campinas - SP.....	23
3	Parâmetros da regressão do modelo de VAN GENUTCHEN (1980) para o Latossolo Roxo, unidade Barão Geraldo, Campinas - SP.....	25
4	Equações de primeiro grau para os tratamentos de diferentes densidades populacionais da cultura do feijão, no período de 41 a 75 DAE, no ano de 1994, em Campinas - SP. MS é a matéria seca total (g/m ²) e t corresponde a DAE.....	79
5	Produção final de grãos (kg/ha) para a cultura do feijoeiro, nos diferentes tratamentos de densidade populacional (14 e 28 plantas/m ²) e nos evapotranspirômetros (ETM), no ano de 1994, em Campinas-SP.....	82

Tabela		Página
6	Componentes de produção da cultura do feijoeiro, nos diferentes tratamentos de densidade populacional (14 e 28 plantas/m ²) e nos evapotranspirômetros (ETM), no ano de 1994, em Campinas - SP.....	83
7	Evapotranspiração (ET) medida nos evapotranspirômetros, e evapotranspiração de referência (ET ₀), calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981).....	87
8	Componentes do balanço hídrico de campo: precipitação, irrigação, variação do armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda (Ds) e evapotranspiração (ET) na cultura do feijoeiro, com densidade de semeadura de 14 plantas/m ² , no ano de 1994, em Campinas - SP.....	90
9	Componentes do balanço hídrico de campo: precipitação, irrigação, variação do armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda (Ds) e evapotranspiração (ET) na cultura do feijoeiro, com densidade de semeadura de 28 plantas/m ² , no ano de 1994, em Campinas - SP.....	91
10	Eficiência do uso da água medido nos evapotranspirômetros, a uma densidade de semeadura de 50 plantas/m ² , e nas condições de campo para o tratamento de 28 plantas/m ² , no período anterior ao raleamento (6 a 25 DAE).....	92

Tabela	Página
11 Eficiência do uso da água medido nos evapotranspirômetros, a uma densidade de semeadura de 25 plantas/m ² , e nas condições de campo para o tratamento de 28 plantas/m ² , no período posterior ao raleamento (26 a 76 DAE).....	93
12 Eficiência do uso da água medido nos evapotranspirômetros (ETM), e nas condições de campo para o tratamento de 28 plantas/m ² , durante todo o ciclo.....	93
13 Variação de k_{cb} com relação à porcentagem de cobertura vegetal, para cada evapotranspirômetro (ETM), no período de 6 a 16/11/94 (fase de decréscimo da cobertura vegetal) para a cultura do feijoeiro, em Campinas - SP.....	112
14 Relação entre %CVeg e k_{cb} para as fases de crescimento ativo da cultura, fase de estabilização do valor de k_{cb} e fase de senescência.....	113
15 Valores adotados de coeficiente de cultura (k_c) para a cultura do feijoeiro, de acordo com metodologia proposta por DOORENBOS & PRUITT (1976), no período de agosto a novembro de 1994, em Campinas - SP.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS

θ : umidade volumétrica de água no solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);

K_r : condutividade hidráulica relativa do solo (cm/dia);

K_0 : condutividade hidráulica do solo saturado (cm/dia);

$K(\theta)$: condutividade hidráulica em função da umidade θ do solo (cm/dia);

ET : evapotranspiração, refere-se à perda de vapor de água por evaporação e transpiração de uma superfície vegetada sobre um dado período de tempo, podendo ser expressa como taxa total ou média em unidades de massa ou volume por unidade de área ou como uma altura equivalente de água para o período de interesse (PERRIER, 1984);

ET_m : evapotranspiração máxima, ocorre na cultura isenta de doenças, crescendo em um campo extenso (um ou mais hectares) em condições ótimas de solo, com fertilidade e água suficientes, alcançando-se a plena produção potencial com respeito ao meio vegetativo dado (DOORENBOS & KASSAN, 1979);

ETP : evapotranspiração potencial, corresponde à água evapotranspirada de uma superfície natural coberta por uma vegetação de baixo porte em fase de desenvolvimento ativo e sem restrição hídrica, sendo função somente das condições climáticas (THORNTHWAITE, 1944);

ET₀ : evapotranspiração de referência, no presente trabalho é a evapotranspiração calculada pelos métodos de Penman modificado e tanque classe A;

E_{pan} : evaporação média diária do tanque classe A no período considerado (mm/dia);

k_p : coeficiente do tanque determinado de acordo com metodologia descrita em DOORENBOS & PRUITT (1976);

k_c : coeficiente de cultura;

k_{cb} : coeficiente de cultura basal;

k_a : coeficiente relacionado à disponibilidade de umidade do solo para a transpiração da planta;

k_s : coeficiente de incremento à ET devido ao molhamento da superfície do solo após a chuva ou irrigação;

IAF : índice de área foliar;

%CVeg : porcentagem de cobertura vegetal;

DAE : dias após a emergência;

DAP : dias após o plantio;

MS : matéria seca;

FAO : Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo investigar o efeito do enfolhamento vegetal sobre o consumo de água e o coeficiente de cultura (k_c) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), var. Carioca 80 - SH. O experimento de campo foi conduzido no Centro Experimental de Campinas, do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo, em Campinas-SP, no período de agosto a novembro de 1994. Duas condições foram investigadas: a) cultura semeada em evapotranspirômetros a uma densidade populacional de 50 plantas/m² sendo depois reduzida para 25 plantas/m², quando a cobertura vegetal recobriu o solo totalmente pela primeira vez; b) cultura semeada sob duas densidades, a 14 plantas/m² e 28 plantas/m², em 8 parcelas experimentais no campo. O coeficiente de cultura basal (k_{cb}) proposto por WRIGHT (1981) foi determinado através dos evapotranspirômetros, e relacionado a parâmetros de desenvolvimento da cultura como porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) e índice de área foliar (IAF). Como resultado obteve-se que o desenvolvimento da cultura influenciou diretamente o consumo de água da cultura até que 82% de cobertura vegetal ou índice de área foliar 3,2 fosse atingido, quando o coeficiente de cultura basal tornou-se independente do enfolhamento vegetal, podendo-se assumir o valor de

1,0 a 1,2. Conseqüentemente, o período mais favorável para melhorar o manejo da irrigação, é a fase de cobertura incompleta do solo quando ocorre uma grande variação nos valores de k_c . Concluiu-se ainda que a expressão do coeficiente de cultura basal em função da porcentagem de cobertura vegetal ou índice de área foliar permitem a determinação de k_{cb} para diferentes condições de cultivo. Uma comparação entre três métodos de estimativa de k_c foi realizado para os dados observados nos dois tratamentos de população de plantas. O primeiro método usou os valores de k_c definidos pela FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1976). O segundo método utilizou o coeficiente de cultura basal simulado através da relação entre k_{cb} versus %CVeg e IAF somado à correção para o primeiro dia após a irrigação, considerando o seu valor igual a 1,0. O terceiro método usou o coeficiente de cultura calculado pelo balanço hídrico de campo e pela evapotranspiração de referência (Penman). Os resultados mostraram que o uso de k_{cb} somado à informação de molhamento da superfície do solo poderia considerar melhor as várias situações de plantio comercial, do que o uso de valores propostos pela FAO. Além disso, há indicações de que o estresse hídrico moderado no feijoeiro afetou os valores de k_c , sendo necessário ser melhor avaliado.

SUMMARY

This work investigated the effect crop development on the water consumption and crop coefficient (k_c) of bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.), var. Carioca 80 - SH. A field experiment was carried out at Centro Experimental de Campinas - Instituto Agronômico, Campinas - SP, from August to November of 1994. Two conditions were investigated : a) crop planted in evapotranspirometers with 50 plants/m² populational density and reduced to 25 plants/m² populational density, when the canopy first achieved full ground cover; b) crop planted on two populational densities, 14 plants/m² and 28 plants/m², on 8 large plots in the field. The basal crop coefficient (WRIGHT, 1981) was determined using the evapotranspirometers and it was related with vegetative percent cover (%GC) and leaf area index (LAI). The canopy development influenced directly the water consumption until 82% vegetative cover and LAI 3.2, when k_{cb} became constant and equal to 1.0 - 1.2. Consequently, the most favorable period to improve irrigation management was the phase of incomplete ground cover when occurs large variation on k_c values. A basal crop coefficient curve as related with %GC or LAI permits the k_{cb} determination to different crop development conditions in the field. A

comparasion among three methods of k_C estimations was performed for the field data observed in the two plant population treatments. The first method used k_C values as defined by FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1976). The second method used the basal crop coefficient, as determined at the evapotranspirometers, and simulated through the relationship between k_{Cb} versus %GC and LAI, plus a correction for the first day after irrigation, considering k_{Cb} as 1,0. The third method used the actual crop coefficient calculated from field water balance and reference crop evapotranspiration (Penman). The results showed that the use of k_{Cb} plus information of wetting of soil surface could attempt for the various situations of comercial planting than the use of k_C values as proposed by FAO. Moreover, there are indications that a moderate water stress reduced k_C values, therefore an improvement in this evaluation is necessary for irrigation management of field beans.

1. INTRODUÇÃO

A correta determinação do consumo de água de uma cultura é uma informação essencial para a racionalização do uso de recursos hídricos na agricultura. A estimativa desse consumo através de métodos diretos é de difícil viabilização prática. Por isso é utilizado com freqüência a estimativa indireta do requerimento de água pela cultura através do uso do coeficiente de cultura.

Esse coeficiente, combinado com estimativas da evapotranspiração de referência, permite o razoável conhecimento da demanda hídrica da planta e conseqüentemente auxilia no manejo de sistemas de irrigação.

Nos trabalhos de investigação do coeficiente de cultura, a metodologia mais utilizada para se determinar o consumo de água das plantas é através do balanço hídrico em condições de campo e em lisímetros. A transferibilidade das curvas do coeficiente de cultura geradas nesses trabalhos para lavouras irrigadas é prejudicada pela diferença das condições de manejo de água, solo e planta entre os experimentos e cultivos comerciais, limitando a utilização desses resultados.

O coeficiente de cultura é afetado pelas condições de molhamento e secamento do solo e pelo desenvolvimento da planta. Conseqüentemente, estes fatores devem ter uma avaliação particularizada a fim de se estimar a sua influência no valor final do coeficiente de cultura.

JENSEN et al. (1971) desmembraram o coeficiente de cultura para se levar em conta os fatores de solo e planta intervenientes no valor do coeficiente de cultura.

WRIGHT (1981) posteriormente aprimorou esse modelo e propôs a nomenclatura da componente atualmente conhecida como coeficiente de cultura basal (k_{cb}).

O coeficiente de cultura basal é a componente relacionada diretamente à planta, correspondendo a uma condição de evaporação de solo mínima mas com uma umidade do solo na zona radicular adequada, não limitando o crescimento da planta ou transpiração.

Vários autores, nos últimos anos, tem relacionado a transpiração potencial e evapotranspiração da planta a parâmetros de desenvolvimento da planta e à evapotranspiração potencial ou à de referência (ADAMS et al., 1976; AL-KAISI et al., 1989; RITCHIE & JOHNSON, 1990; entre outros). Além disso, ARRUDA (1987) baseado em análise de WIT (1958) e ARKLEY (1963) coloca que para se obter a máxima produção de biomassa, e possivelmente de grãos, deve-se também maximizar a transpiração da planta.

O presente trabalho teve por objetivo geral estudar o consumo de água da cultura do feijoeiro, o seu respectivo coeficiente de cultura, os fatores intervenientes do sistema solo-planta-atmosfera, e os fatores que viabilizem a sua fácil transferência para a irrigação de lavouras comerciais.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar a variação do consumo de água e da produtividade da cultura do feijão em diferentes populações e disponibilidades de água no solo, para aferir o efeito de um único valor de coeficiente de cultura.
- Estudar a variação do coeficiente de cultura basal em função do desenvolvimento vegetativo da cultura, indicado pelo índice de área foliar e porcentagem de cobertura vegetal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A evapotranspiração (ET) é a perda de vapor de água por evaporação e transpiração de uma superfície vegetada sobre um dado período de tempo. Inclui a evaporação da água do solo, do orvalho e da precipitação interceptada pela vegetação, assim como a transpiração da planta, podendo ser expressa como taxa total ou média em unidades de massa ou volume por unidade de área ou como uma altura equivalente de água para o período de interesse (PERRIER, 1984).

A sua determinação é uma importante informação para o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação com ou sem limitação de água.

O requerimento de água das culturas pode ser bastante variável com as condições mesológicas, e necessita ser acuradamente determinado para se garantir um eficiente e econômico uso da água na produção vegetal.

Os fatores mais importantes que determinam o requerimento de água pela cultura são, em ordem de importância, segundo DOORENBOS & PRUITT (1976): o clima, a cultura e suas características de crescimento, umidade do solo, prática agrícola e de irrigação, e outros fatores que influenciam a taxa de crescimento (fertilizantes, doenças, infestações, etc.) .

Assim, em função dos fatores físicos e biológicos intervenientes no fenômeno da evapotranspiração, diversos métodos foram desenvolvidos para estimar as necessidades hídricas das culturas. DOORENBOS & PRUITT (1976) citam em torno de

trinta e dois métodos desenvolvidos em diferentes partes do mundo e os respectivos dados requeridos por cada método.

Um dos métodos mais utilizados, em irrigação, para se avaliar o consumo de água de lavouras comerciais é através do cálculo da evapotranspiração máxima (ET_m). De acordo com DOORENBOS & KASSAN (1979), a taxa de evapotranspiração máxima (ET_m) ocorre na cultura isenta de doenças, crescendo em um campo extenso (um ou mais hectares) em condições ótimas de solo, com fertilidade e água suficientes, alcançando-se a plena produção potencial com respeito ao meio vegetativo dado. O cálculo de ET_m é feito através da seguinte relação:

$$ET_m = k_c * ET_0 \quad (1)$$

onde,

k_c - coeficiente de cultura (adimensional);

ET_0 - evapotranspiração de referência.

A FAO através de seus boletins nº 24 (DOORENBOS & PRUITT, 1976), e nº 33 (DOORENBOS & KASSAN, 1979) foi a que melhor avançou na operacionalização e divulgação no conceito apresentado através da equação 1. Esses boletins sintetizam informações e sistematizam procedimentos para determinar a evapotranspiração de referência e máxima das culturas econômicas.

Desta forma, através da equação (1), temos o cálculo de ET_m através de um fator ligado ao clima (ET_0) e de um outro fator ligado à cultura e a fatores do meio.

A literatura tem apresentado diferentes definições para o termo ligado ao clima, no cálculo do coeficiente de cultura.

Alguns autores utilizam-se de métodos de estimativa da evapotranspiração potencial (RITCHIE & JOHNSON, 1990; AL-KAISI et al., 1989, entre outros).

O termo evapotranspiração potencial (ETP) foi introduzido por THORNTON (1944), o qual corresponde à água evapotranspirada de uma superfície natural coberta por uma vegetação de baixo porte em fase de desenvolvimento ativo e sem restrição hídrica, sendo função somente das condições climáticas.

BURMAN et al. (1980) coloca que essa definição não especifica a cultura ou seu estágio de desenvolvimento. Desde que esta definição não está restrita para uma superfície padrão, ela tem tido um uso direto limitado em irrigação.

Esses problemas com a conceituação de ETP levaram ao desenvolvimento do conceito de evapotranspiração de referência, o qual é comumente utilizado em manejo de irrigação (HATFIELD, 1990).

A evapotranspiração de referência (ET_0) é a evapotranspiração de uma dada cultura bem adaptada e escolhida para servir de referência dentro de dadas condições climáticas, sob condições advectivas adequadas (efeito de advecção desprezível) e com um regime padronizado de fornecimento de água, apropriado para essa cultura e para a região considerada (PERRIER, 1984).

Duas são as culturas comumente utilizadas como referência para a estimativa de ET_0 : a grama e a alfafa.

Tanto a FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1976) como WRIGHT & JENSEN (1972) adaptaram métodos para estimar a evapotranspiração de referência para as culturas citadas.

A adoção da cultura da alfafa por WRIGHT & JENSEN (1972) deveu-se principalmente à sua densa cobertura vegetal, a sua baixa resistência à difusão de vapor d'água, e por ser aerodinamicamente rugosa.

Essa cultura apresenta valores de ET_0 maiores se comparados com os obtidos utilizando-se a grama como cultura de referência. Conseqüentemente, existem

diferenças entre as curvas do coeficiente de cultura de acordo com a cultura de referência adotada.

No Brasil, tem-se inúmeros trabalhos conduzidos com a grama batatais para o estabelecimento da evapotranspiração de referência, não se tendo notícias de pesquisas conduzidas com a alfafa para o estabelecimento de ET_0 (SEDIYAMA, 1995).

As definições e conceitos referentes à evapotranspiração real, máxima, potencial e de referência não apresentam, ainda, um consenso entre os vários autores, discussão específica pode ser encontrada em PERRIER (1984), SEDIYAMA (1995), entre outros.

Entre os métodos para determinação da evapotranspiração de referência dois podem ser destacados: o método de Penman e o do tanque classe A.

O método de Penman, elaborado em 1948, combina os efeitos do balanço de energia e da transferência aerodinâmica do vapor d'água com um mínimo de empirismo. Montheith modificou o método em 1963 para incluir os termos de resistência, levando em conta efeitos específicos da planta como morfologia, cultura e estômato da folha (WRIGHT, 1985).

A utilização do método de Penman em diferentes climas têm sofrido alterações para adaptação às condições locais como o efeito do vento, levando à calibração do termo aerodinâmico como ocorreu em DOORENBOS & PRUITT (1976), WRIGHT & JENSEN (1972), VILLA NOVA & OMETTO (1981).

O tanque evaporimétrico é um outro método muito utilizado para estimar ET_0 , o qual permite medir os efeitos integrados da radiação, vento, temperatura e umidade relativa do ar em função da evaporação de uma superfície de água livre.

A sua principal vantagem é seu baixo custo e fácil operação, sendo muito utilizado em planejamento de irrigação.

A relação entre a evaporação do tanque com a da cultura de referência, é feita através de coeficientes obtidos empiricamente que levam em conta o clima, tipo de tanque e meio circundante.

No Brasil, pesquisas tem revelado boa correlação e concordância entre os coeficientes culturais gerados, utilizando o tanque classe A, e outros métodos como Penman, Penman modificado e Radiação solar (ENCARNAÇÃO, 1987; BARBIERI, 1981; CURY, 1985).

Os métodos utilizados para determinar a evapotranspiração máxima e evapotranspiração de referência, podem ser divididos em diretos e indiretos (BURMAN et al., 1980). Entre os métodos diretos inclui-se o balanço hídrico de campo e o uso de lisímetros.

O boletim da FAO nº 39 (ABOUKHALED et al., 1982) apresenta uma revisão dos vários tipos de lisímetros utilizados em pesquisa sobre o consumo de água, em diferentes partes do mundo. Nesse trabalho, os autores dividem os lisímetros em duas categorias, conforme a utilização ou não de mecanismos de pesagem para a determinação do consumo de água.

Os lisímetros de pesagem apresentam maior precisão, e podem ser utilizados para a tomada de medidas horárias, porém apresentam um custo elevado.

Os lisímetros que não apresentam mecanismos de pesagem diferenciam-se pela forma de suprimento de água, podendo ser através de chuva e irrigação (lisímetros de drenagem), ou através da manutenção artificial de um nível de lençol freático abaixo da superfície do solo dos lisímetros (evapotranspirômetros).

No Brasil, desde a última década, o uso de evapotranspirômetros para a determinação da evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura para diversas culturas, tem se tornado freqüente devido à sua simplicidade de instalação, operação e baixo custo.

Nesses trabalhos os autores utilizam principalmente de diferentes formas de estimativa de ET_0 para a determinação de k_c , apresentado-o em função da idade da planta, como sugerido pela FAO (CURY, 1985; BARBIERI, 1981; ENCARNAÇÃO, 1980; ENCARNAÇÃO, 1987; MOURA, 1990).

Aparentemente, para uma considerável parte dos autores brasileiros, o coeficiente de cultura tem sido tomado como um simples coeficiente de ajuste entre ET_0 e ET_m .

Um dos principais problemas da utilização das curvas de coeficiente de cultura derivadas de trabalhos desenvolvidos em evapotranspirômetros é a transferibilidade dessas curvas para as condições de campo, pois estas simulam somente a evapotranspiração máxima nas condições de manejo de água e cultura realizado nos evapotranspirômetros.

Nas condições de campo, o solo e a cultura terão períodos de máxima perda de água, logo após a chuva e irrigação, e períodos em que esta perda sofrerá reduções devido à limitação de água no solo. Por isso, da forma como está apresentado o coeficiente de cultura, ocorre uma simulação da evapotranspiração máxima da cultura (ET_m), e não da evapotranspiração (ET) que é de maior interesse para o manejo de irrigação.

Na primeira citação sobre o coeficiente de cultura, feita através de VAN WIJK & DE VRIES (1954), o coeficiente de cultura é definido como um fator de redução da evapotranspiração potencial (ETP), determinado pela resistência à difusão de vapor de água pelos estômatos, o qual será dependente do clima, tensão de água no solo e tratamento dado à planta como corte das folhas. O seu valor máximo deverá igualar a evapotranspiração da cultura (ET) à evapotranspiração potencial (ETP).

Portanto, este coeficiente tem complexo significado físico e implicações biológicas que necessitam ser melhor compreendidos e modelados.

Existem alguns estudos (por exemplo BRUNINI, 1981), relacionados ao efeito da seca ou da demanda evaporativa sobre a evapotranspiração, porém pouco se tem investigado sobre o efeito do molhamento e secamento do solo, além do tamanho do dossel vegetativo no coeficiente de cultura.

Uma evolução do conceito de coeficiente de cultura é o seu desmembramento em componentes, proposto por JENSEN et al. (1971) e aprimorado por WRIGHT (1981), através da seguinte relação:

$$k_c = k_a * k_{cb} + k_s \quad (2)$$

onde,

k_{cb} - coeficiente de cultura basal, obtido quando a evaporação do solo é mínima mas a umidade do solo na zona das raízes é adequada, não limitando o crescimento da planta ou transpiração;

k_a - coeficiente relacionado à disponibilidade de umidade do solo;

k_s - coeficiente de incremento relacionado ao umedecimento da superfície após chuva ou irrigação.

O termo k_a da equação 2 (JENSEN et al., 1971) tem sido assumido como:

$$k_a = \frac{\ln(AD + 1)}{\ln 101} \quad (3)$$

onde,

AD - porcentagem de água disponível do solo.

O valor de k_s (JENSEN et al., 1971) varia de acordo com a seguinte relação:

$$k_s = (k_1 - k_{c1}) * e^{-zt}, \quad k_1 > k_{c1} \quad (4)$$

onde,

k_1 - máximo valor de k_c , ocorrendo após chuva ou irrigação;

t - número de dias após chuva ou irrigação;

z - coeficiente que representa o efeito combinado de demanda evaporativa, características do solo, etc.;

k_{c1} - representa o valor de k_c médio no tempo que a chuva ocorreu.

WRIGHT (1981) propõe a seguinte forma para o cálculo do termo k_s :

$$k_s = f_w * (k_1 - k_{cb}) * \left(1 - \sqrt{\frac{t}{t_d}}\right) \quad (5)$$

onde,

k_1 - máximo valor de k_c , ocorrendo após chuva ou irrigação;

t - número de dias após chuva ou irrigação;

t_d - número usual de dias para a superfície do solo secar;

f_w - porção relativa da superfície do solo originalmente molhada.

Os referidos autores sugerem valores para os coeficientes no uso das equações 4 e 5. Certamente, há a necessidade de determiná-las localmente para melhor emprego e resultado das equações (WRIGHT, 1985).

Tentativas de modelagem dos termos dos termos k_{cb} , k_a , k_s tem sido feitas de forma empírica por alguns autores, inclusive WRIGHT (1981) e (1982), PHENE et al. (1985), KERR et al. (1993) entre outros.

O modelo inicialmente desenvolvido por JENSEN et al. (1971) e subseqüentes, apresenta um coeficiente que não é só função da idade da planta, mas também do molhamento e secamento do solo.

WRIGHT & JENSEN (1978), por exemplo, desenvolveram a curva de coeficiente de cultura para o feijão na região sudeste de Idaho. Neste caso, os autores ajustaram os dados de k_{cb} a curvas polinomiais da seguinte forma:

$$k_{cb} = C_1 + C_2X + C_3X^2 + \dots + C_NX^{N-1} \quad (6)$$

onde,

X - base de tempo composta pela porcentagem de tempo do plantio à cobertura total, e dias decorridos após a cobertura total.

BURMAN et al. (1980) incluíram tabelas de coeficientes de cultura melhorados para o uso da forma da equação 1. WRIGHT (1982), utilizando de procedimentos citados em JENSEN et al. (1971) e WRIGHT & JENSEN (1978), desenvolveu curvas de coeficiente de cultura basal (k_{cb}) a partir de dados experimentais, para várias culturas.

O coeficiente de cultura basal quando combinado com estimativas melhoradas de solo úmido, deve permitir avaliações mais exatas de evapotranspiração da cultura diária, melhor planejamento do sistema de irrigação e estimativas mais confiáveis de requerimento de água (WRIGHT, 1982).

O trabalho de WRIGHT (1982) influenciou grandemente os estudos sobre coeficiente de cultura nos Estados Unidos, levando a uma proliferação de curvas do coeficiente de cultura seguindo essa metodologia, em vários locais (STEGMAN, 1988).

O coeficiente de cultura, de forma ampla, tem sido apresentado como função do estágio de desenvolvimento, com o número de dias especificado (DOORENBOS & PRUITT, 1976), ou como porcentagem do tempo de plantio à cobertura total e dias decorridos após a cobertura total (JENSEN et al., 1971; WRIGHT & JENSEN, 1978; WRIGHT, 1982), ou como porcentagem de tempo de colheita a colheita, como no caso da alfafa (WRIGHT, 1982). Esses procedimentos assumem a taxa de desenvolvimento da cultura como constante de ano para ano, não variando com o local, tendo a mesma taxa de desenvolvimento da cultura usada na época da determinação da curva do coeficiente de cultura, e presumem o fechamento da cultura, o que muitas vezes não ocorre na prática (RITCHIE & JOHNSON, 1990).

Na realidade nem sempre se consegue manter as condições de produção máxima seja por problemas climáticos, estresse hídrico da cultura, fertilidade do solo ou outros fatores que podem influir na taxa de crescimento da cultura (doenças, infestações, etc.). Além disso, manejos culturais regionais podem afetar o requerimento de água da cultura (por exemplo, população da cultura).

As condições climáticas, as quais variam de ano para ano, afetam o coeficiente de cultura pois a temperatura do ar, radiação e frequência da chuva afetam diretamente tanto a evaporação do solo, quanto a transpiração da planta. A temperatura afeta também a taxa de desenvolvimento da cultura.

Desta forma, uma curva de coeficiente de cultura elaborada numa base de tempo estará refletindo o momento histórico das condições ambientais e de manejo pelos quais passou a cultura durante o seu ciclo, impossibilitando a sua transferibilidade para outras condições diferentes daquelas reinantes no momento de sua confecção.

Por isso há a necessidade de se correlacionar o coeficiente de cultura com parâmetros de desenvolvimento da planta a fim de que se possa estimar a evapotranspiração da cultura em função das condições apresentadas por esta no campo.

HEERMANN (1988) sugere o desenvolvimento de uma relação funcional para o coeficiente de cultura dependente do desenvolvimento da cultura, e a incorporação de modelos de crescimento da planta para uma melhor estimativa do consumo de água.

Seguindo essa linha de pesquisa, NEALE & BAUSCH (1985) propuseram uma técnica que utiliza a radiação refletida pelo dossel como meio de efetivamente monitorar o atual crescimento da cultura no campo em tempo real, e usaram essa informação para deduzir coeficientes de cultura confiáveis, os quais poderão ser utilizados como dado de entrada em modelos de planejamento de irrigação.

Uma forma de se avaliar o desenvolvimento da cultura em função da condição climática reinante durante o ciclo vegetativo, e como isto afeta o consumo de água, diz respeito à relação entre o coeficiente de cultura com graus dia de crescimento ou fração unidade térmica.

De acordo com SAMMIS et al. (1985), o desenvolvimento da cultura é geralmente dependente de unidade de calor, e um "relógio fisiológico" (sic), pode ser desenvolvido baseado em graus dia de crescimento (G), o qual é calculado como:

$$G = \frac{(T_{MÁX} - T_{MÍN})}{2} - T_{BASE} \quad (7)$$

onde,

$T_{MÁX}$: temperatura máxima diária do ar(°C);

$T_{MÍN}$: temperatura mínima diária do ar(°C);

T_{BASE} : temperatura base (°C).

Para algumas culturas, limites de $T_{MÁX}$ e $T_{MÍN}$ foram estabelecidos além do qual nenhum grau dia de crescimento foi acumulado. O coeficiente de cultura foi então determinado em função dos dias graus dia de crescimento acumulado, da seguinte forma:

$$k_c = B_0 + B_1 \sum G + B_2 \sum G^2 + B_3 \sum G^3 \quad (8)$$

Esse tipo de modelagem leva em conta as diferenças que ocorrem no desenvolvimento da cultura, e conseqüentemente no consumo de água, devido à variação de temperatura que ocorre de ano para ano e dentro do mesmo ano.

Porém, curvas geradas através dessa metodologia não levam em conta as variações de desenvolvimento da cultura devido à ocorrência de doenças ou problemas de fertilização, assumindo um desenvolvimento potencial da cultura.

Outros autores optaram pela separação da evapotranspiração em evaporação do solo e transpiração da planta, correlacionando com a demanda evaporativa da atmosfera, parâmetros de desenvolvimento da cultura e propriedades hidráulicas do solo.

Foi o que aconteceu com RITCHIE & BURNETT (1971) em estudo realizado com algodão e sorgo no Texas. Os autores constataram que a transpiração da planta (T), em uma condição de suprimento adequado de água no solo, era influenciada por fatores de planta, como o índice de área foliar (IAF), e pelo clima através da evapotranspiração potencial (ETP), estimada pelo método de Penman. A transpiração era calculada pela seguinte relação:

$$T = ETP(-0,21 + 0,70 \cdot IAF^{1/2}) \quad 0,1 \leq IAF \leq 2,7 \quad (9)$$

A partir de um IAF de 2,7, para ambas as culturas, a evapotranspiração praticamente independe de fatores relacionados à planta, igualando-se à evapotranspiração potencial. Esse valor de IAF correspondeu ao necessário para a transpiração da planta equivar-se a 90% da evapotranspiração potencial, numa condição de evaporação do solo mínima.

Posteriormente, RITCHIE (1972) propôs um modelamento para a evaporação do solo, onde o autor divide este fenômeno em dois estágios. O 1º estágio é caracterizado por apresentar uma taxa constante e potencial, no qual a evaporação do solo é limitada só pelo suprimento de energia à superfície. No 2º estágio, a evaporação sob o dossel é assumida como idêntica à evaporação de um solo nu, pois neste estágio a evaporação do solo depende mais das propriedades hidráulicas do solo.

Outros autores realizaram determinações de evaporação de solo e planta baseados nos resultados de RITCHIE (1972). Este foi o caso de ADAMS et al. (1976), AL KHAFAT et al. (1978), entre outros.

ADAMS et al. (1976), utilizando-se de placas de evaporação colocadas sob o dossel de uma cultura de sorgo, deduziram relações empíricas para a determinação da evaporação do solo no 1º estágio (E_{so}) correlacionado com a porcentagem de cobertura vegetal e evapotranspiração potencial, na seguinte forma:

$$E_{so} = ETP \cdot e^{(-0,017 \cdot \%CVeg)} \quad (10)$$

Em termos de coeficiente de cultura, AL-KAISI et al. (1989) determinaram evapotranspiração e transpiração, através de lisímetros de pesagem, para o milho em Dakota utilizando a equação de Jensen-Haise para determinar ETP. Esses autores correlacionaram o coeficiente de cultura com o IAF. O modelo que melhor se adaptou foi:

$$k_c = 0.239 + (1 - e^{-0.319(IAF)}) \quad n=28 \quad r=0,82 \quad (11)$$

Uma outra proposta de coeficiente de cultura foi feita por RITCHIE & JOHNSON (1990), onde os autores utilizam basicamente o trabalho de RITCHIE (1972) para calcular o coeficiente de cultura. A evaporação do solo foi calculada da seguinte forma:

1º estágio de evaporação do solo (E_{s0}):

$$E_{s0} = ETP(1 - 0,43 \cdot IAF) \quad IAF < 1,0 \quad (12)$$

$$E_{s0} = \left(\frac{ETP}{1,1} \right) \cdot e^{-0,4 \cdot IAF} \quad IAF \geq 1,0 \quad (13)$$

2º estágio de evaporação do solo (E_s):

$$\sum E_s = \alpha \cdot t^{1/2} \quad (14)$$

onde α é determinado experimentalmente para dados de evaporação do solo acumulativa para um ciclo singular de secagem de um dado solo.

A transpiração é obtida por:

$$T = ETP \cdot (1,0 - e^{-IAF}) \quad IAF \leq 3,0 \quad (15)$$

$$T = ETP \quad IAF > 3,0 \quad (16)$$

O cálculo do coeficiente de cultura é feito por:

$$k_c = \frac{(E_s + T)}{ETP} \quad (17)$$

Trabalhos como os aqui apresentados mostram a estreita relação da evaporação, transpiração e coeficiente de cultura com fatores ligados ao desenvolvimento da planta.

A proposta de desmembramento do coeficiente de cultura feita por JENSEN et al. (1971) e aprimorada por WRIGHT (1981) visa obter coeficientes relacionados à transpiração, como k_{cb} , ao umedecimento (k_s) e secagem do solo (k_a).

Como pôde-se observar, um coeficiente relacionado mais especificamente à transpiração da planta, deve ser função de um parâmetro que leve em conta o desenvolvimento apresentado pela cultura no campo, como o índice de área foliar e a porcentagem de cobertura vegetal.

No Brasil, nos últimos anos, poucos trabalhos relacionados ao coeficiente de cultura atentaram para o seu real significado, limitando-se à simples determinação de k_c em função do tempo.

Entre esses poucos trabalhos destaca-se MELLO (1992), a qual determinou curvas de coeficiente de cultura basal (k_{cb}) da cultura da ervilha, relacionadas ao índice de área foliar (IAF) e porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg). O modelo para correlação entre k_{cb} e %CVeg encontrado, com diferentes populações de planta, foi:

$$k_{cb} = 0.36 + 0.012*(\%CVeg) - 0.000063*(\%CVeg)^2 \quad r^2 = 0.82 \quad (18)$$

A relação entre k_{cb} e IAF foi feita até o valor de IAF igual a três, pois a partir deste valor k_{cb} se estabilizou entre 0,95 e 1,0. Encontrou-se a seguinte relação:

$$k_{cb} = 0.49 + 0.1863*(IAF) \quad r^2 = 0.82 \quad (19)$$

PAVANI (1985) determinou a curva de coeficiente de cultura para o feijão numa base temporal, porém o autor destaca que o valor do coeficiente de cultura foi dependente da variação do IAF. Essa mesma conclusão foi tirada em trabalho realizado por BASTOS & LUNARDI (1995), trabalhando com a cultura da alface em evapotranspirômetros.

Relacionar k_{cb} à parâmetros como índice de área foliar e cobertura vegetal possibilita a transferência da informação para outras regiões, pois elimina as diferenças existentes entre a parcela experimental e a lavoura comercial quanto ao desenvolvimento vegetativo, decorrentes da população, adubação, época de plantio, etc. Além disso, esta forma de se apresentar o coeficiente de cultura é bem aplicável a programas de controle de irrigação, já que podem ser facilmente incorporadas a rotinas de cálculo computacional, devido à sua representação matemática simples.

Alguns autores no Brasil tem constatado a relação entre a evapotranspiração e o índice de área foliar como OLIVEIRA et al. (1993), OLIVIERA & SILVA (1990), MOURA (1990), e GUANDIQUE (1993) porém, como discutido anteriormente, o clima e a umidade do solo também influem no processo, concluindo-se assim que uma relação entre o coeficiente de cultura e parâmetros de desenvolvimento da cultura pode melhor estimar o consumo de água da planta.

Recentemente, alguns autores tem atentado para a ineficácia de se relacionar o coeficiente de cultura com a idade da planta numa base cronológica. Trabalhos apresentados nos últimos congressos nacionais tem mostrado relações desenvolvidas entre k_c e parâmetros de desenvolvimento da cultura (GONÇALVES et al., 1995), e a

utilização do modelo de RITCHIE (1972) (RODRIGUES et al., 1995; MANTOVANI et al., 1995).

Um outro aspecto importante com relação ao consumo de água da cultura é abordado por ARRUDA (1987). Esse autor, baseado em análise de WIT (1958) e ARKLEY (1963), afirma que para se obter máximas produções de biomassa e possivelmente grãos, deve-se também maximizar a transpiração da planta. Desta forma, o manejo de irrigação deve evitar a ocorrência de déficit hídrico que venha a impor restrições à taxa de transpiração da planta, para se evitar decréscimo na produção, especialmente no período crítico.

Portanto, conclui-se que uma curva de k_{cb} representará o manejo de água que levará à potencialização da produção pela cultura, demonstrando-se assim a importância de seu estudo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características do local

O trabalho foi desenvolvido no Centro Experimental de Campinas (CEC), na área de pesquisa da Seção de Irrigação e Drenagem, do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo (IAC). As coordenadas do local são longitude de 47°04'43"W e latitude de 22°52'00"S. A Fig. 1 apresenta um croqui da área onde foi desenvolvido o ensaio, assim como a localização das parcelas.

O clima da região é do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen (OMETTO, 1981), definido como inverno seco, temperatura do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio inferior a 18 °C. Os valores normais de precipitação anual são de 1.365 mm, evapotranspiração potencial anual de 955 mm, com excedente hídrico de 433 mm, e deficiência hídrica de 23 mm, obtidos pelo balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATTER (1955), considerando-se um armazenamento de 125 mm, conforme dados fornecidos pela Seção de Climatologia Agrícola do IAC.

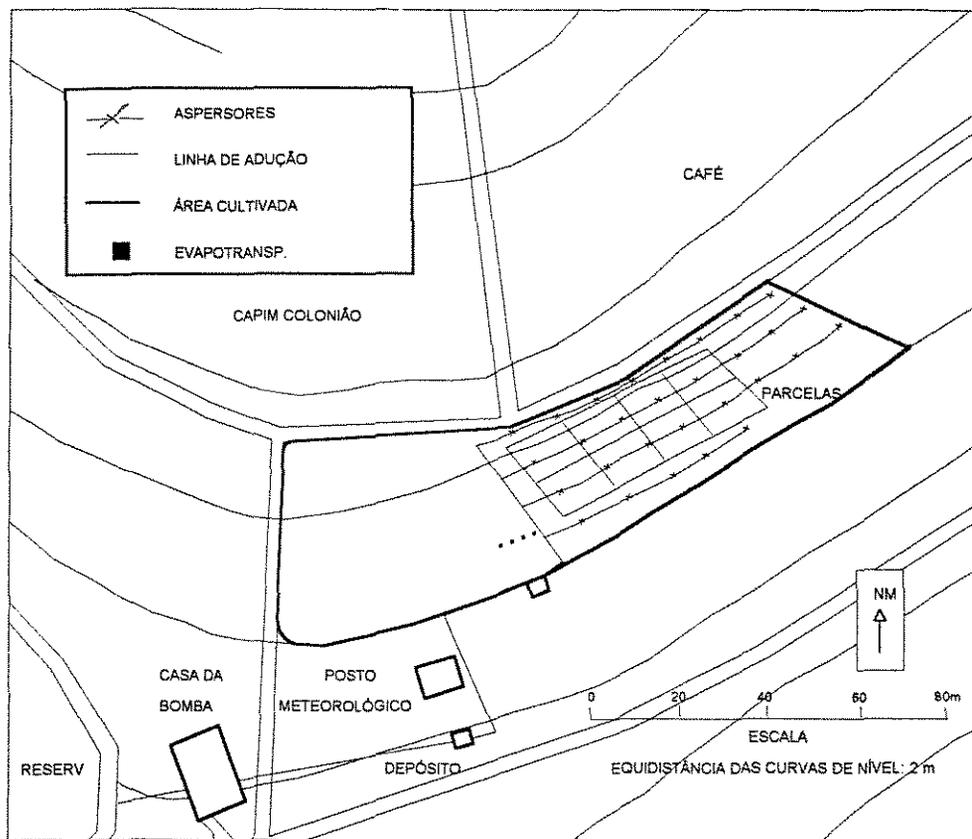


Figura 1. Mapa da área onde foi conduzido o experimento com cultura do feijoeiro, no CEC, na área experimental da Seção de Irrigação e Drenagem do IAC, em Campinas - SP.

Os dados meteorológicos usados neste trabalho foram em parte obtidos em posto meteorológico instalado ao lado da área do experimento (precipitação) e em parte junto ao posto meteorológico instalado no CEC, sob condições padronizadas, gerenciado pela Seção de Climatologia Agrícola do IAC (evaporação do tanque Classe A, evaporação do evaporímetro de Piché, temperatura de bulbo seco e úmido, temperatura máxima e mínima do ar, número de horas de brilho solar diário, velocidade do vento a 10 m de altura).

3.2. Características físico-químicas do solo

O solo da área do experimento foi classificado como Latossolo Roxo distrófico, horizonte A moderado, muito argiloso, unidade Barão Geraldo, de acordo com a Seção de Pedologia do IAC.

A textura foi determinada pela Seção de Pedologia do IAC, e a densidade global pela Seção de Irrigação e Drenagem na área do experimento. Neste trabalho quantificou-se o teor de argila do solo pelo método da pipeta, separou-se a fração de areia através de tamisamento e, por diferença, o teor de silte, após dispersão da terra fina seca ao ar (TFSA), com hidróxido de sódio e agitação mecânica (CAMARGO et al., 1986). Os resultados obtidos da análise granulométrica, densidade global e de partículas encontram-se na Tabela 1.

A determinação da densidade global do solo foi feita a cada 20 cm até a profundidade de 100 cm, utilizando-se amostras indeformadas coletadas em anéis

volumétricos de 100 cm³. Nestas mesmas profundidades, através do método do picnômetro, foi estabelecida a densidade de partículas (CAMARGO et al., 1986).

Tabela 1 - Análise física do Latossolo Roxo, unidade Barão Geraldo, Campinas, SP.

PROFUNDIDADE	AREIA		SILTE	ARGILA	DENSIDADE	
	GROSSA	FINA			GLOBAL	PARTÍCULAS
cm	%				g/cm ³	
0-20	16.7	17.1	5.0	61.2	1.22	2.73
20-40	13.2	14.3	5.0	67.5	1.13	2.76

A fertilidade do solo foi avaliada pela Seção de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas do IAC, em abril de 1994. Foram coletadas amostras a cada 20 cm até a profundidade de 60 cm, em 20 pontos na área do experimento escolhidos de acordo com metodologia descrita por RAIJ et al. (1985). Os resultados da análise de terra encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise da fertilidade do Latossolo Roxo, unidade Barão Geraldo, Campinas - SP.

PROFUNDIDADE	P	M.O.	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al	S	T	V
cm	ppm	%		meq/100 cm ³						%
0-20	41	3.9	6.0	0.44	6.7	2.8	2.3	9.9	12.2	81
20-40	11	2.7	5.4	0.11	3.7	1.9	2.8	5.7	8.5	67
40-60	4	1.9	5.3	0.03	2.8	1.7	2.5	4.5	7.0	64

3.2.1. Retenção e condutividade da água no solo

A curva característica de água no solo foi determinada pela Seção de Irrigação e Drenagem, através de extratores de placas porosas (RICHARDS, 1956), coletando-se amostras não deformadas de 0 a 60 cm na área do ensaio. As amostras foram submetidas a pressões variando de 0,01 a 1,5 MPa. Aos dados experimentais, foram ajustadas curvas do tipo proposta por VAN GENUTCHEN (1980), de acordo com programa desenvolvido por DOURADO NETO et al. (1990). A equação de ajuste é a seguinte:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_0 - \theta_r)}{\left(1 + (\alpha \cdot h)^n\right)} \quad (20)$$

onde,

θ - umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

h - módulo do potencial matricial correspondente à umidade volumétrica θ (cm de água);

θ_0 - umidade volumétrica do solo na saturação ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

θ_r - umidade volumétrica residual correspondente ao potencial de 15.000 cm de água ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

α , m , n - parâmetros do solo obtidos através de regressão não linear.

Os parâmetros α , m , n , θ_0 , θ_r da equação (20) para as diferentes profundidades do solo, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros da regressão do modelo de VAN GENUTCHEN (1980) para o Latossolo Roxo, unidade Barão Geraldo, Campinas - SP

PROFUNDIDADE	PARÂMETROS				
	α	m	n	θ_0	θ_r
cm				-----cm ³ /cm ³ -----	
0-20	0.011493	0.404447	1.679112	0.553	0.223
20-30	0.095555	0.285200	1.398992	0.520	0.297
30-40	0.124962	0.299056	1.426647	0.561	0.265
40-50	0.116450	0.300133	1.428843	0.565	0.257
50-60	0.086720	0.307745	1.444555	0.556	0.259
60-70	0.084016	0.342480	1.520865	0.579	0.258

A condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$ em função de sua umidade (θ), foi determinada através da equação desenvolvida por VAN GENUTCHEN (1980), onde o autor relaciona condutividade hidráulica relativa, K_r , à curva característica de água no solo, baseado em modelo de MUALEN (1976):

$$K_r = W^{\frac{1}{2}} * \left(1 - \left(1 - W^{\frac{1}{n}} \right)^m \right)^2 \quad (21)$$

onde W é uma unidade adimensional, dada pela equação:

$$W = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_0 - \theta_r)} \quad (22)$$

sendo m , n , θ_r e θ_0 os mesmos parâmetros estimados pelo modelo de VAN GENUTCHEN (1980) e apresentados na Tabela 3.

A condutividade hidráulica do solo em função de θ , $K(\theta)$, é finalmente calculada através da seguinte expressão:

$$K(\theta) = K_r * K_0 \quad (23)$$

Foi utilizado o valor de 3.6 cm.h^{-1} para K_0 , o qual foi obtido através do teste de infiltração de água no solo no local do experimento pela Seção de Irrigação e Drenagem do IAC.

3.3. Cultura

O presente estudo foi realizado com cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Carioca 80 - SH. Este cultivar, similar ao Carioca 80, apresenta plantas de crescimento indeterminado, guia curta a longa, com início de florescimento de 30 a 35 dias e ciclo de 90 a 95 dias do plantio à colheita. Possui flores de cor branca e vagens de coloração verde clara passando a palha quando secas, (BULISANI, 1987). As sementes possuem coloração creme a creme marmorizado com listras havana, porém, sem halo alaranjado.

O principal motivo da escolha deste cultivar foi a sua resistência a diversas raças do fungo da antracnose e da ferrugem e ao vírus do mosaico comum, além de ser a variedade predominante no Estado de São Paulo.

3.4. Delineamento experimental no campo

Neste ensaio foi utilizado dois tratamentos referentes aos espaçamentos de 50 e 100 cm, os quais corresponderam às populações de 28 e 14 plantas/m² respectivamente. Essa diferença de populações foi feita para provocar variações no desenvolvimento do dossel vegetativo entre os tratamentos. Monitorou-se o desenvolvimento vegetativo de 8 parcelas, com dimensões de 13 x 13 m, sendo 4 para cada tratamento. A área das parcelas somado à da bordadura completou uma área total de aproximadamente 7.400 m² de feijão cultivado.

Dentro da área da bordadura foram instalados quatro evapotranspirômetros. Estes evapotranspirômetros consistem de caixas de água de 1.000 litros, com dimensões aproximadas de 1,30x1,10x0,70 m e uma área de exposição de 1,41 m². As caixas foram alimentadas através de um mecanismo de bóia a fim de se manter o nível freático constante a uma profundidade de 45 cm. A Fig. 2 apresenta o esquema de instalação da estação evapotranspirométrica. Descrição da forma de instalação e funcionamento do sistema pode ser encontrado em trabalhos como o de CURY (1985), ENCARNAÇÃO (1987) entre outros.

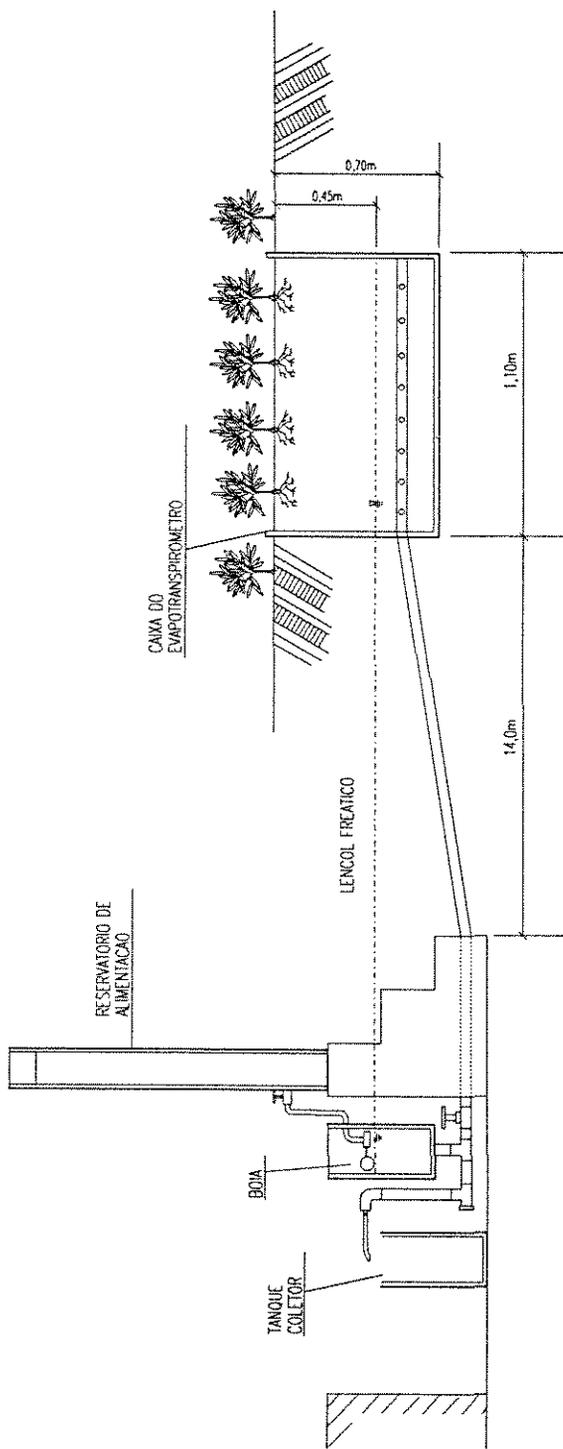


Figura 2. Esquema de instalação da estação evapotranspirométrica.

3.5. Manejo de irrigação no campo

As irrigações foram realizadas através do sistema de aspersão convencional de média pressão. Em teste de uniformidade de irrigação realizado antes do plantio, encontrou-se um coeficiente de uniformidade de Christiansen de 81,6% e uma eficiência de irrigação de 83,1%. A taxa média de aplicação foi de 17,8 mm/h.

O controle da aplicação de água foi feito por meio de hidrômetro, pluviômetro e tensiômetros com manômetro de mercúrio.

Adotou-se um manejo de irrigação semanal, porém não se permitiu que a depleção de umidade do solo ultrapassasse a tensão de 60 kPa, a qual correspondeu a uma umidade crítica de $0,340 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e 50% da água disponível, na profundidade de 15 cm. Esse valor de água disponível é recomendado para a cultura do feijoeiro por HALTERLEIN (1983).

Os fluxos de água no solo e a frente de molhamento foram acompanhados, após as irrigações, por meio de tensiômetros, com manômetros de mercúrio, instalados nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, sempre com três repetições, para ambos os tratamentos.

3.6. Instalação e condução da cultura

3.6.1. Campo

Inicialmente foi feita uma aração e duas gradagens, sendo que a segunda gradagem foi realizada logo após a aplicação do herbicida Eradicane (EPTC), na dosagem de 7 l/ha, em 15/08/1994.

O plantio e adubação foram realizados no dia seguinte, com semeadora de precisão a um espaçamento de 50 cm. Semeou-se um número médio de 15 sementes por metro linear, obtendo-se em torno de 14 plantas por metro após a emergência. O desbaste nas parcelas selecionadas para o tratamento de 14 plantas /m² foi feito aos 18 dias após a emergência (DAE).

A adubação foi feita na dosagem de 280 kg/ha da fórmula 4-14-8. Aos 25 DAE aplicou-se Sulfato de Amônia 20% na dosagem de 150 kg/ha de acordo com BULISANI & ALMEIDA (1990).

No dia 19/08/1994 iniciou-se a irrigação em toda a área do experimento. Uma semana depois, em 26/08/1994, mais de 80% das plantas da área experimental já haviam emergido.

Aos 10 DAE aplicou-se o inseticida Tamaron (Methamidophos) (1 l/ha) e o fungicida Dithane PM (Mancozeb) (2 kg/ha) de forma preventiva.

A fim de se controlar ervas daninhas foram feitas duas capinas, aos 11 e aos 40 DAE, e uma aplicação do herbicida Poast Basf (Sethoxidim) mais Assist-oleo mineral na dosagem de 1,25 l/ha, aos 50 DAE.

3.6.2. Evapotranspirômetros

A cultura do feijoeiro foi semeada nos evapotranspirômetros a um espaçamento de 27,5 cm correspondendo a uma população de 50 plantas/m². Aos 25 DAE quando a cultura nos evapotranspirômetros atingiu 100% de cobertura vegetal fez-se um desbaste, reduzindo-se a população pela metade, 25 plantas/m². Com isto, avaliou-se o efeito da mudança de cobertura vegetal no consumo de água dos evapotranspirômetros.

A adubação nos evapotranspirômetros seguiu a mesma dosagem e época da cultura instalada nas parcelas. O mesmo ocorreu com a aplicação de inseticida e fungicida. Não foi necessário a aplicação de herbicidas nos evapotranspirômetros, pois o controle de ervas foi feito periodicamente através de capina manual.

Com o objetivo de se diminuir a perda por evaporação e manter a superfície do solo seca, colocou-se uma camada de aproximadamente 1,0 cm de areia sobre a superfície de terra da caixa. A seguir recobriu-se essa camada de areia com uma camada de aproximadamente 1,0 cm de terra, a fim de se manter as características ópticas do solo original.

Este procedimento foi seguido para aproximar as condições de consumo de água dos evapotranspirômetros daquelas preconizadas por WRIGHT (1981) na definição do coeficiente de cultura basal. A Fig. 3 mostra uma vista da cultura do feijoeiro semeada nos evapotranspirômetros.



Figura 3. Vista da cultura do feijoeiro semeada nos evapotranspirômetros aos 35 DAE, no ano de 1994, em Campinas - SP.

3.7. Balanço hídrico

3.7.1. Campo

O cálculo da evapotranspiração foi efetuado através da técnica do balanço hídrico de campo.

A técnica do balanço hídrico de campo consiste na determinação dos fluxos de água no solo, que ocorrem num elemento de controle na cultura de campo, em um dado intervalo de tempo (REICHARDT, 1985). O equacionamento básico do balanço hídrico de uma camada de profundidade z num intervalo de tempo Δt , é descrito por REICHARDT (1985), como segue:

$$\int_{t_1}^{t_2} (P + I \pm D_s - Q_e - ET) dt = \int_0^z \int_{t_1}^{t_2} \left(-\frac{\partial q}{\partial z} \right) dz \quad (24)$$

Utilizou-se uma forma simplificada do balanço hídrico, para um intervalo de tempo Δt , descrita como:

$$P + I \pm D_s - Q_e - ET = \Delta A \quad (25)$$

onde,

P - precipitação (mm);

I - irrigação (mm);

ET - evapotranspiração (mm);

Qe - escoamento superficial (mm);

Ds - drenagem profunda(mm);

ΔA - variação de armazenamento de água no solo (mm);

No cálculo de ET, nas condições de campo, o balanço hídrico foi feito num volume de controle com 40 cm de profundidade, já que vários autores encontraram que mais de 90% das raízes do feijoeiro concentram-se nessa camada (INFORZATO & MIYAZAKA, 1961; ROVIRA, 1975; PIRES et al., 1990 entre outros). Neste balanço, desprezou-se o efeito do escoamento superficial, pois o relevo era suave e poucas chuvas ocorreram no período. Desta forma a evapotranspiração real foi calculada como:

$$ET = P + I \pm Ds \pm \Delta A \quad (26)$$

A precipitação foi medida através de um pluviômetro instalado no posto meteorológico localizado próximo à área do experimento (Fig. 1), e gerenciado pela Seção de Irrigação e Drenagem do Instituto Agronômico.

A lâmina de água aplicada por meio da irrigação foi estimada a partir de 15 coletores instalados nas parcelas experimentais.

Os fluxos verticais de água no solo, na profundidade $z = 40$ cm, do volume de controle, foram estimados diariamente através da equação de Darcy, adaptada ao fluxo vertical:

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=40} \quad (27)$$

onde,

q_z - fluxo vertical, ascendente ou descendente [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$];

$K(\theta)$ - condutividade hidráulica em função da umidade do solo [$\text{cm} \cdot \text{dia}^{-1}$];

$\frac{\partial H}{\partial z}$ - gradiente do potencial hidráulico. [$\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1}$]

Para a estimativa de D_s é necessário o conhecimento das características hídricas do solo em $z = 40$ cm, isto é, sua curva de retenção de água no solo e sua condutividade $K = K(\theta)$, determinadas a partir do modelo de VAN GENUTCHEN (1980), eq. 20, 21, 22 e 23.

O gradiente do potencial hidráulico, para um período $\Delta t = t_1 - t_0$, em uma camada $\Delta z = z_2 - z_1$, é estimado a partir da seguinte equação (REICHARDT, 1985):

$$\frac{\Delta H}{\Delta z} \Big|_L = \frac{\left[\frac{(H_{T0Z1} + H_{T1Z1})}{2} - \frac{(H_{T0Z2} + H_{T1Z2})}{2} \right]}{\Delta z} \quad (28)$$

A condutividade hidráulica $K(\theta)$, para $z = 40$ cm, foi obtida utilizando-se a equação 23, onde θ é um valor médio, dado pela seguinte forma (REICHARDT, 1985):

$$K(\theta) = K \left[\frac{(\theta_{T0Z1} + \theta_{T0Z2} + \theta_{T1Z1} + \theta_{T1Z2})}{4} \right] \quad (29)$$

No presente trabalho, as profundidades z_1 e z_2 corresponderam a 30 cm e 50 cm, respectivamente.

A drenagem profunda D_s , para uma profundidade $z = 40$ cm, é então estimada da seguinte forma:

$$D_s = \int_{t_0}^{t_1} q_z dt = q_z \Delta t \quad (30)$$

onde,

Δt - intervalo em dias entre duas amostragens.

A variação no armazenamento de água no solo até a profundidade de 40 cm, foi estimada a partir dos perfis consecutivos de umidade do solo, obtidos entre duas irrigações.

Utilizou-se o método gravimétrico para determinar a umidade de amostras de solo, coletadas com trado, nas profundidades de 0 -10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 30 cm e 30 - 40 cm, com 5 repetições por tratamento.

Após a coleta, as amostras eram acondicionadas em latas de alumínio secas em estufas à 105 °C por 48 horas. A estimativa do armazenamento de água no solo (A), foi realizada por:

$$A = \bar{\theta} \cdot \Delta z \quad (31)$$

onde,

$\bar{\theta}$ - umidade média do perfil do solo [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$].

A variação de armazenamento (ΔA) num intervalo de tempo $\Delta t = t_1 - t_0$ foi determinada por:

$$\Delta A = A_1 - A_0 \quad (32)$$

onde,

A_0, A_1 - armazenamento de água no solo nos tempos considerados (mm).

3.7.2. Evapotranspirômetros

A técnica do balanço hídrico de campo também foi adotada nos evapotranspirômetros para o cálculo da evapotranspiração (ET).

Nos evapotranspirômetros optou-se por cobrir as caixas antes que ocorressem chuvas. Deste modo, os termos drenagem profunda, precipitação e irrigação foram eliminados. Os balanços foram feitos em intervalos de cinco dias, por isso, a variação de armazenamento foi desprezada. Além disso, manteve-se uma borda de 5 cm da caixa acima da superfície do solo, o que impediu a entrada de água devido ao escoamento superficial.

Conseqüentemente, o consumo de água nos evapotranspirômetros foi determinado através da leitura diária do volume de água necessário para manter o lençol freático a um nível constante, ou seja, a 45 cm abaixo da superfície do solo.

3.8. Evapotranspiração de referência (ET_0)

Dois métodos foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência:

3.8.1. Método do tanque classe A

A evapotranspiração de referência medida através do tanque classe A foi estimada pela relação:

$$ET_0 = k_p * E_{pan} \quad (33)$$

onde,

E_{pan} - evaporação média diária do tanque classe A no período considerado (mm/dia);

k_p - coeficiente do tanque a ser determinado de acordo com DOORENBOS & PRUITT (1976).

Na determinação de k_p são necessários os seguintes dados: umidade relativa, bordadura de grama do posto meteorológico, velocidade do vento a 2 m de altura.

Os dados de velocidade do vento obtidos junto ao posto meteorológico do CEC referem-se à altura de 10 m sobre a superfície do solo. Por este motivo, utilizou-se a equação de PANOFSKI¹ (1977) para corrigir a velocidade do vento para 2 m de altura:

$$v_2 = v_1 * \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^p \quad (34)$$

onde,

v_1 - velocidade do vento na altura z_1 , ou seja, a 10 m;

v_2 - velocidade do vento na altura z_2 , ou seja, na altura que se deseja transformar.

O valor de P é calculado da seguinte forma:

$$p = \frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{z_1 * z_2}}{z_0}\right)} \quad (35)$$

De acordo com CAMPBELL (1977), o valor de z_0 é calculado da seguinte forma:

$$z_0 = 0.13 * hc \quad (36)$$

onde,

hc - altura da cultura (valor adotado = 45 cm).

¹PANOFSKI, H. A. Wind structure in strong winds below 150 m. Wind Engineering, Pennsylvania, v. 1, n. 2, p. 91 - 103, 1977.

3.8.2. Método de Penman Modificado

Foi utilizada uma versão modificada do método de Penman, adaptada para o Estado de São Paulo por VILLA NOVA & OMETTO (1981). A seguinte expressão foi utilizada:

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * H + 0.28 * P_i \quad (37)$$

onde,

$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ - coeficiente de correção para obtenção do termo aerodinâmico da equação original de Penman, tabelado em função da temperatura média do ar (OMETTO, 1981);

P_i - evaporação média diária medida em evaporímetro de Piché (mm/dia).

Nos meses de agosto-setembro, pertencentes ao período outono - inverno, o termo energético foi calculado da seguinte forma:

$$H = \frac{Q_0}{59} * \left(0,17 + 0,11 * \frac{n}{N} \right) \quad (38)$$

Nos meses outubro-novembro (período primavera-verão), o termo energético foi calculado como segue:

$$H = \frac{Q_0}{59} * \left(0,19 + 0,23 * \frac{n}{N} \right) \quad (39)$$

onde,

$Q_0/59$ - radiação solar global na ausência da atmosfera, expresso em mm de evaporação equivalente;

n - número de horas de brilho solar que houve no dia;

N - número máximo de horas de brilho solar que poderia ter havido naquele dia.

3.9. Coeficiente de cultura (k_c)

O coeficiente de cultura foi obtido, nas condições de campo, através da relação:

$$k_c = \frac{ET}{ET_0} \quad (40)$$

onde,

ET - evapotranspiração no período considerado (mm);

ET_0 : evapotranspiração de referência, no período considerado (mm).

O coeficiente de cultura basal (k_{cb}) adotado é, conforme WRIGHT (1981), o coeficiente de cultura obtido em condições de evaporação do solo mínima, porém com uma disponibilidade de água na zona radicular da planta que não limita a transpiração.

Esse coeficiente foi obtido a partir do consumo de água do evapotranspirômetro, para períodos de cinco dias. Foi, no entanto, desconsiderado qualquer período em que ocorreu entrada de água nas caixas devido à chuva ou irrigação. A seguinte relação foi utilizada para calcular o coeficiente de cultura basal, a partir de dados de evapotranspiração levantados nos evapotranspirômetros:

$$k_{cb} = \frac{ET}{ET_0} \quad (41)$$

onde,

ET - evapotranspiração no período considerado (mm);

ET₀ - evapotranspiração de referência no período considerado (mm).

3.10. Resistência estomática

Medidas diretas de resistência estomática à difusão de vapor d'água foram realizadas na cultura do feijoeiro, nas parcelas experimentais e nos evapotranspirômetros, utilizando-se de um porômetro de equilíbrio dinâmico LI-1600, Steady State Porometer.

As medidas foram realizadas no horário de maior temperatura do dia, a partir das 13:30, em folhas recém-expandidas, maduras, do topo do dossel vegetativo, expostas a pleno sol e orientadas horizontalmente.

Foram escolhidas ao acaso 8 plantas por tratamento e 2 plantas por evapotranspirômetro em cada dia de amostragem, quando mediu-se a resistência

estomática na face superior da folha (adaxial, r_{SAD}) e na face inferior (abaxial, r_{SAB}). O cálculo da resistência estomática total (r_t) foi realizado, admitindo-se que as duas superfícies da folha atuem como resistores em paralelo, seguindo a lei de Ohm, de acordo com a seguinte relação:

$$r_t = \frac{r_{SAD} * r_{SAB}}{(r_{SAD} + r_{SAB})} \quad (42)$$

3.11. Cobertura vegetal e índice de área foliar

Utilizou-se o método da fotografia, descrito por ARRUDA (1984), para a determinação da cobertura vegetal da cultura do feijoeiro no tratamento de 28 plantas/m² e nos evapotranspirômetros, durante todo o ciclo. No tratamento de 14 plantas/m², utilizou-se o método da fotografia durante a maior parte do ciclo da cultura, porém este método mostrou-se inviável no final do ensaio quando a largura do dossel ultrapassou os 50 cm. Deste modo, utilizou-se do método da régua, também descrito por ARRUDA (1984).

A determinação área foliar (A_F) foi feita a partir da relação entre a massa seca da folha (M_F) e a área foliar específica (F), conforme HUNT (1970):

$$A_F = M_F * F \quad (43)$$

A área foliar específica foi calculada a partir da medição da área foliar de duas amostras da parte aérea de 1 m de linha de planta por tratamento e da determinação de seu peso seco. A área foliar, de cada amostra, foi medida através do medidor de área foliar portátil, da marca Lambda-Licor, modelo LI 3000, com precisão de 0,01 cm². A seguir as amostras foram colocadas em estufa e mantidas num período que variou de 2 a 3 dias a 60 °C.

Na determinação final do índice de área foliar, pesou-se a massa seca de 4 m de plantas por tratamento. A coleta das amostras foi feita cortando-se a parte aérea de duas linhas de 0,5 m de comprimento por parcela. Deste modo, foram coletadas amostras em 8 pontos diferentes por tratamento durante os dias de ensaio. Correlacionou-se, a seguir, a massa seca das amostras de área foliar desconhecida com a massa seca das amostras da área foliar conhecida.

O índice de área foliar (IAF) foi calculado como:

$$IAF = \frac{A_F}{A_C} \quad (44)$$

onde,

A_F : área foliar da amostra;

A_C : área ocupada pela cultura.

Devido ao ensaio de área foliar ser destrutivo, esse não foi realizado dentro dos evapotranspirômetros, porém foi estimado a partir do estudo de correlação entre %CVeg e IAF levantado no campo.

3.12. Altura da planta

Foi medida a altura da planta da cultura, tomando a distância entre o topo das folhagens e a superfície do solo.

3.13. Fitomassa e produção final

A fitomassa presente nos tratamentos foi determinada a partir das amostras utilizadas na determinação do IAF. Após a separação das partes, foi feita a secagem em estufa para obtenção da matéria seca.

A produção final foi estimada em uma área de 48 m² por tratamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Condições climáticas

Os resultados apresentados dos principais elementos climáticos ocorridos durante o ensaio (30/08/94 a 16/11/94) são apresentados na Fig. 4.

Durante o ensaio a precipitação foi escassa, 181 mm, sendo que 88,5 mm (49 % do total), ocorreu na última semana do ensaio. Nos meses de setembro e outubro a precipitação foi de 51,9 mm, sendo que 42,9 mm, 83% do total, ocorreu na última semana de outubro. A precipitação normal em Campinas (1961 a 1990), nesses meses, seria de 189,2 mm, de acordo com dados fornecidos pela Seção de Climatologia Agrícola do IAC.

A temperatura média no período do ensaio foi de 25,7 °C, sendo a média das temperaturas máximas de 32,7 °C e a média das mínimas de 18,4 °C. Para as condições normais de Campinas (1961 a 1990), no período de setembro a novembro, tem-se uma temperatura média de 22 °C, sendo a média das temperaturas máximas de

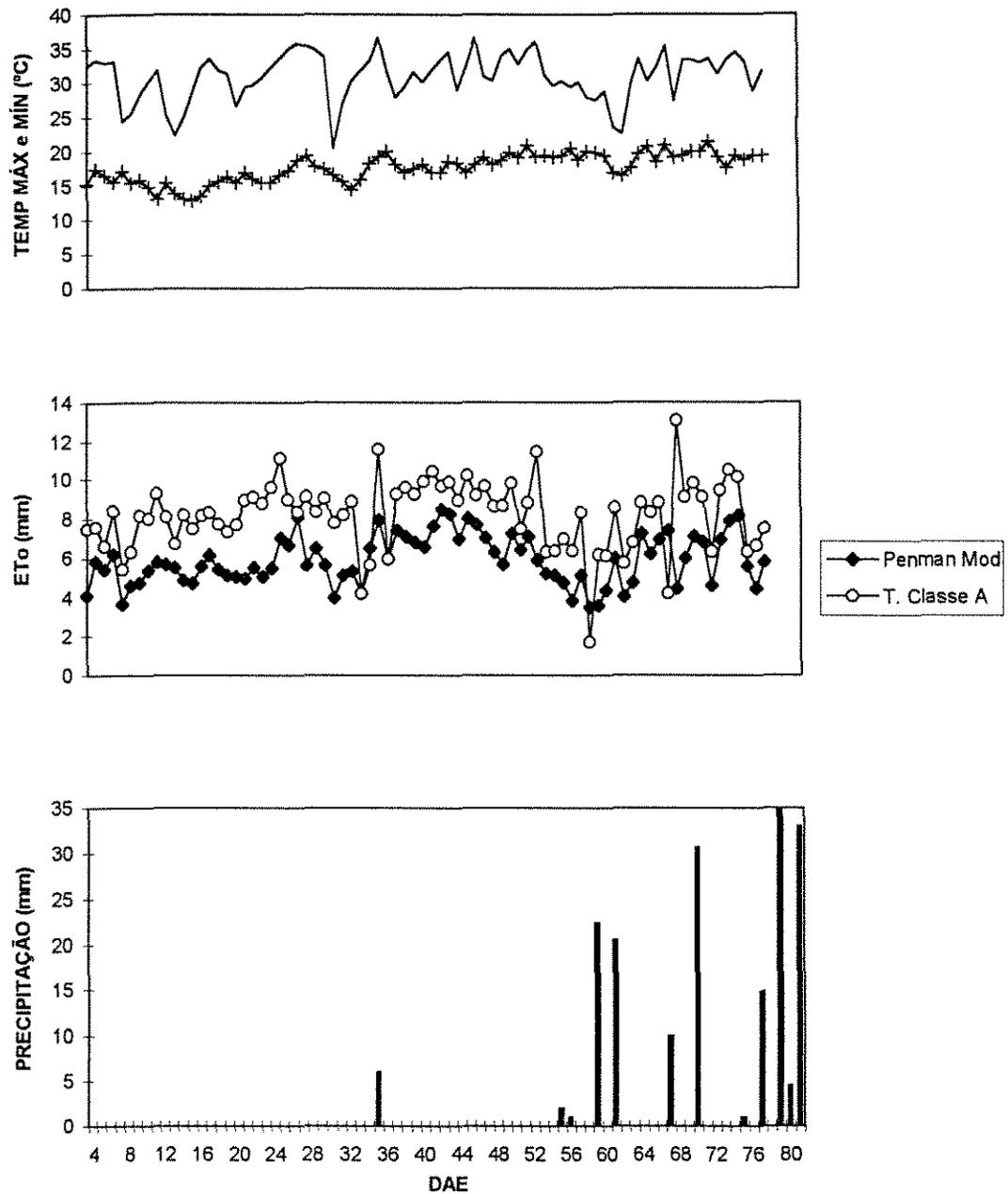


Fig. 4. Valores diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, e evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e do tanque classe A, no ano de 1994, ocorridas em Campinas - SP.

27,9 °C e a média das mínimas de 16,2 °C, de acordo com dados fornecidos pela Seção de Climatologia Agrícola do IAC.

Em termos de umidade relativa, nos meses de setembro e outubro obteve-se valores médios de 53,7% e 60,7%, respectivamente, enquanto que os valores normais (1961 a 1990) apresentam 65,5% e 69,2% para os meses citados, respectivamente.

A Fig. 5 apresenta os valores de evapotranspiração de referência acumulada, calculada através dos métodos de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e do Tanque Classe A, com leitura já corrigida pelo coeficiente de tanque k_p , para todo o período do ensaio.

Os dois métodos diferiram no que se refere à quantidade total de água evapotranspirada. O método do Tanque Classe A foi o que apresentou os maiores valores. A evapotranspiração de referência total acumulada, durante o ensaio, atingiu os valores de 465,2 mm e 645,9 mm para os métodos de Penman modificado e Tanque Classe A, respectivamente, levando a uma diferença acumulada no final do ciclo de 39%. As demandas evaporativas médias foram de 5,9 mm/dia e 8,2 mm/dia para os mesmos métodos, respectivamente.

A época em que ocorreu a maior demanda evaporativa média foi a mesma para os dois métodos, ou seja, de 01/10/94 a 20/10/94. Nesse período, de 36 a 55 DAE, as demandas médias foram de 6,8 mm/dia e 9,2 mm/dia, para os métodos de Penman modificado e do Tanque Classe A, respectivamente.

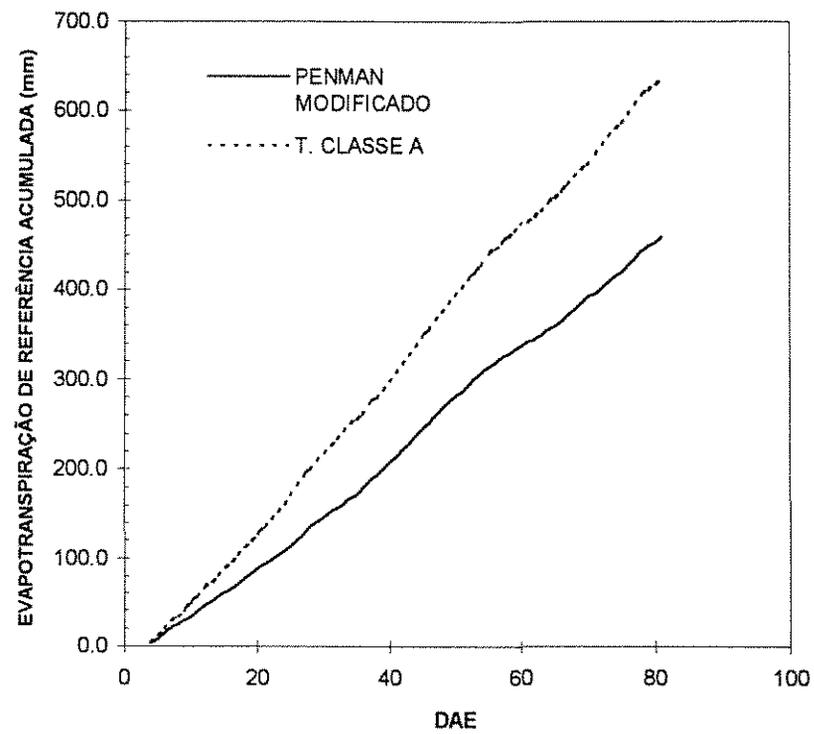


Figura 5. Evapotranspiração de referência acumulada, calculada pelos métodos de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e Tanque Classe A, ocorridas em 1994, em Campinas - SP.

Assim, o período de ensaio caracterizou-se por apresentar demandas evaporativas altas, baixa quantidade e má distribuição de chuvas no tempo. Conseqüentemente, as condições climáticas, no período em que o ensaio foi conduzido, não teriam permitido uma produção econômica da cultura do feijoeiro sem o emprego da irrigação.

4.2. Irrigações

A Fig. 6 apresenta os resultados das lâminas de irrigação aplicadas nas parcelas experimentais. O manejo adotado (item 3.5) visou uma aplicação controlada de água, a fim de se minimizar a perda de água por drenagem profunda.

Foram 10 irrigações ao longo do ciclo, acumulando um valor de 234 mm.

As quantidades foram calculadas com base na demanda evaporativa da atmosfera, na observação da frente de molhamento do solo, e na intensidade média de aplicação de água fornecida pelo sistema.

Procurou-se realizar as regas a um intervalo semanal, mantendo-se porém um controle do potencial matricial do solo através de tensiômetros. Quando a evapotranspiração de referência era mais elevada, a irrigação era antecipada.

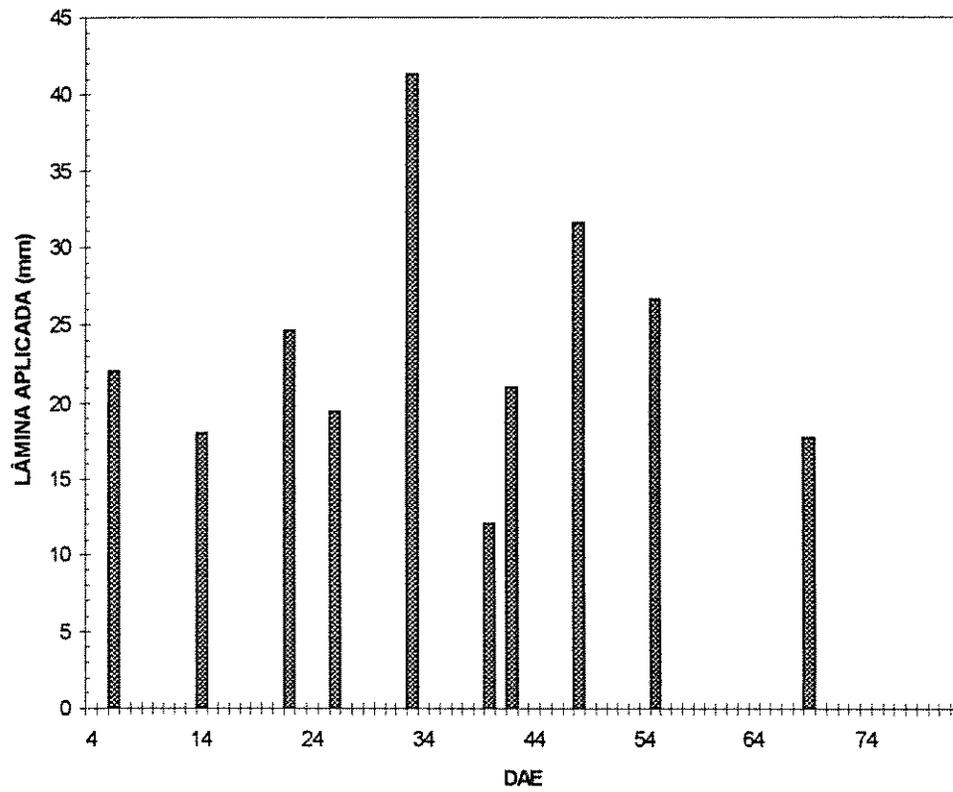


Figura 6. Lâminas de irrigação aplicadas durante o ensaio do feijoeiro no campo, em 1994, em Campinas-SP.

Verificou-se também, como auxiliar no manejo, a manifestação de sintomas visuais de seca, como a mudança de coloração ou a maior ocorrência de paraheliotropismo, que é o movimento das folhas buscando se orientar paralelamente à incidência da radiação solar. Este é um movimento típico apresentado por várias leguminosas para escapar aos períodos de estresse hídrico (DUBETZ, 1969; BERG & HSIAO, 1986).

4.3. Tensão de água no solo

4.3.1. Campo

Os resultados de tensão de água no solo para as profundidade de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, assim como os eventos de irrigação e precipitação ocorridos, são apresentados nas figuras 7, 8, 9 e 10, para ambos os tratamentos.

A tensão média de água no solo até a profundidade de 50 cm, para todo o ensaio, foi de 14,1 kPa e 20,2 kPa para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m².

Nas profundidades utilizadas para o manejo de irrigação (10 a 20 cm), o período de 5 dias em que ocorreu o maior valor médio de tensão de água no solo foi de 29,5 kPa e 56,8 kPa para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², respectivamente.

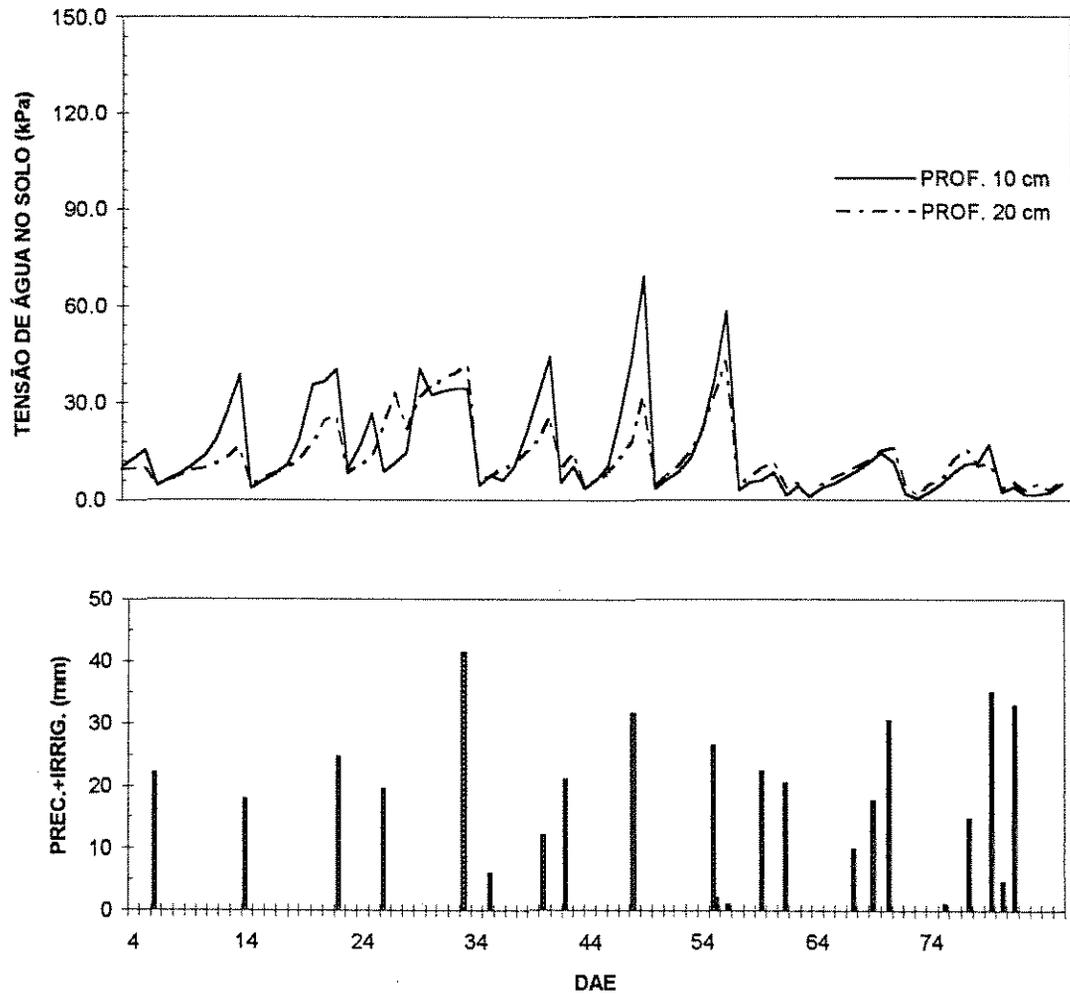


Figura 7. Tensão da água no solo nas profundidades de 10 e 20 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 14 plantas/m², em Campinas - SP.

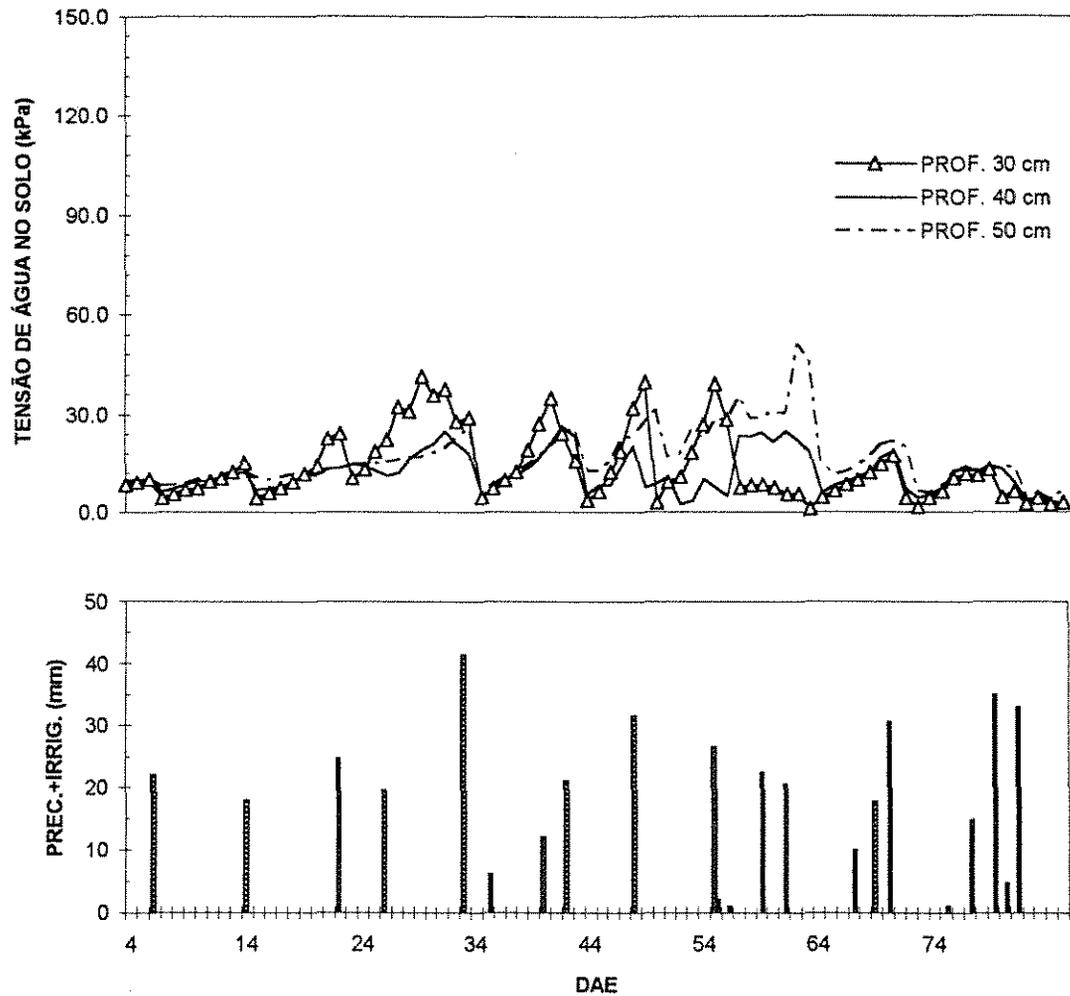


Figura 8. Tensão da água no solo nas profundidades de 30, 40 e 50 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 14 plantas/m², em Campinas - SP.

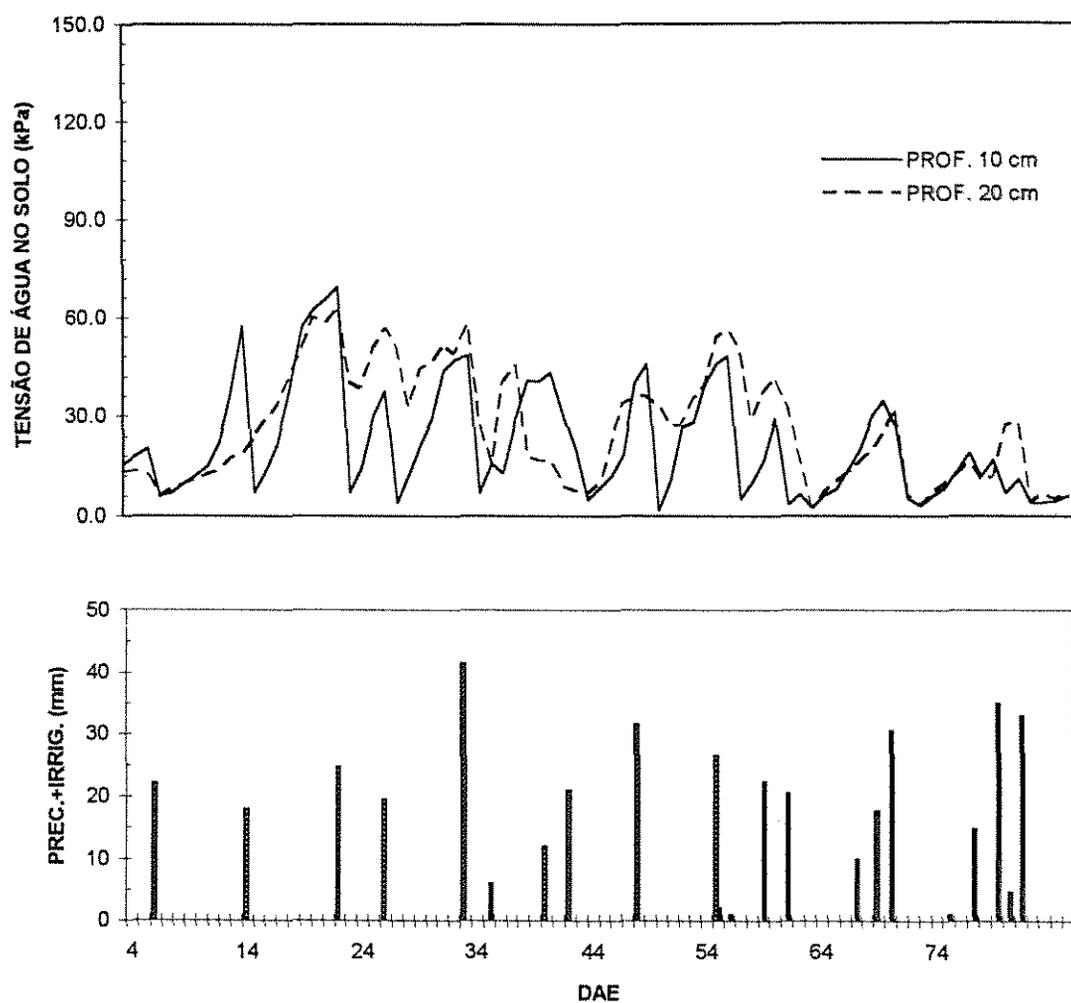


Figura 9. Tensão da água no solo nas profundidades de 10 e 20 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 28 plantas/m², em Campinas - SP.

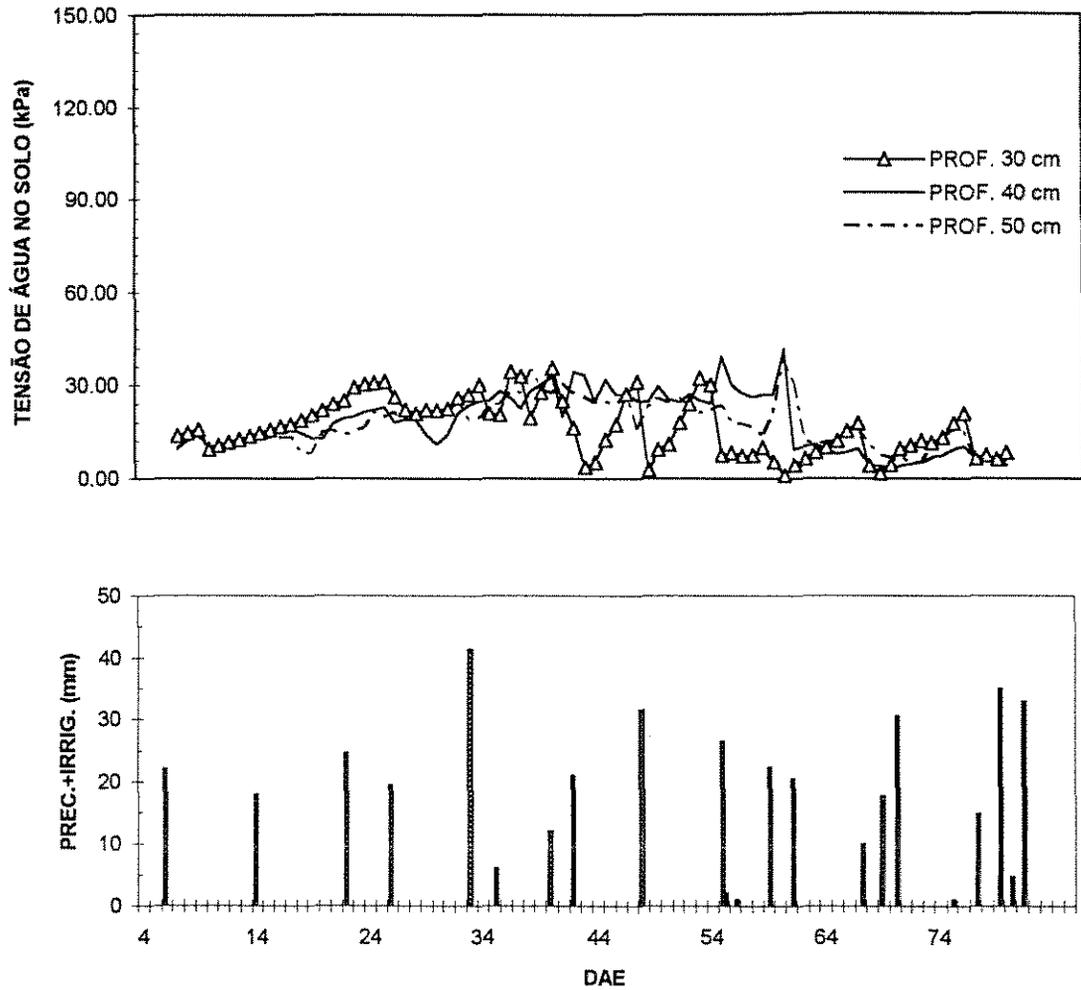


Figura 10. Tensão da água no solo nas profundidades de 30, 40 e 50 cm, e eventos de precipitação e irrigação ocorridos durante o ciclo do feijoeiro, para o tratamento de 28 plantas/m², em Campinas - SP.

A partir desses resultados obtidos, observa-se que a tensão de água no solo esteve abaixo do valor de tensão correspondente à umidade crítica (122 kPa) a 15 cm, durante o ensaio, para ambos os tratamentos, evidenciando que a água no solo nunca propiciou períodos de deficiência hídrica severa.

4.3.2. Evapotranspirômetros

O monitoramento da água no solo foram realizados em duas profundidades: a 5 cm com sensores eletrométricos Colman, a partir de leituras de resistência, e a 10 cm através de tensiômetros de mercúrio. A Fig. 11 apresenta os resultados de tensão de água no solo nos evapotranspirômetros.

Os valores médios obtidos, para os quatro evapotranspirômetros, mostram que a tensão de água no solo estimada esteve sempre abaixo de 10 kPa, durante todo o ciclo, sendo de 4,9 kPa a 5 cm de profundidade e 3,2 kPa a 10 cm de profundidade. Deste modo, aliado ao ótimo desenvolvimento das plantas, demonstra-se que houve um excelente suprimento de água na zona radicular.

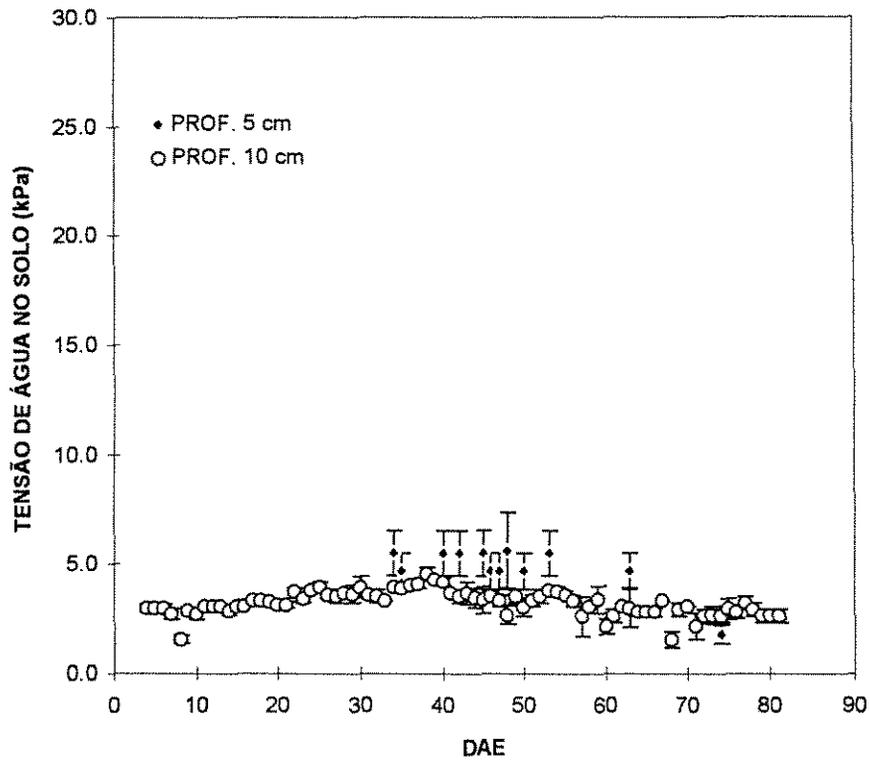


Figura 11. Tensão média de água no solo (kPa) e desvio padrão, determinada a 5 e 10 cm de profundidade nos evapotranspirômetros, através de sensor eletrométrico do tipo Colman e tensiômetros, respectivamente, no ano de 1994, em Campinas - SP.

4.4. Resistência estomática

4.4.1. Campo

Avaliou-se a condição de transpiração da planta através da determinação da resistência estomática total à difusão gasosa das folhas do feijoeiro, para as condições de cultura no campo e nos evapotranspirômetros. Esses resultados são mostrados na Fig. 12 ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro.

As medidas foram tomadas no horário de maior temperatura do dia, a partir de 13:30 h às 14:30 h, em folíolos expostos que atingiram recentemente a maturação e posicionados da forma mais horizontal possível.

Nos tratamentos de 14 e 28 plantas/m², a resistência estomática total (r_t) variou de 0,5 a 2,2 s.cm⁻¹ e de 0,5 a 2,7 s.cm⁻¹ respectivamente. Estes resultados estão dentro da faixa dos valores obtidos por outros autores que realizaram trabalhos com culturas de feijão irrigado. SAKAI (1989) obteve os valores de resistência estomática total entre 0,5 e 5,2 s.cm⁻¹ para tratamentos irrigados de 100%, 75% e 50% de água disponível, também em Campinas. BERGAMASCHI (1984) obteve uma gama de valores entre 0,9 e 4,0 s.cm⁻¹ para feijão irrigado em Piracicaba - SP, nos horários de leitura utilizados neste ensaio.

A resistência estomática total mostrou-se variável ao longo do ciclo. Até 67 DAE o máximo valor de r_t atingido foi de 1,5 s.cm⁻¹ e 1,7 s.cm⁻¹ para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², respectivamente.

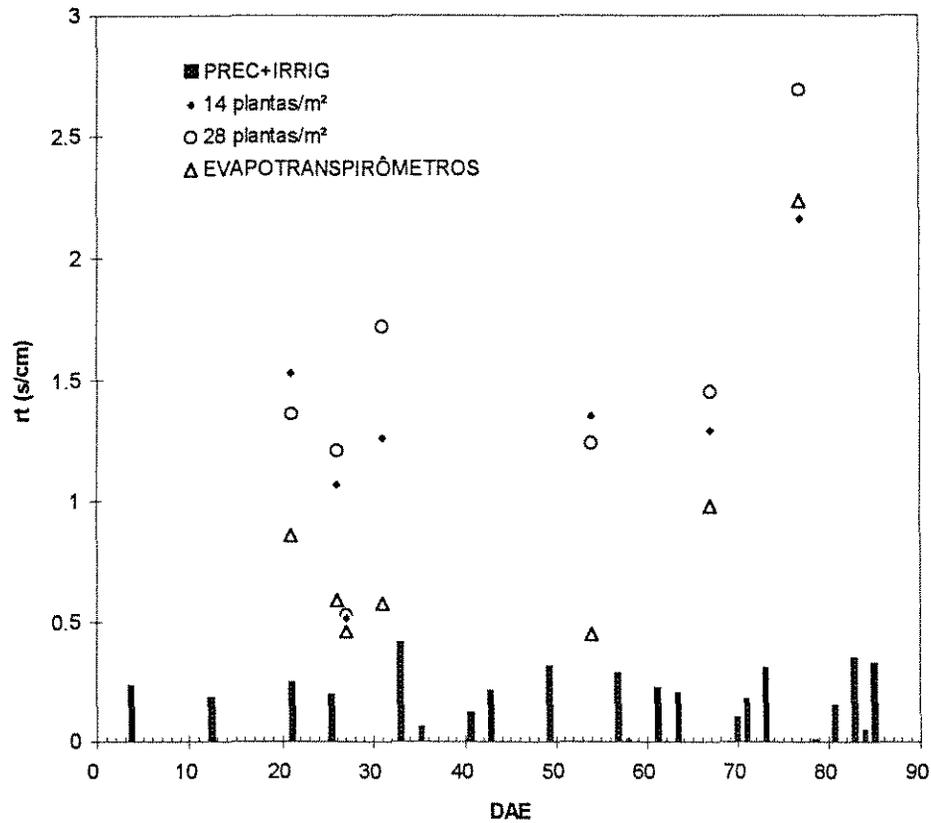


Figura 12. Resistência estomática total medida em folhas do feijoeiro, nas diferentes densidades de semeadura e nos evapotranspirômetros, no ano de 1994, em Campinas - SP.

Na última semana do ensaio houve um aumento na temperatura e da demanda evaporativa, o que junto com a senescência deve ter levado ao aumento da resistência estomática.

A variação de abertura de estômatos também ocorreu durante o intervalo entre o dia anterior a uma irrigação e o dia posterior à mesma. como se observa aos 26 e 27 DAE.

Aos 26 DAE, antes da irrigação, o valor de r_t era de $1,07 \text{ s.cm}^{-1}$ e $1,21 \text{ s.cm}^{-1}$ para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², respectivamente. No dia seguinte, esses valores caíram para $0,5 \text{ s.cm}^{-1}$ para ambos os tratamentos, mostrando pronta recuperação do estresse hídrico moderado.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o suprimento de água para a planta, nos tratamentos de densidade populacional, foi variável, de acordo com o período decorrido desde a irrigação. Porém, apesar desses resultados indicarem que as plantas não apresentaram condições de estresse hídrico severo, houve elevação nos valores de r_t podendo ter afetado a transpiração da cultura.

4.4.2. Evapotranspirômetros

As medidas de r_t tomadas nas plantas nos evapotranspirômetros foram obtidas no mesmo horário e condições daquelas realizadas nos tratamentos de densidade de semeadura. Os resultados constam da Fig. 12.

A resistência estomática total variou de 0,4 a $2,2 \text{ s.cm}^{-1}$, sendo que até 67 DAE o máximo valor atingido foi de $1,0 \text{ s.cm}^{-1}$.

Comparando-se os resultados de abertura de estômatos nos evapotranspirômetros com aquela medida nas condições de campo, no dia seguinte à irrigação, constatou-se que aos 27 DAE a resistência estomática total nas plantas semeadas nos evapotranspirômetros era a mesma daquelas obtidas junto aos tratamentos de densidade de semeadura, ou seja, $0,5 \text{ s.cm}^{-1}$.

Aos 77 DAE, similar aos outros tratamentos, a r_t atingiu-se o máximo de $2,2 \text{ s.cm}^{-1}$, provavelmente devido às condições de senescência apresentadas pela cultura nos evapotranspirômetros, visto que os valores de tensão de água no solo mantiveram-se abaixo de 10 kPa.

A partir dos dados obtidos no monitoramento do potencial de água no solo e abertura de estômatos, podemos concluir que a condição de abastecimento contínuo de água para a planta manteve-se de forma adequada nos evapotranspirômetros.

4.5. Desenvolvimento da cultura

4.5.1. Altura de planta

O desempenho da cultura do feijoeiro no que se refere à altura de planta pouco diferiu, tanto entre os tratamentos quanto entre as condições de cultivo (cultura nos evapotranspirômetros e nas parcelas experimentais). Isto pode ser verificado através das Fig. 13 e 14, onde estão representadas as evoluções da altura de planta nos tratamentos de densidade de semeadura e nos evapotranspirômetros.

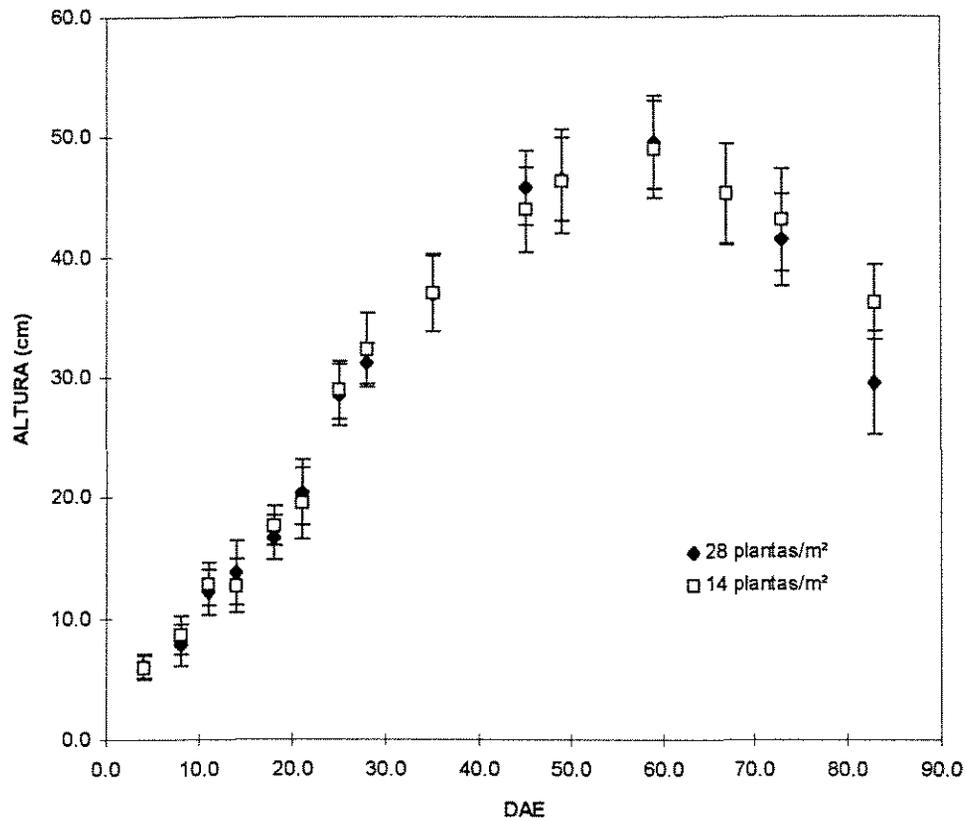


Figura 13. Altura média de planta (cm) da cultura do feijoeiro, e os respectivos desvios padrões, para as diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.

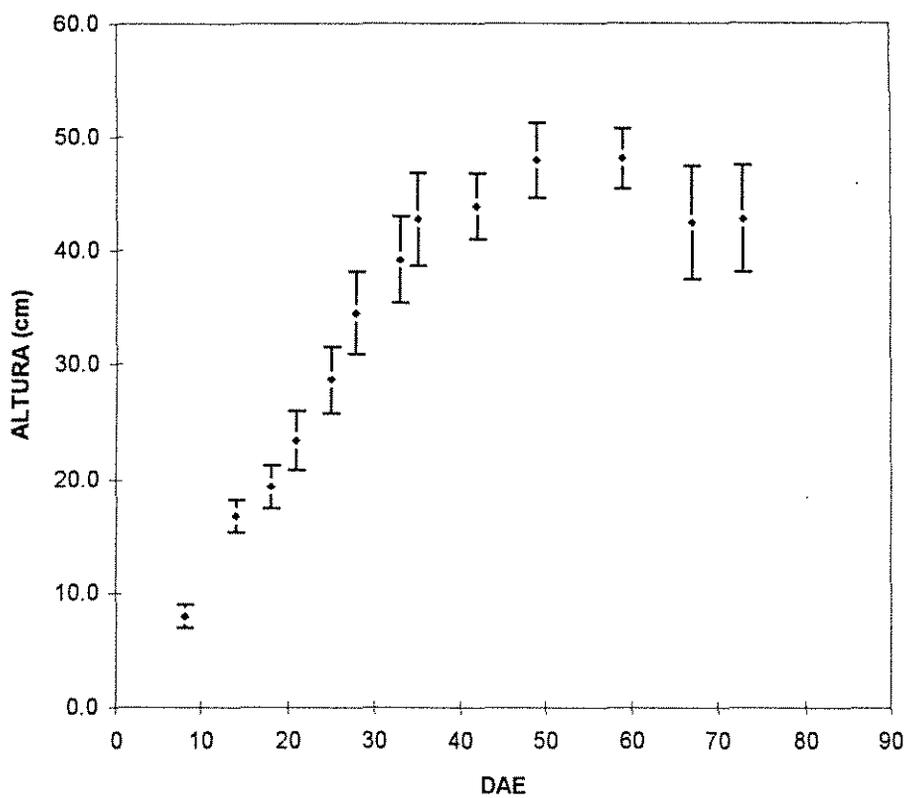


Figura 14. Altura média de planta (cm) da cultura do feijoeiro nos evapotranspirômetros, e seus respectivos desvios padrões, no ano de 1994, em Campinas - SP.

As alturas médias atingiram seus valores máximos aos 59 DAE, no início da formação de produção, e corresponderam a 49 cm, 49,6 cm e 48,1 cm, para os tratamentos de 14 plantas/m², 28 plantas/m² e nos evapotranspirômetros, respectivamente. De acordo com BULISANI & ALMEIDA (1990), a altura do dossel do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) varia, conforme o cultivar, de 40 a 50 cm, portanto, o comportamento da cultura com relação à altura foi normal.

No final do ciclo houve uma queda acentuada na altura da cultura devido ao acamamento provocado pelo aumento de peso das vagens e ao período de senescência da cultura.

4.5.2. Porcentagem de cobertura vegetal

4.5.2.1. Campo

A porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) é o parâmetro de desenvolvimento da cultura no qual melhor pôde-se visualizar a diferença de desenvolvimento vegetativo entre os diferentes tratamentos de densidades populacionais.

A figura 15 apresenta a evolução da porcentagem de cobertura vegetal dos tratamentos de 14 plantas/m² e 28 plantas/m². Observa-se que o tratamento de 28 plantas/m² atingiu 100% de cobertura vegetal aos 59 DAE, entre o início do florescimento

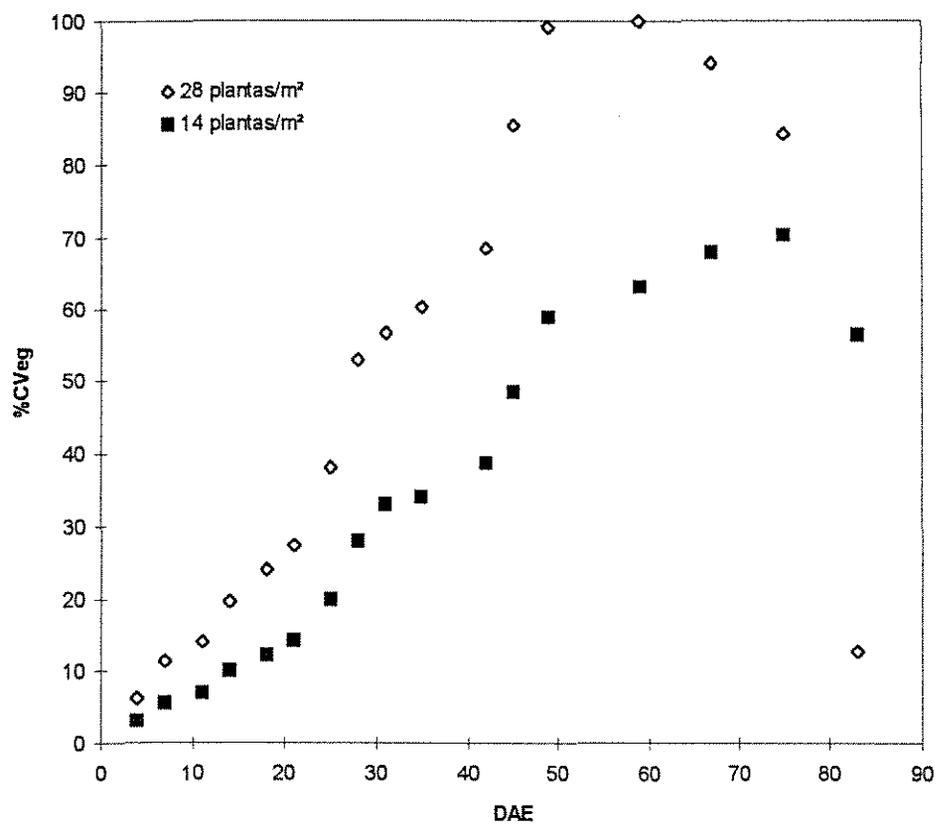


Figura 15. Porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) da cultura do feijoeiro nos tratamentos de diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.

aos 35 DAE, e da formação de grãos, aos 49 DAE, similar a outros trabalhos, como ARRUDA (1984) e MELLO (1992). Contudo, o tratamento de 14 plantas/m² não alcançou a cobertura total, sendo o seu máximo valor atingido de 70,4% aos 75 DAE.

O período de decréscimo de %CVeg coincidiu, para ambos os tratamentos de densidade de semeadura, com o decréscimo do acúmulo de matéria seca das folhas.

4.5.2.2. Evapotranspirômetros

A Fig. 16 apresenta o incremento da porcentagem de cobertura vegetal média nos evapotranspirômetros ao longo do ciclo.

O comportamento do desenvolvimento da cobertura vegetal nos evapotranspirômetros foi distinta daquela apresentada pelas culturas nas condições de campo. No início do ciclo, a população nos evapotranspirômetros era de 50 plantas/m², o que propiciou o rápido fechamento da cultura. Aos 25 DAE (20/09/94), a cultura já recobria totalmente o solo dos evapotranspirômetros, quando então se realizou a eliminação de metade da população pela retirada de linhas alternadas de plantas. A %CVeg foi reduzida de 100% para aproximadamente 48%, similar ao tratamento de 28 plantas/m².

Após o desbaste, a taxa de crescimento da cultura nos evapotranspirômetros continuou maior do que o apresentado pela cultura de tratamento de 28 plantas/m², apesar da população ter diminuído para 25 plantas/m². Por esse motivo, o fechamento

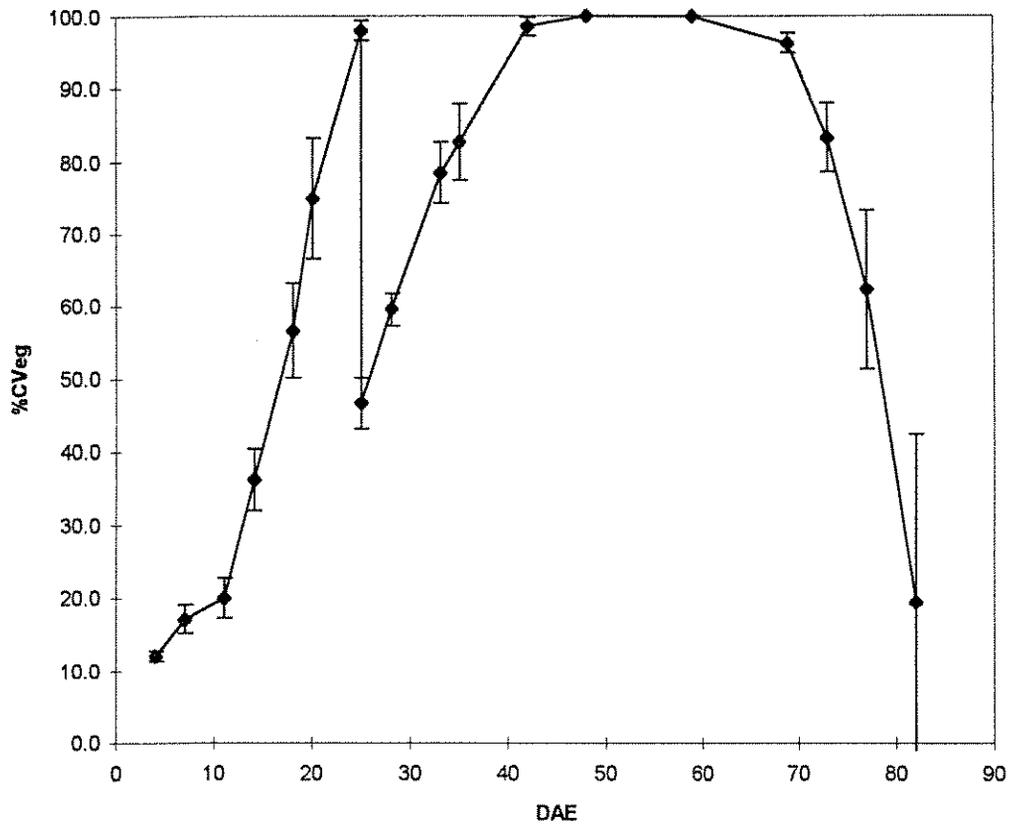


Figura 16. Porcentagem de cobertura vegetal média (%CVeg) da cultura do feijoeiro nos evapotranspirômetros, e desvios padrões, no ano de 1994, em Campinas - SP.

da cultura nos evapotranspirômetros ocorreu sete dias antes do que o tratamento de maior densidade populacional no campo, ou seja, aos 42 DAE.

Após o desbaste nos evapotranspirômetros, os maiores índices de porcentagem de cobertura vegetal também foram atingidos entre o início do florescimento (35 DAE) e a formação do grão (49 DAE).

No final do ciclo, a partir de 69 DAE (03/11/94), inicia-se a fase de decréscimo da cobertura vegetal nos evapotranspirômetros. Nessa fase, pode-se observar um aumento no desvio padrão das %CVeg médias dos evapotranspirômetros, já que um dos evapotranspirômetros teve um decaimento de %CVeg menor que os outros, apresentando um valor final de 53,2% contra uma média de 12% dos outros evapotranspirômetros. Porém, de forma geral, o desempenho das plantas nos 4 evapotranspirômetros foi muito similar ao longo do ciclo da cultura.

4.5.3. Índice de área foliar

4.5.3.1. Campo

A Fig. 17 mostra a variação do índice de área foliar ao longo do ciclo da cultura do feijão, para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m². O tratamento de 28 plantas/m², apesar de possuir uma densidade populacional duas vezes maior que o tratamento de 14 plantas/m², não conseguiu manter esta proporção nos valores de IAF obtidos.

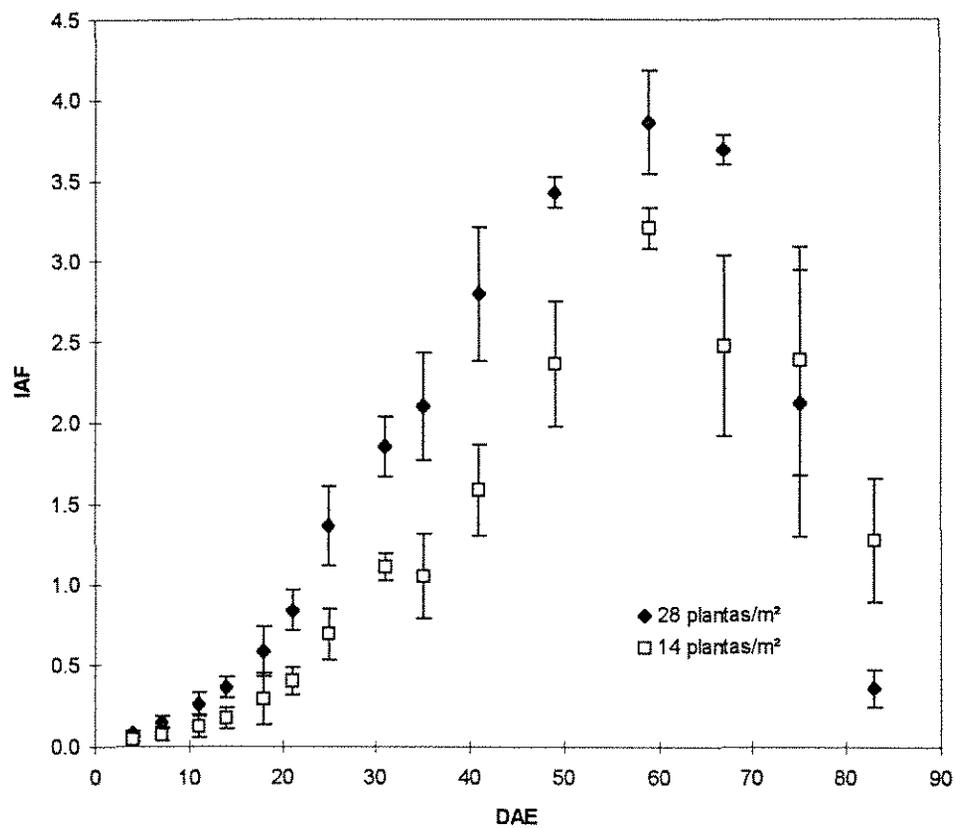


Figura 17. Índice de área foliar (IAF) da cultura do feijoeiro para as diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.

Os maiores valores de IAF obtidos em ambos os tratamentos foram de 3,2 e 3,9 para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², respectivamente, aos 59 DAE , quando se inicia a estabilização do acúmulo da matéria seca das folhas verdes. Houve um crescimento relativo maior no desenvolvimento foliar do tratamento de menor densidade populacional devido, provavelmente, às condições ambientais mais favoráveis em termos de luz e água, pela menor competição entre plantas.

FOLEGATTI (1985), em experimento com a cultura do feijoeiro irrigado, var. Aroana 80, semeada a uma densidade de 20 plantas/m², obteve um IAF máximo de 2,4. OLIVEIRA & SILVA (1990), realizaram um ensaio com feijoeiro irrigado, var. IPA 74-19, plantado a uma densidade de 37 plantas/m² e obtiveram um IAF máximo de 3,7. GUANDIQUE (1993) encontrou um valor de IAF de 2,9, para o feijoeiro irrigado, var. Carioca, apresentando uma densidade populacional de 20 plantas/m². Conseqüentemente, os valores de máximos de IAF apresentados pela cultura no campo atingiram valores adequados, mesmo para a população de 14 plantas/m², se comparados com os experimentos de feijoeiro irrigado citados.

Na fase senescente, como ocorreu na porcentagem de cobertura vegetal, os valores de IAF do tratamento de menor densidade populacional decaíram a uma taxa menor, chegando no final do ciclo a ter valores maiores do que o tratamento de 28 plantas/m². Os valores médios de IAF para as densidades populacionais de 14 e 28 plantas/m², no final do ciclo, foram 0,36 e 1,28 respectivamente.

4.5.3.2. Evapotranspirômetros

A estimativa do IAF dos evapotranspirômetros foi feita a partir da relação obtida através da análise de correlação entre os valores de IAF e %CVeg obtidos nas condições de campo, no período compreendido entre o início do ciclo até o momento em que se inicia a fase de estabilização do acúmulo da matéria seca da folha, aos 59 DAE.

A expressão obtida através do método dos mínimos quadrados, junto com o número de pontos (n) e o coeficiente de correlação (r), foi:

$$\text{IAF} = -0,297 + 0,048*\%CVeg - 7,536*10^{-5}*(\%CVeg)^2 \quad n=24 \quad r = 0,98^{**} \quad (45)$$

A Fig. 18 apresenta os valores utilizados na avaliação da relação entre %CVeg e IAF englobando ambos os tratamentos, assim como a curva ajustada para a estimativa do IAF a partir de %CVeg. Na Fig. 19 são apresentados os valores estimados de IAF nos evapotranspirômetros a partir da equação 46, e o valor medido no dia do raleamento aos 25 DAE.

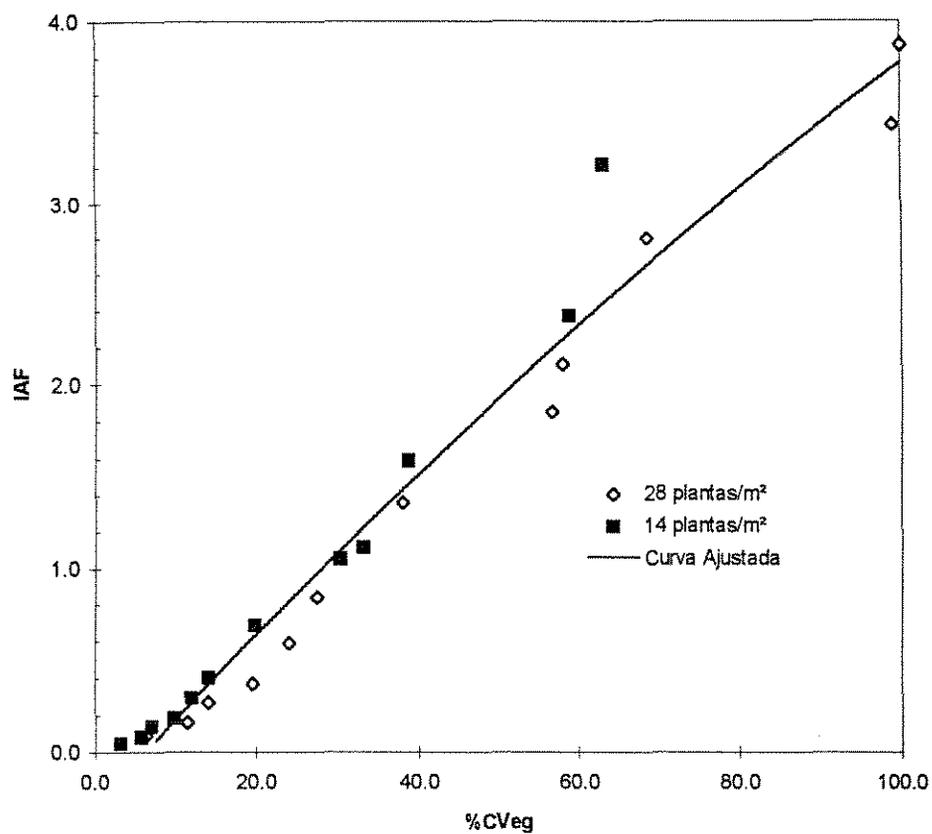


Figura 18. Valores de porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) relacionados ao índice de área foliar (IAF) na cultura do feijoeiro, para os diferentes tratamentos de densidade populacional, no ano de 1994, em Campinas - SP.

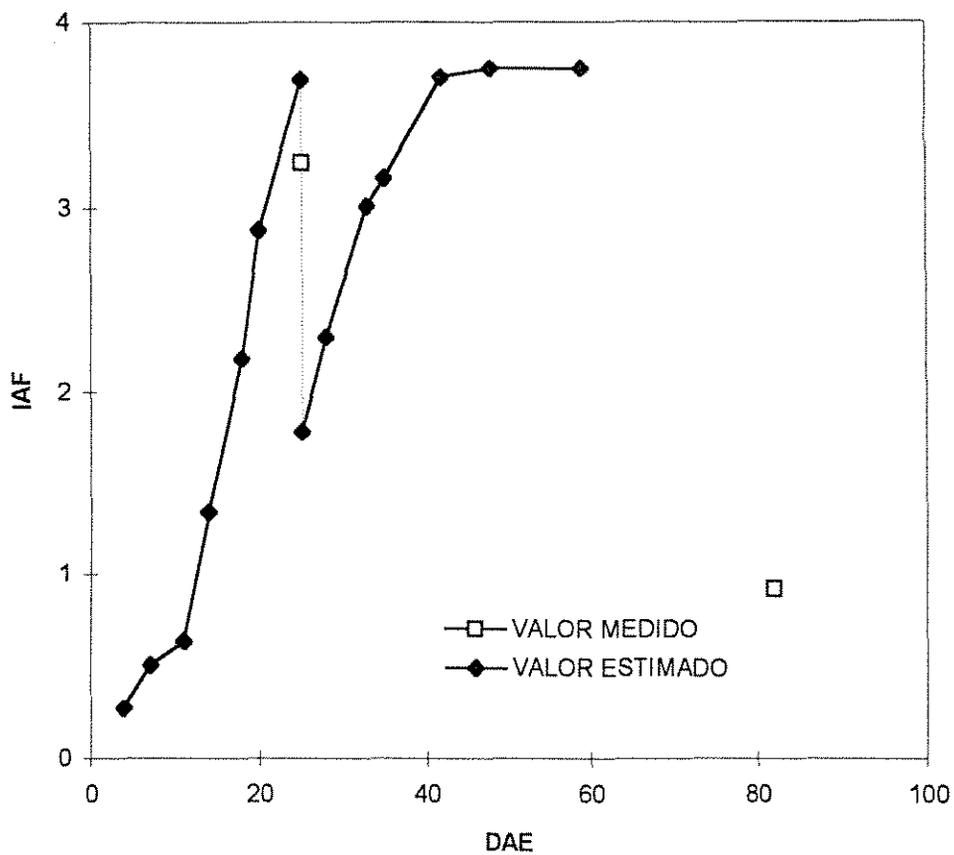


Fig. 19. Valores estimados de IAF para o feijoeiro plantado nos evapotranspirômetros ao longo do tempo, e valores medidos no dia do desbaste (25 DAE) e na colheita (83 DAE), no ano de 1994, em Campinas - SP.

4.5.4. Fitomassa

4.5.4.1. Campo

O acúmulo da matéria seca (MS) ao longo do ciclo da cultura, para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², assim como a evolução das componentes obtidas através da partição das plantas, são apresentadas nas Fig. 20 e 21.

A curva de acumulação da matéria seca total, como pode ser visto nas Fig. 20 e 21, teve o formato sigmóide, o qual é típico das curvas de crescimento (HUNT, 1970).

Apesar de um tratamento apresentar o dobro de população de plantas por unidade de área em relação ao outro, verifica-se que o acúmulo de matéria seca total desses tratamentos não segue a mesma proporção das densidades de semeadura, pois a máxima diferença de quantidade de matéria seca total entre os dois tratamentos foi de 80% aos 42 DAE.

A evolução da matéria seca das partes das plantas também apresentaram diferenças. Em ambos os tratamentos praticamente houve uma estabilização no acúmulo de matéria seca das folhas e caule aos 59 DAE, devido ao crescimento da matéria seca da parte reprodutiva a partir dos 49 DAE (14/10/94) até 75 DAE, para ambos os tratamentos, quando estabiliza-se a sua taxa de crescimento.

Com relação à taxa de acúmulo de matéria seca da vagem com o tempo, no tratamento de 14 plantas/m² essa taxa foi praticamente constante, enquanto para o

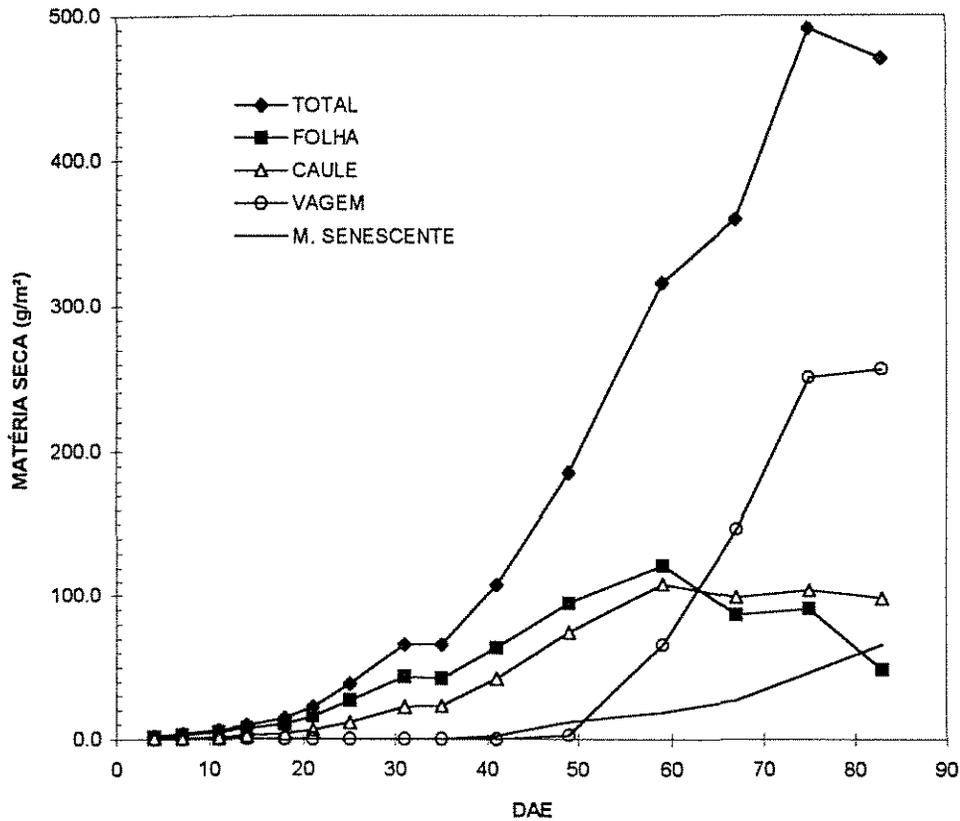


Figura 20. Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, assim como de suas componentes obtidas através da partição das plantas, para o tratamento de 14 plantas/m², no ano de 1994, em Campinas - SP.

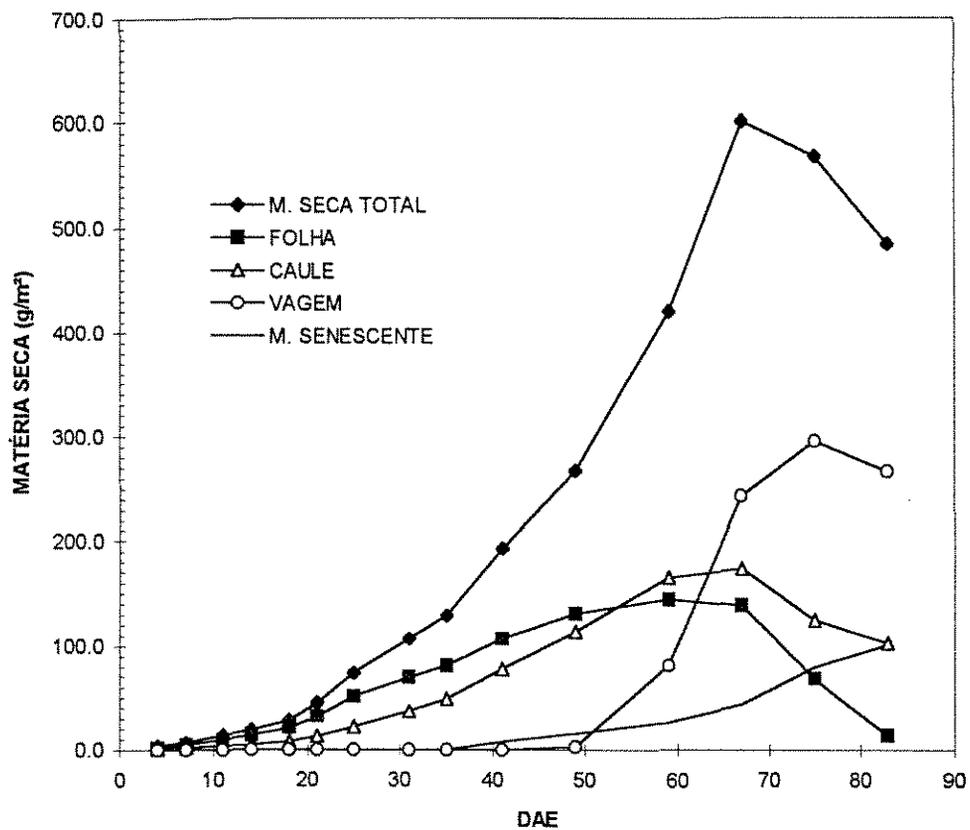


Figura 21. Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, assim como de suas componentes obtidas através da partição das plantas, para o tratamento de 28 plantas/m², no ano de 1994, em Campinas - SP.

tratamento de 28 plantas/m², no período de 59 a 67 DAE observa-se a maior taxa de acúmulo de matéria seca com o tempo do material reprodutivo.

Observa-se na Fig. 20 uma queda mais acentuada na matéria seca acumulada nas folhas, a partir de 67 DAE, para o tratamento de 28 plantas/m² em relação ao tratamento de 14 plantas/m² (Fig. 21), o que levou a uma queda no acúmulo de matéria seca total no tratamento de maior densidade populacional. O período de senescência, amarelecimento e queda das folhas no tratamento de 14 plantas/m² foi retardado em relação ao de 28 plantas/m² compensando em parte as diferenças de produtividade e matéria seca. Provavelmente, esses resultados são afetados pelas condições de interceptação de luz, levando a diferenças menos acentuadas entre os tratamentos de campo, no final do ciclo.

Um dos problemas na avaliação da matéria seca total no período de senescência é que o decréscimo na produção de matéria seca das folhas e caule não é seguido na mesma proporção pelo aumento do material senescente, pois ao cair no solo parte da matéria orgânica da folha é perdida por decomposição. Por isso, no tratamento de densidade de semeadura de 28 plantas/m² ocorre a queda mais acentuada no acúmulo de matéria seca total na última semana de cultivo, devido ao maior desfolhamento da planta e algum acamamento da cultura.

As relações desenvolvidas para descrever o acúmulo de matéria seca do feijoeiro ao longo do tempo, na fase de crescimento linear, a partir dos 41 DAE, são apresentadas na tabela 4. As correlações foram altamente positivas. A média da taxa máxima de acúmulo de matéria seca total ou taxa de crescimento da cultura na fase

linear, para os tratamentos de densidade de semeadura de 14 e 28 plantas/m², foram 10,9 g/m².dia e 12,7 g/m².dia, respectivamente.

Tabela 4. Equações de primeiro grau para os tratamentos de diferentes densidades populacionais da cultura do feijão, no período de 41 a 75 DAE, no ano de 1994, em Campinas - SP. MS é a matéria seca total (g/m²) e t corresponde a DAE.

Tratamento	Equação polinomial	n	r
14 plantas/m ²	MS = -343,9 + 10,92* t	5	0,99**
28 plantas/m ²	MS = -327,9 + 12,68* t	5	0,96**

4.5.4.2. Evapotranspirômetros

A Fig. 22 mostra a evolução comparativa da matéria seca total nos dois tratamentos de densidade de semeadura e nos evapotranspirômetros, a fim de melhor se avaliar a diferença no padrão de desenvolvimento das curvas de crescimento entre as condições de cultivo desenvolvidas no ensaio.

Devido ao ensaio de matéria seca ser destrutivo, foram tomadas amostras somente em duas ocasiões nos evapotranspirômetros. Na primeira medição aos 25 DAE, a população nos evapotranspirômetros era de aproximadamente 50 plantas/m². Foi obtido um valor médio de matéria seca total de 156,9 g/m² contra 73,2 g/m² do tratamento de 28 plantas/m² e 38,2 g/m² no tratamento de 14 plantas/m².

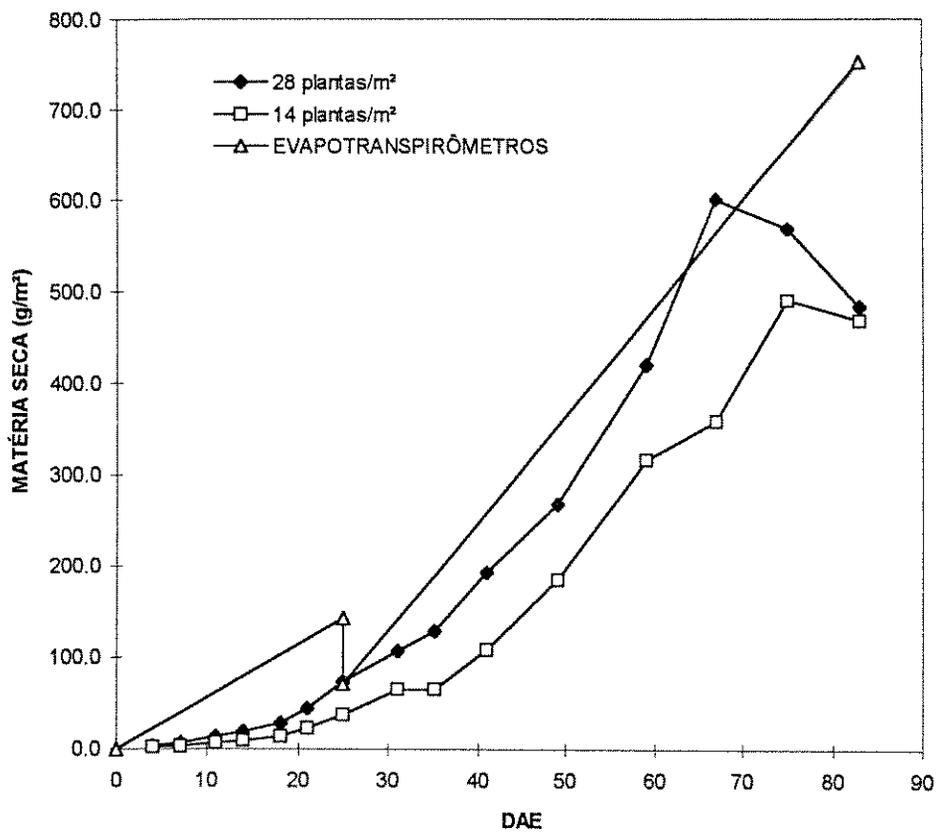


Figura 22. Evolução do acúmulo da matéria seca (MS) da cultura do feijoeiro, para diferentes densidades populacionais, no ano de 1994, em Campinas - SP.

Na colheita, aos 82 DAE, o valor médio de matéria seca total nos evapotranspirômetros atingiu 725,4 g/m² para uma população de aproximadamente 25 plantas/m²; enquanto para o tratamento de 28 plantas/m² o máximo valor atingido foi, durante todo o ensaio, de 601,5 g/m² aos 67 DAE. A taxa média de crescimento da cultura nos evapotranspirômetros, no período de 25 a 83 DAE atingiu um valor de 11,4 g/m².dia. Essa taxa de crescimento da cultura (TCC) esteve no mesmo nível da apresentada pelo tratamento de 28 plantas/m², porém, pela área foliar verde e atraso na senescência, a TCC da cultura dos evapotranspirômetros deve ter se mantido por um período de tempo mais longo, o que resultou em maior produção final da cultura nos evapotranspirômetros.

4.5.5. Produção final

Os resultados obtidos na avaliação final da produção e de seus componentes encontram-se nas tabelas 5 e 6, respectivamente. Na tabela 5, a comparação das médias foi feita através do teste de Duncan, a um nível de 5% de probabilidade. Não houve diferença significativa entre os tratamentos de densidade populacional de 14 e 28 plantas/m². O teor de umidade dos grãos foi de 11%.

SAKAI (1989) obteve uma população máxima de 2.145 kg/ha, em feijoeiro irrigado, var. Carioca 80 - SH, semeado a uma densidade de 25 plantas/m². De acordo com BULISANI & ALMEIDA (1990), nos cultivos irrigados do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), são comuns rendimentos de 2.000 a 2.500 kg/ha. Portanto, os valores obtidos no campo podem ser considerados bons e nos evapotranspirômetros muito bons.

Tabela 5. Produção final de grãos (kg/ha) para a cultura do feijoeiro, nos diferentes tratamentos de densidade populacional (14 e 28 plantas/m²) e nos evapotranspirômetros (ETM), no ano de 1994, em Campinas - SP

TRATAMENTO	REPETIÇÕES				PRODUÇÃO MÉDIA
	I	II	III	IV	
plantas/m ²	----- kg/ha -----				
14	1930	2427	2020	----	2.126 b
28	2961	1275	2153	----	2.130 b
ETM	3485	2846	3367	3136	3.209 a

Avaliando-se os valores de índice de colheita (IC) na tabela 6, percebe-se que houve boa conversão da matéria seca total em produção, pois estes ficaram próximos de 40%. Na cultura instalada nos evapotranspirômetros, o valor inferior de IC, em relação aos tratamentos de densidade populacional, indica que as condições ambientais nos evapotranspirômetros favoreceram o maior desenvolvimento das partes da planta, principalmente o material foliar. Contudo, há de se ressaltar que a coleta de matéria seca nos evapotranspirômetros foi facilitada, pois praticamente todo o material senescente ficou retido nas caixas, na superfície seca do solo, já que a borda de 5 cm acima da superfície do solo evitou o espalhamento do material.

Tabela 6. Componentes de produção da cultura do feijoeiro, nos diferentes tratamentos de densidade populacional (14 e 28 plantas/m²) e nos evapotranspirômetros (ETM), no ano de 1994, em Campinas - SP.

TRATAMENTO	VAGENS POR PLANTA	PESO SECO DE 500 SEMENTES	PRODUÇÃO DE GRÃOS	MATÉRIA SECA TOTAL	ÍNDICE DE COLHEITA
plantas/m ²		----- g -----	----- g/m ² -----	-----	%
14	17	100,6	192,5	469,3	41,0
28	10	102,0	203,0	484,1	41,9
ETM	16	100,5	284,0	752,3	37,8

Comparando-se os tratamentos de densidade de semeadura, observa-se que o desempenho obtido pelo tratamento de 14 plantas/m² foi o praticamente o mesmo daquele obtido pelo tratamento de maior densidade de semeadura. Por isso, obteve-se valores próximos de índice de colheita e produção.

O valor de produtividade atingido para o tratamento de 28 plantas/m² está dentro de um nível bastante aceitável, porém acredita-se que a produção deste tratamento foi prejudicada devido à capina manual realizada aos 40 DAE, quando a cultura já havia iniciado o florescimento e a porcentagem de cobertura vegetal era de 66%. Essa prática prejudicou principalmente as plantas cultivadas no menor espaçamento, pois houve um maior revolvimento do solo, devido ao arrancamento das ervas daninhas.

Este deve ter sido o principal motivo da produção obtida pelas plantas cultivadas a uma densidade populacional de 14 plantas/m² terem alcançado aquela obtida pela densidade populacional de 28 plantas/m². Além das prováveis condições de competitividade por fatores essenciais ao crescimento como luz, água e nutrientes que devem ter afetado o tratamento de espaçamento comercial.

Com relação ao número de vagens por planta, a cultura nos evapotranspirômetros apresentou um valor similar ao do tratamento com 14 plantas/m² e 60% maior que o espaçamento adotado pelas lavouras comerciais.

O desempenho da cultura nos evapotranspirômetros, em termos de produção, foi maior 47,5% e 39,2% em relação aos tratamentos de 14 plantas/m² e 28 plantas/m², respectivamente. Os principais fatores que podem ter levado a estes valores de produção foram a aplicação uniforme de água durante todo o ciclo da cultura, sem a ocorrência de períodos de estresse hídrico; condições mais favoráveis de adubação do solo; inexistência de problemas de compactação do solo. Todos esses fatores mesológicos levaram a um favorecimento no crescimento da cultura nos evapotranspirômetros em relação à cultura no campo, como foi visto nos outros itens relativos ao desenvolvimento da cultura até aqui tratados.

4.6. Balanço hídrico

4.6.1. Balanço hídrico nos evapotranspirômetros

No balanço hídrico realizado nos evapotranspirômetros, os termos precipitação e irrigação foram eliminados, pois sempre que ocorria irrigação da bordadura ou chuva, cobriam-se os evapotranspirômetros com capa plástica.

A drenagem profunda foi diariamente verificada através da coleta, em tambores, do volume de água que se elevava acima do lençol freático com nível pré-fixado. Esta era uma forma de verificar a entrada não controlada de água nos evapotranspirômetros. Em três ocasiões, durante o ensaio, aos 58 DAE, 68 DAE e 71 DAE, houve entrada de água nos evapotranspirômetros, porém esses dias foram desconsiderados nos cálculos de balanço de água.

O termo escoamento superficial também foi eliminado devido à borda de 5 cm da caixa do evapotranspirômetro deixada acima da superfície do solo. Os baixos índices pluviométricos e o controle durante a aplicação de água por irrigação contribuíram para o manejo dos evapotranspirômetros.

Além disso, verificou-se diariamente as condições de umedecimento do solo nos evapotranspirômetros para se certificar se as exigências estavam sendo cumpridas. A variação de armazenamento também foi desprezada, ao se considerar períodos maiores do que os diários para a avaliação do consumo de água. Conseqüentemente, a evapotranspiração real era diariamente obtida a partir da leitura

de variação do nível d'água indicada nos reservatórios de alimentação dos evapotranspirômetros (Fig. 2).

Os valores de evapotranspiração calculados através dos evapotranspirômetros corresponderam aos definidos por WRIGHT (1981), onde a evaporação do solo era mínima, porém as condições de umidade do solo na zona das raízes não limitava a transpiração da planta.

Isto foi possível através da colocação de 1 cm de areia sobre o solo dos evapotranspirômetros e posteriormente outra camada de 1,0 cm de solo da área, como descrito no item 3.6.2. A condição de umidade na zona radicular foi discutida no item 4.3, onde se constatou que a 5 e 10 cm de profundidade a tensão de água no solo não alcançou 10 kPa.

A Tabela 7 fornece os valores de evapotranspiração, obtidos através da técnica do balanço hídrico nos evapotranspirômetros, para períodos de 5 dias.

Os resultados apresentados na Tabela 7 demonstram um crescimento da evapotranspiração (ET) até 23 DAE, apesar da demanda atmosférica ter apresentado valores próximos durante este período. Esse aumento no consumo de água da cultura deve-se ao desenvolvimento da cobertura vegetal. Nesse período, a população de plantas era de 50 plantas/m², e o fechamento da cultura ocorreu já por volta de 23 DAE.

Um desbaste drástico foi realizado aos 25 DAE para promover a redução na %CVeg pela metade e a conseqüente redução na evapotranspiração (ET) e no coeficiente de cultura, por isso o período de 25 a 26 DAE foi desconsiderado no cálculo

do balanço hídrico, pois esperou-se um dia para a estabilização do consumo de água das plantas nos evapotranspirômetros.

Tabela 7. Evapotranspiração (ET) medida nos evapotranspirômetros, e evapotranspiração de referência (ET₀), calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981).

Período	ET	Desvio Padrão	ET ₀
---- DAE ----	----- mm -----		----- mm -----
04 - 08	9,2	0,52	25,3
09 - 13	12,3	0,54	26,2
14 - 18	17,9	1,0	26,8
19 - 23	25,6	1,4	26,1
27 - 31	37,2	2,0	32,5
32 - 36	29,9	1,6	25,1
37 - 41	45,2	2,2	35,2
42 - 46	49,7	1,8	37,9
47 - 51	52,1	1,3	34,8
52 - 56	53,2	3,5	31,8
60 - 64	28,0	2,3	22,5
71 - 75	27,6	3,6	29,0
76 - 80	25,5	4,2	33,0

Após o desbaste, a evapotranspiração varia proporcionalmente à evapotranspiração de referência por um período de dez dias (27 a 36 DAE), indicando que a condição de umidade do solo era adequada na zona das raízes.

Após esse período, ocorre um aumento do consumo de água das plantas em relação à demanda da atmosfera, o que provavelmente pode ser explicado pelos seguintes fatores:

- Diferença entre o desenvolvimento da cultura dentro dos evapotranspirômetros e a bordadura, o que levou a condições mais favoráveis de interceptação de energia.
- Crescimento da cultura fora dos limites dos evapotranspirômetros o que levou a uma superestimativa no valor da evapotranspiração.

Esse último fator torna-se tanto mais importante quanto menor for a área de exposição dos evapotranspirômetros. Como ponto de comparação pode-se citar que uma borda de 10 cm de folhagem ao redor de toda a caixa, implica em um aumento de 30% da superfície de evaporação da cultura, para as dimensões dos evapotranspirômetros utilizados neste trabalho.

No final do ciclo, a partir de 71 DAE, há uma diminuição proporcional entre o consumo de água nas plantas nos evapotranspirômetros em relação à evapotranspiração de referência. Este fato é explicado pela redução de atividade das plantas e sua senescência.

4.6.2. Balanço hídrico no campo

O balanço hídrico de campo foi realizado para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², onde foram escolhidos períodos onde a perda de água por drenagem profunda não fosse significativa se comparada às outras componentes deste balanço. Em vista da dificuldade da estimativa acurada dos fluxos de água na base do sistema radicular (drenagem profunda e ascensão capilar), foi feito um manejo de irrigação com aplicação moderada de água e um controle da frente de molhamento pelos tensiômetros.

As Tabelas 8 e 9 apresentam as componentes do balanço hídrico para ambos os tratamentos. O início do balanço hídrico foi a partir de 6 DAE (01/09/94) e se prolongou até 76 DAE (10/11/94), devido às chuvas no final do ciclo, que provocaram o aumento da importância relativa da drenagem profunda no balanço hídrico.

Os baixos valores de precipitação ocorridos durante a maior parte do ensaio, fizeram com que a principal contribuição de água para a planta fosse pela irrigação.

Apesar das condições climáticas favoráveis e do manejo de irrigação adotado (referenciado no tratamento de 28 plantas/m²), a disponibilidade hídrica no tratamento de 14 plantas/m² foi mais favorável e acusou vários períodos com valores elevados de drenagem profunda. Esse fato reduziu o número de períodos confiáveis utilizados para a estimativa da evapotranspiração, através da técnica do balanço hídrico de campo, para o tratamento de menor densidade de semeadura.

O consumo total de água da cultura para o tratamento de 28 plantas/m² foi de 277 mm, para o período de 6 a 76 DAE. O maior consumo de água médio diário foi de

5,6 mm/dia, durante o período de 48 a 53 DAE. Nesse período ocorreu uma alta demanda evaporativa, e o desenvolvimento atingido pela cultura já apresentava 100% de cobertura vegetal.

Tabela 8. Componentes do balanço hídrico de campo: precipitação, irrigação, variação do armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda (Ds) e evapotranspiração (ET) na cultura do feijoeiro, com densidade de semeadura de 14 plantas/m², no ano de 1994, em Campinas - SP

Período	Precipitação	Irrigação	ΔA	Ds	ET
-----DAE-----	-----mm-----				
08 - 13	0	0	-17,2	-7,3	9,9
20 - 27	0	44,0	2,9	0,6	41,7
28 - 34	0	41,3	12,2	-4,2	24,9
35 - 41	6,0	12,1	-11,2	-2,1	27,2
50 - 53	0	0	-20,9	-2,1	18,8
73 - 76	1,0	0	-16,2	-0,8	16,4

Analisando-se as componentes do balanço hídrico, em ambos os tratamentos, percebe-se que a variação de armazenamento de água no solo e a irrigação foram as componentes que mais afetaram o consumo de água. A irrigação foi a entrada de água

do sistema, e o armazenamento é a componente diretamente ligada ao teor de umidade e tensão de água no solo.

Tabela 9. Componentes do balanço hídrico de campo: precipitação, irrigação, variação do armazenamento de água no solo (ΔA), drenagem profunda (Ds) e evapotranspiração (ET) na cultura do feijoeiro, com densidade de semeadura de 28 plantas/m², no ano de 1994, em Campinas - SP.

Período	Precipitação	Irrigação	ΔA	DP	ET
-----DAE-----	-----mm-----				
6 - 13	0	22,0	3,4	-3,48	15,1
14 - 19	0	18,0	-3,4	0,5	21,9
20 - 25	0	24,6	2,5	2,0	24,1
26 - 34	0	60,7	18,3	4,9	47,3
35 - 41	6,0	12,1	-17,6	-0,5	35,2
42 - 47	0	21,0	-3,6	-4,1	20,5
48 - 53	0	31,6	-3,4	-1,6	33,4
54 - 62	45,9	26,6	27,6	-0,2	44,7
63 - 68	10,0	0	-15,0	-2,7	22,3
73 - 76	1,0	0	-13,0	-1,4	12,6

As perdas de água por drenagem profunda, nos intervalos analisados, foram pequenas no tratamento de maior densidade populacional. No tratamento de menor densidade populacional, as perdas por drenagem profunda foram maiores.

No final do ciclo, o aumento da demanda evaporativa da atmosfera não correspondeu proporcionalmente ao aumento da evapotranspiração real, devido ao início da senescência da cultura que levou a uma redução no IAF e %CVeg, além de um aumento na resistência estomática total, como pode ser visto na Fig. 12.

As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados de conversão do consumo de água da cultura do feijoeiro em matéria seca em diferentes fases da cultura.

Tabela 10. Eficiência do uso da água medido nos evapotranspirômetros, a uma densidade de semeadura de 50 plantas/m², e nas condições de campo para o tratamento de 28 plantas/m², no período anterior ao raleamento (6 a 25 DAE),

TRATAMENTO	CONSUMO de ÁGUA	MATÉRIA SECA	EFICIÊNCIA
(plantas/m ²)	(mm)	(g/m ²)	(kg/m ³)
50	74,3	156,9	2,11
28	61,1	73,2	1,20

Tabela 11. Eficiência do uso da água medido nos evapotranspirômetros, a uma densidade de semeadura de 25 plantas/m², e nas condições de campo para o tratamento de 28 plantas/m², no período posterior ao raleamento (26 a 76 DAE).

TRATAMENTO	CONSUMO de ÁGUA	MATÉRIA SECA	EFICIÊNCIA
(plantas/m ²)	(mm)	(g/m ²)	(kg/m ³)
25	395,7	595,5	1,50
28	216,0	495,3	2,29

Tabela 12. Eficiência do uso da água medido nos evapotranspirômetros (ETM), e nas condições de campo para o tratamento de 28 plantas/m², durante todo o ciclo.

TRATAMENTO	CONSUMO de ÁGUA	MATÉRIA SECA	EFICIÊNCIA
(plantas/m ²)	(mm)	(g/m ²)	(kg/m ³)
ETM	470,0	752,4	1,60
28	277,1	568,5	2,05

Na condição de eficiência de uso da água medida após o raleamento nos evapotranspirômetros considerou-se que a matéria seca total aos 76 DAE corresponderia àquela medida aos 81 DAE. Este valor de matéria seca está provavelmente subestimado devido às condições de senescência e desfolhamento

avançado que se encontrava a cultura nos evapotranspirômetros no momento da colheita.

A eficiência do uso da água foi menor nos evapotranspirômetros, em relação ao tratamento de densidade de semeadura, considerando-se todo o ciclo. Isto ocorreu devido a uma superestimativa no consumo de água verificado após o raleamento devido a fatores como crescimento da cultura além da borda dos evapotranspirômetros e efeito de advecção térmica.

Outra forma de se avaliar eficiência do uso da água é através da relação entre produção de grãos e água consumida. Encontrou-se valores de 0,68 e 0,77 kg/m³ para eficiência do uso da água nos evapotranspirômetros e no tratamento de 28 plantas/m², respectivamente, em grãos com teor médio de umidade de 11%. Esses valores estão dentro do recomendado por DOORENBOS & KASSAN (1979) que apresentam valores de eficiência de uso da água para o feijão de 0,30 a 0,60 kg/m³, para grãos com teor médio de umidade em torno de 10%.

4.7. Coeficiente de cultura

4.7.1. Evapotranspirômetros

A forma mais adequada de se analisar o consumo de água das plantas é através das curvas de coeficiente de cultura, pois evita a forte influência do clima no valor medido da evapotranspiração real.

A Fig. 23 apresenta a curva de coeficiente de cultura basal determinada a partir dos dados apresentados na Tabela 7.

No Brasil, LEME (1991) determinou a curva de coeficiente de cultura basal para a cana de açúcar (*Saccharum spp*) utilizando-se também da técnica do evapotranspirômetro de nível constante.

Na confecção da curva do coeficiente de cultura através da técnica do evapotranspirômetro de nível constante, é necessário escolher-se o período de tempo no qual será determinado o consumo médio de água da cultura.

Esse período de tempo deve ter uma duração em dias adequado para atender as seguintes necessidades:

- Deve ser compatível com o tempo mínimo necessário para obter-se uma avaliação confiável da evapotranspiração da cultura de referência, de acordo com o método adotado.
- Deve ser longo o suficiente para tornar possível a hipótese adotada neste trabalho para a realização do balanço hídrico, ou seja, desprezar a variação de armazenamento no cálculo da evapotranspiração real.
- Deve ser curto o suficiente para dar informações úteis à irrigação das culturas e atender à sua dinâmica.

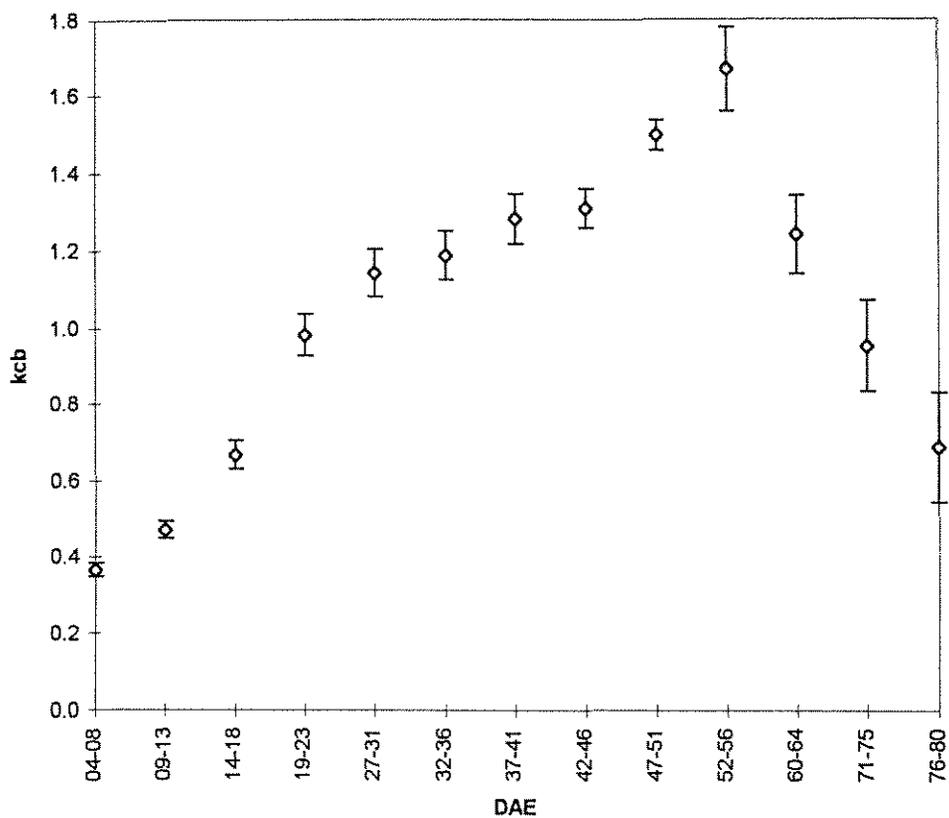


Figura 23. Curva de coeficiente de cultura basal do feijoeiro, calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), para períodos de 5 dias, no ano de 1994, em Campinas - SP.

Os períodos normalmente utilizados e recomendados para estudos de coeficiente de cultura variam de 5 a 10 dias (SMITH, 1992; DOORENBOS & PRUITT, 1976; CURY, 1985; ENCARNAÇÃO, 1980; ENCARNAÇÃO, 1987 e PAVANI, 1985).

O período de dez dias é o comumente recomendado e adotado pela FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1976; SMITH, 1992), para simulação das curvas de coeficiente de cultura. Contudo, através do monitoramento do desenvolvimento da cobertura vegetal realizado nos evapotranspirômetros, percebe-se que o período de dez dias torna-se muito longo, devido à velocidade do incremento da porcentagem de cobertura vegetal apresentada pela cultura nos evapotranspirômetros (Fig. 16). Portanto, quanto maior o período de tempo escolhido para a análise, menores serão os efeitos da variação de armazenamento sobre a estimativa do valor do coeficiente de cultura basal, porém maior será a variação dos parâmetros de desenvolvimento da planta.

Deste modo, a análise foi realizada para períodos de 5 dias. Não existe argumentação suficiente na literatura para decidir-se sobre a duração do período de cálculo para a evapotranspiração.

Os altos valores do coeficiente de cultura basal encontrados a partir de 37 DAE são devido ao crescimento além da borda dos evapotranspirômetros, como discutido no ítem 4.6.1, aliado a uma condição de advecção térmica.

Em trabalhos de avaliação de consumo de água das plantas, utilizando evapotranspirômetros, é comum encontrar-se valores elevados de coeficiente de cultura obtidos através de evapotranspirômetros de nível constante, semelhantes aos

utilizados neste trabalho. Isto ocorre, provavelmente devido às condições ambientais dos evapotranspirômetros que favorecem o desenvolvimento potencial da cultura.

Este é o caso do trabalho realizado por ENCARNAÇÃO (1987) com a cultura da batatinha (*Solanum tuberosum* L.), em Piracicaba - SP. Nesse trabalho, o autor encontrou, através do método de Penman modificado (o mesmo adotado no presente estudo), um valor máximo de 1,38 para o coeficiente de cultura calculado por pântadas. No método do tanque classe A, esse autor encontrou-se um valor máximo de 1,63.

CURY (1985), utilizando o mesmo método de Penman modificado, encontrou valores de coeficiente de cultura médio para períodos de dez dias de 1,59, em cultura de repolho (*Brassica oleracea* L.). O valor máximo calculado para o método do tanque classe A foi de 1,60.

ENCARNAÇÃO (1980), em trabalho realizado com a cultura do feijão, variedade Goiano Precoce, obteve o valor de coeficiente de cultura máximo de 1,41, para períodos de 5 dias, utilizando o método de Penman. PAVANI (1985), trabalhando com a mesma variedade, semeou a uma densidade populacional de 12,5 plantas/m² e obteve o valor máximo de k_c decendial de 1,27, utilizando o método do tanque classe A.

4.7.2. Campo

As curvas do coeficiente de cultura ao longo do tempo, para os tratamentos de densidade populacional de 14 e 28 plantas/m², encontram-se nas Fig. 24 e 25.

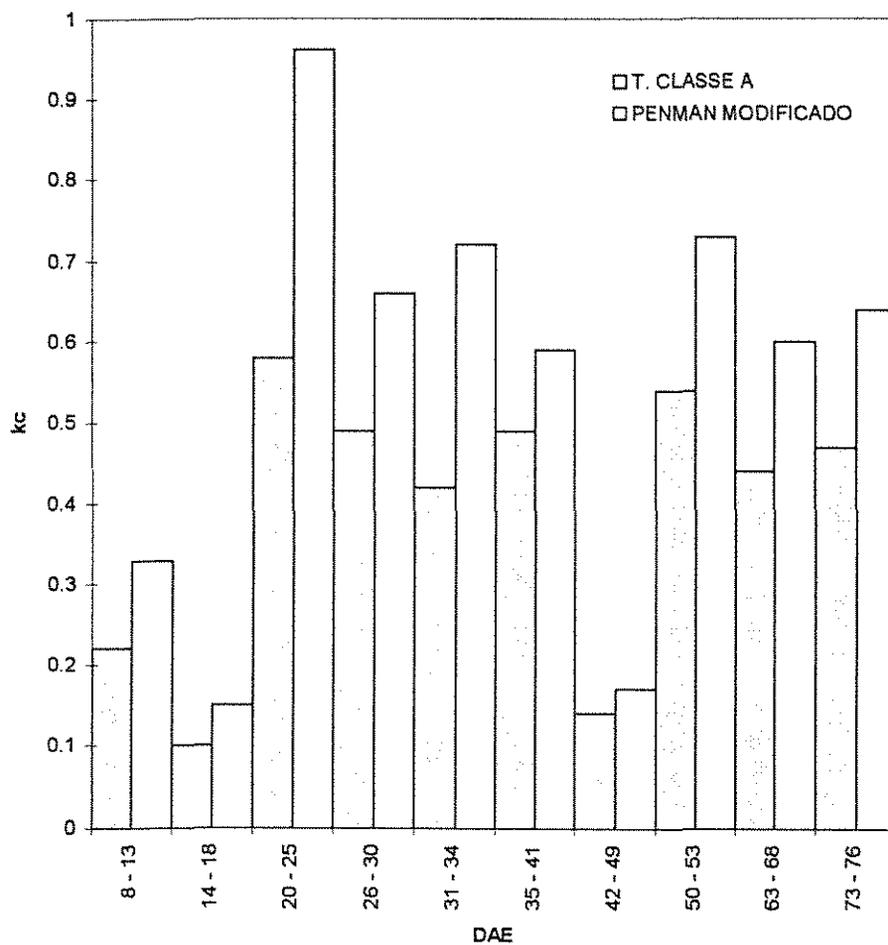


Figura 24. Curva de coeficiente de cultura para a cultura do feijoeiro, com uma densidade populacional de 14 plantas/m², calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e tanque Classe A, no ano de 1994, em Campinas - SP.

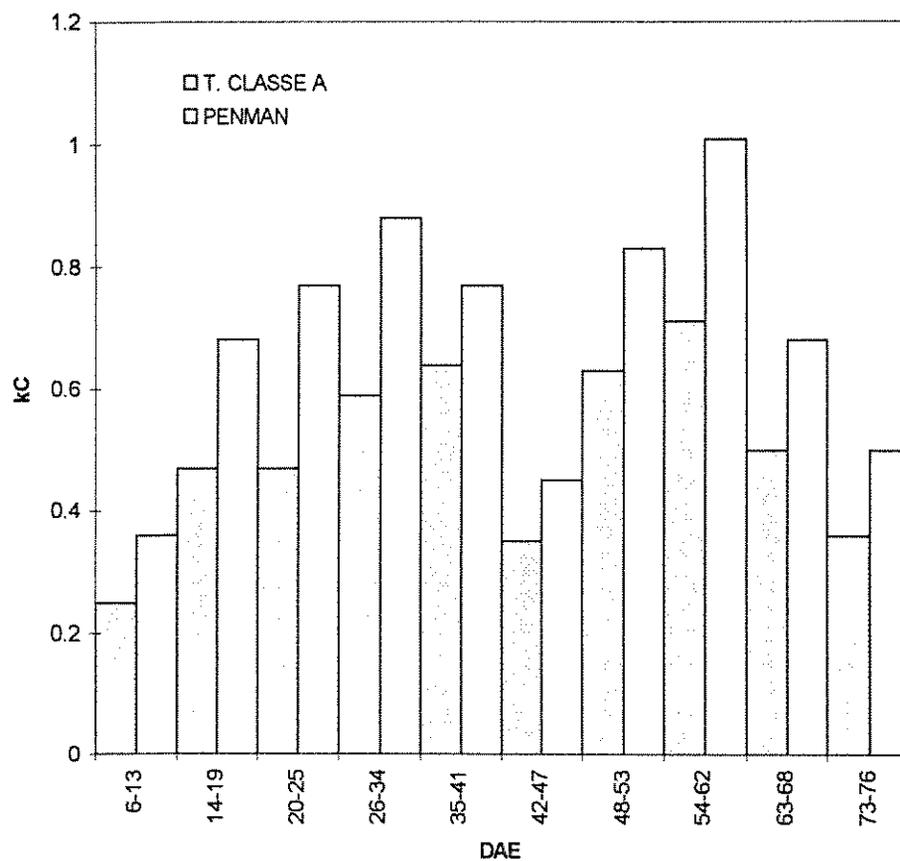


Figura 25. Curva de coeficiente de cultura para a cultura do feijoeiro, com uma densidade populacional de 28 plantas/m², calculada pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981) e tanque Classe A, no ano de 1994, em Campinas - SP.

A partir dessas figuras pode-se observar a diferença que existe entre curvas de coeficiente de cultura derivadas de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração de referência. Devido ao método do tanque classe A ter registrado maiores valores de demanda evaporativa, como pôde ser visto na Fig. 5, os valores do coeficiente de cultura foram menores.

O balanço hídrico realizado no tratamento de menor densidade populacional acusou valores elevados de drenagem profunda. Conseqüentemente, reduziu-se o número de pontos amostrados para a confecção da curva do coeficiente de cultura desse tratamento.

As curvas do coeficiente de cultura das densidades populacionais de 14 e 28 plantas/m², mostram a ocorrência de valores muito baixos, possivelmente refletindo um efeito de estresse hídrico da cultura de 42 a 49 DAE.

No período de 42 a 49 DAE a demanda evaporativa da atmosfera foi de 8,0 mm/dia, pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), sendo que a demanda média do ensaio foi de 5,9 mm/dia. Essa alta taxa de evapotranspiração de referência provocou uma diminuição na água disponível do solo, que atingiu o seu valor mínimo de 37,5% aos 48 DAE, apesar das irrigações realizadas aos 40 e 42 DAE, com lâminas de 12 e 21 mm, respectivamente (Fig. 6). Portanto, fica claro o efeito tanto do déficit de água no solo como do aumento da demanda evaporativa da atmosfera sobre k_c (DENMEAD & SHAW, 1962; BRUNINI et al., 1981).

Os maiores valores do coeficiente de cultura, para o tratamento de maior densidade populacional, foram atingidos no período de 54 a 62 DAE (19 a 27/10/94), quando a porcentagem de cobertura vegetal média era de 95,3%.

No final do ciclo da cultura, houve uma queda acentuada nos valores de coeficiente de cultura por causa da redução da área foliar e porcentagem de cobertura vegetal, decorrente da senescência e aumento da resistência estomática total (Fig. 12).

4.8. Relação entre o coeficiente de cultura, porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg) e índice de área foliar (IAF)

4.8.1. Evapotranspirômetros

A curva de coeficiente de cultura basal apresentada pela Fig. 23, se analisada isoladamente, não reflete adequadamente o histórico da cultura nos evapotranspirômetros.

O que se observa nessa figura é uma estabilização do coeficiente de cultura logo após o desbaste, em vez de uma queda abrupta. Isto pode ser explicado através da análise do comportamento da porcentagem de cobertura vegetal dos evapotranspirômetros:

- No momento do desbaste, os evapotranspirômetros praticamente estavam com cobertura total, e um IAF de 3,2 (valor medido), porém, a porcentagem de cobertura vegetal média nos 5 dias anteriores ao desbaste era de 91%.
- Logo após o desbaste, aos 25 DAE, voltou-se a calcular o valor de k_{cb} , só que excluiu-se o período de 25 a 26 DAE para se ter uma estabilização no consumo de água nos evapotranspirômetros, pois observou-se exudação de água pelo colmo. A

porcentagem de cobertura vegetal para o período seguido ao desbaste, 27 a 31 DAE, estava em torno de 65%, no período subsequente (32 a 36 DAE), a porcentagem de cobertura vegetal era de 83% e IAF de 3,2 (valor estimado pela equação 45).

Nota-se que os valores de porcentagem de cobertura vegetal média depois do desbaste se aproximaram rapidamente dos valores médios antes do desbaste, conseqüentemente o efeito da variação de porcentagem de cobertura vegetal sobre o valor de k_{cb} foi amenizado.

O desenvolvimento da cultura nos evapotranspirômetros teve um ótimo desempenho devido às condições ambientais extremamente favoráveis, principalmente o seu solo sem compactação e o suprimento contínuo de água para a planta. Conseqüentemente, a simples utilização de uma relação entre k_{cb} e DAE estaria restrita a uma cultura que tivesse o mesmo desempenho daquele obtido nos evapotranspirômetros. Essa é a principal dificuldade para a transferência de curvas de coeficiente de cultura desenvolvidas sob condições experimentais controladas para as várias condições apresentadas pela cultura no campo.

Deste modo, optou-se pela elaboração de uma relação entre k_{cb} e parâmetros que refletissem o desenvolvimento da cultura, no presente trabalho utilizou-se da %CVeg e do IAF.

As Fig. 26 e 27 apresentam os valores de k_{cb} em função da %CVeg e do IAF estimado pela equação 45, para o período de desenvolvimento e formação do dossel vegetativo da cultura. Nessas figuras percebe-se o aumento de k_{cb} em função do aumento de %CVeg e do IAF.

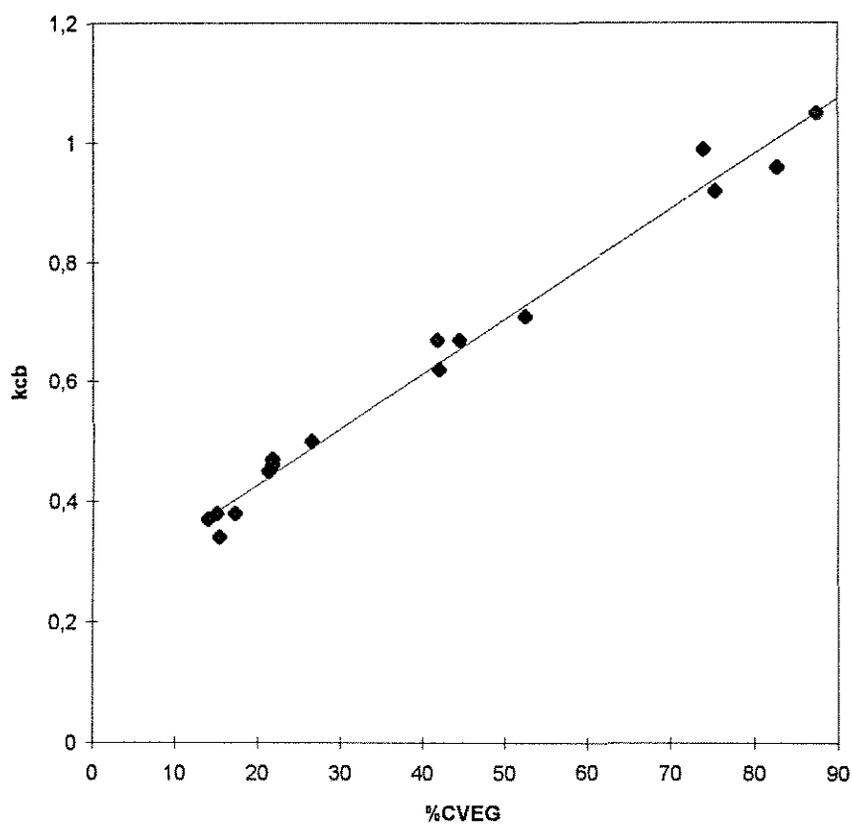


Figura 26. Coeficiente de cultura basal (k_{cb}) para a cultura do feijoeiro, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), durante o período de 4 a 24 DAE, em função da porcentagem de cobertura vegetal (%Cveg), em Campinas - SP.

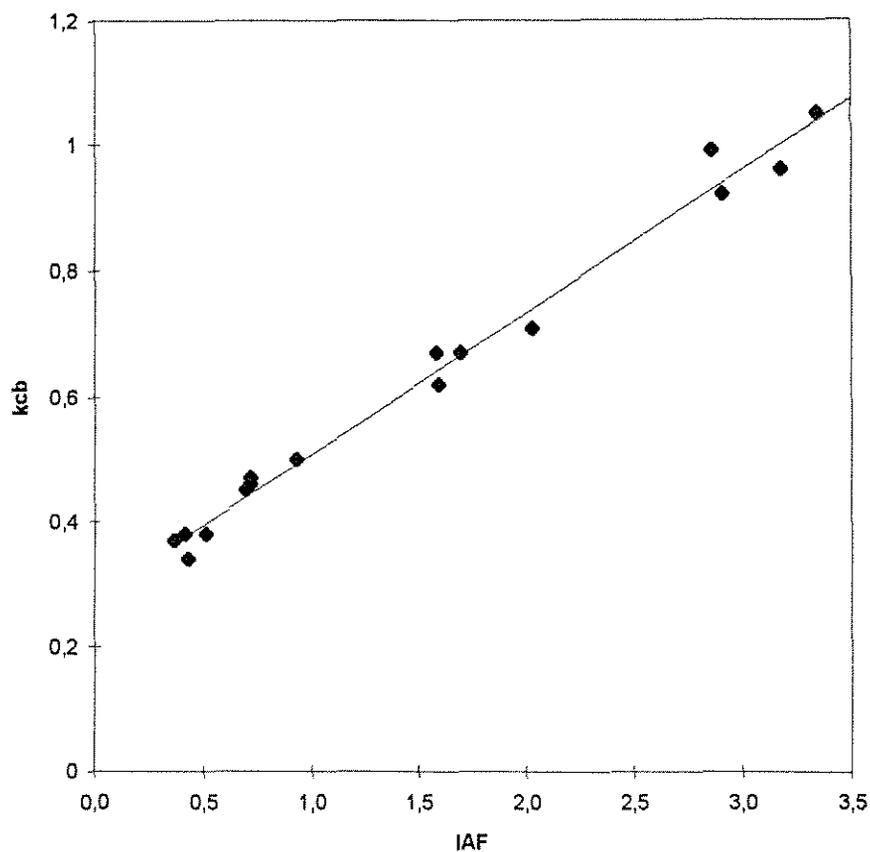


Figura 27. Coeficiente de cultura basal (k_{cb}) para a cultura do feijoeiro, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), durante o período de 4 a 24 DAE, em função do Índice de área foliar (IAF), no ano de 1994, em Campinas - SP.

Os maiores valores de k_{cb} ocorreram quando a cultura estava com a cobertura vegetal completa. Essa análise foi feita para o período de 4 a 24 DAE.

Escolheu-se esse período por representar a fase de crescimento ativo da cultura até o seu fechamento, e porque após o desbaste ocorre uma superestimativa do valor de k_{cb} devido ao crescimento além das bordas dos evapotranspirômetros pela cultura.

A relação obtida entre k_{cb} e %CVeg, número de pontos (n) e o coeficiente de correlação (r), foi:

$$k_{cb} = 0,244 + 0,0092 * \%CVeg \quad n = 16 \quad r = 0,99^{**} \quad (46)$$

A relação obtida entre k_{cb} e IAF, número de pontos (n) e o coeficiente de correlação (r), foi:

$$k_{cb} = 0,282 + 0,226 * IAF \quad n = 16 \quad r = 0,99^{**} \quad (47)$$

Após o desbaste, realizou-se uma análise seqüencial do coeficiente de cultura basal, devido ao rápido desenvolvimento apresentado pela cultura nos evapotranspirômetros.

Para esta análise calculou-se o coeficiente de cultura basal em períodos de tempo consecutivos, de forma seqüencial, ou seja, onde ocorria uma sobreposição de períodos.

Como exemplo, mostramos duas seqüências usadas no cálculo de k_{cb} de forma seqüencial, utilizando períodos de 5 dias:

1ª seqüência: 27 a 31 DAE

2ª seqüência: 28 a 32 DAE

A Fig. 28 apresenta os valores seqüenciais do coeficiente de cultura basal, dos evapotranspirômetros utilizados no presente estudo, no período de 27 a 58 DAE.

A realização desta análise requereu a estimativa diária de valores de %CVeg dos quatro evapotranspirômetros. Essa estimativa foi feita através da técnica de interpolação, utilizando um polinômio de segundo grau.

Na fase de cobertura completa é de se esperar uma estabilização do valor de k_{cb} , o que levaria a uma independência de k_{cb} com relação à %CVeg próximo a um valor de 100%.

Cabe ressaltar que apesar de não haver qualquer relação entre os valores de k_{cb} e %CVeg na faixa de 70 a 95% de cobertura vegetal, encontrou-se um valor médio para período de 5 dias de 1,2.

Após esse período a cultura nos evapotranspirômetros passa a apresentar uma porcentagem de cobertura vegetal em torno de 100% e um crescimento acelerado dos valores de k_{cb} . O principal motivo, como mencionado anteriormente, foi o crescimento da cultura além dos limites dos evapotranspirômetros

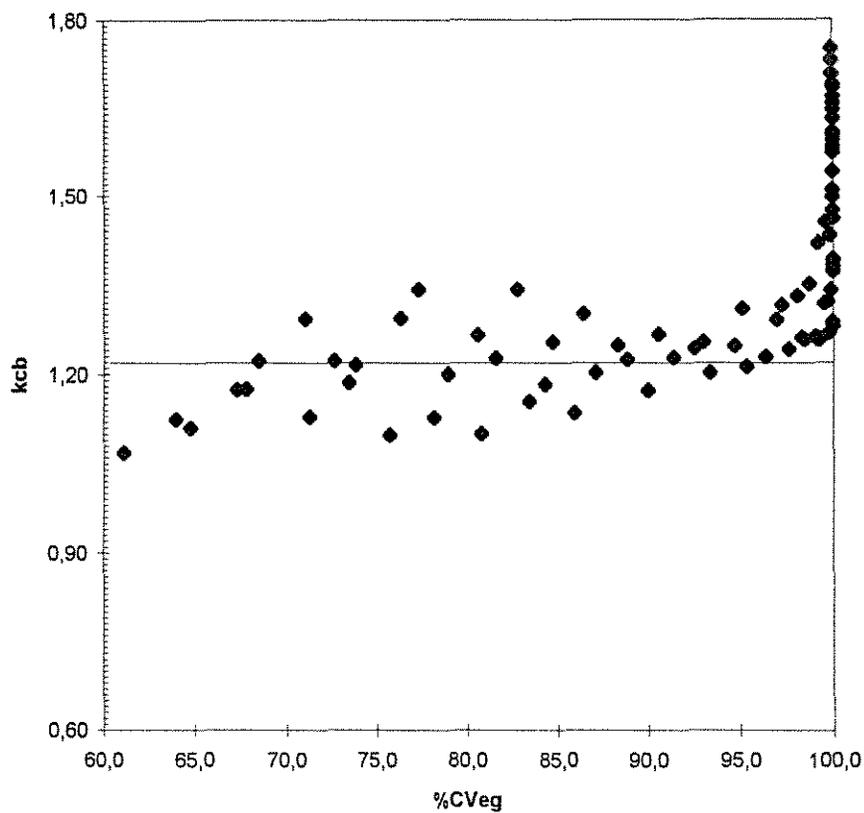


Figura 28. Variação do coeficiente de cultura basal (k_{cb}) com relação à porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg), para períodos seqüenciais de 5 dias, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), durante 27 a 58 DAE na cultura do feijoeiro em Campinas - SP.

Através da equação 46 obteve-se que o valor de k_{cb} atinge 1,0 quando o valor de %CVeg alcança 82%. Esse resultado obtido concorda com recomendações da FAO de se adotar uma relação linear entre o início do ciclo da cultura até atingir-se 80% da %CVeg, quando se alcança o valor máximo do coeficiente de cultura.

TAN & FULTON (1980) encontraram que o valor do coeficiente de cultura para o milho atingiu o valor máximo de 1,0 quando a porcentagem de cobertura vegetal chegou a 80%.

Com relação ao IAF, através da equação 47, obteve-se que o valor de k_{cb} atinge 1,0 quando o IAF alcança 3,2. Isto concorda com os resultados de RITCHIE & JOHNSON (1990), onde os autores recomendam a utilização de um valor do coeficiente de cultura 1,0 quando a cultura atinge um IAF de 3,0. Outros autores encontraram o mesmo resultado trabalhando em diferentes locais e culturas (AL-KAISI & BRUN 1989, WRIGHT, 1982 entre outros).

Após a cultura atingir 80% de cobertura vegetal, é recomendado a adoção de um valor constante máximo de coeficiente de cultura de 1,05 a 1,2. Como visto anteriormente, encontramos um valor médio de coeficiente de cultura de 1,2 para a faixa de 70 a 95% de %CVeg, o que está dentro do proposto pela FAO.

Após a cobertura total ter sido atingida, os valores de k_{cb} permaneceram elevados até 71 DAE (05/11/94) quando começa a fase descendente do valor deste coeficiente. Nessa fase, o efeito do crescimento além da borda verificado durante o ensaio foi compensado por dois fatores:

- diminuição do IAF e da %CVeg nos evapotranspirômetros devido ao período de senescência.

- maior uniformidade de altura e desenvolvimento entre a cultura dentro e fora do evapotranspirômetro.

Por esses motivos, procedeu-se à análise da relação entre a %CVeg e k_{cb} na fase de senescência da cultura. A análise foi realizada a partir de 72 DAE, de forma seqüencial, para os quatro evapotranspirômetros.

A Fig. 29 apresenta a variação de k_{cb} com %CVeg verde, detectado pelo método da fotografia (ARRUDA, 1984), na fase final do ciclo, para os quatro evapotranspirômetros. Não se procedeu à análise com IAF, já que a relação entre %CVeg e IAF pode não ser mantida.

Avaliando-se conjuntamente todos os pontos, não foi possível estabelecer uma relação satisfatória única entre k_{cb} e %CVeg; entretanto, ao se analisar separadamente, para cada evapotranspirômetro, o comportamento de k_{cb} em relação à variação de %CVeg, nota-se que ocorre um comportamento semelhante.

Deste modo, foi feita uma análise de regressão linear para cada evapotranspirômetro, onde procurou-se determinar o coeficiente angular da reta que exprime o comportamento da relação entre k_{cb} e %CVeg. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 13.

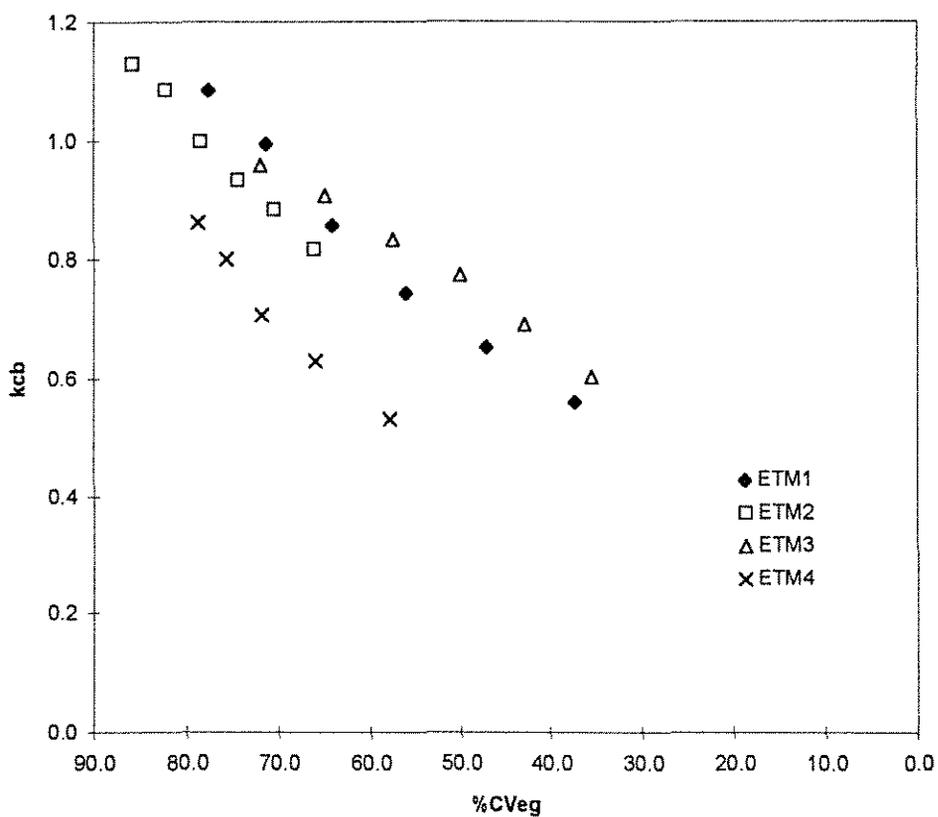


Figura 29. Variação do coeficiente de cultura basal (k_{cb}) com relação à porcentagem de cobertura vegetal (%CVeg), para a cultura do feijoeiro, no período de 72 a 81 DAE, calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), em Campinas - SP.

Tabela 13. Variação de k_{cb} com relação à porcentagem de cobertura vegetal, para cada evapotranspirômetro (ETM), no período de 6 a 16/11/94 (fase de decréscimo da cobertura vegetal) para a cultura do feijoeiro, em Campinas - SP.

ETM	Coefficiente angular	Intervalo de confiança	nº de pontos	Coefficiente de correlação (r)	Variação da %CVeg média (%)
1	0,0131	$0,0085 < \beta < 0,0178$	6	0,992	77,7 - 37,4
2	0,0163	$0,0116 < \beta < 0,0211$	6	0,995	85,8 - 66,2
3	0,00986	$0,0076 < \beta < 0,0121$	6	0,997	71,9 - 35,6
4	0,0136	$0,0077 < \beta < 0,0196$	6	0,988	78,7 - 47,5

Nessa tabela, apresenta-se o valor do coeficiente angular da reta para cada evapotranspirômetro junto com o seu intervalo de 95% de confiança (β)

Percebe-se, pelos resultados obtidos, que há uma sobreposição entre os intervalos de confiança para todos os evapotranspirômetros, mesmo entre os evapotranspirômetros que apresentaram o maior e o menor valor de coeficiente angular da reta.

Deste modo, dentro do intervalo de confiança de 95%, não há diferença significativa entre os coeficientes angulares das retas. Por isso, para exprimir o comportamento da variação de k_{cb} de acordo com o aumento da %CVeg, calculou-se a média dos coeficientes angulares estimados.

Considerando-se que o valor do coeficiente de cultura basal médio começa a reduzir-se de 1,0 a partir de 80% de cobertura vegetal, a equação da reta que estima a variação de k_{cb} com relação à %CVeg, para o período de senescência, numa faixa de variação de 80 a 35% de cobertura vegetal, seria dada por:

$$k_{cb} = 0,0132 * \%CVeg \quad (48)$$

A tabela 14 apresenta as relações obtidas entre k_{cb} e %CVeg para as três fases analisadas da cultura neste trabalho: da emergência ao fechamento da cultura (15 a 80% de cobertura vegetal), durante a fase de cobertura total (80 a 100% de cobertura vegetal) e na fase de senescência (80 a 35% de cobertura). Durante a fase de cobertura total recomenda-se um valor mais comum em irrigação, porém o valor de 1,2 encontrado neste trabalho justifica-se devido às possíveis condições de advecção apresentadas durante o ensaio.

Tabela 14. Relação entre %CVeg e k_{cb} para as fases de crescimento ativo da cultura, fase de estabilização do valor de k_{cb} e fase de senescência.

Variação da cobertura vegetal (%)	Relação entre k_{cb} e %CVeg
15 - 80	$k_{cb} = 0,231 + 0,00962 * \%CVeg$
80 - 100	$k_{cb} = 1,0$
80 - 35	$k_{cb} = 0,0132 * \%CVeg$

4.8.2. Campo

As Fig. 30 e 31 apresentam a relação entre %CVeg e IAF com o coeficiente de cultura para o tratamento de 28 plantas/m², utilizando o método de Penman modificado, para o período de 6 a 62 DAE, correspondente ao período de crescimento da cultura. Nessas figuras, é também apresentada a curva de coeficiente de cultura basal estimada a partir das relações apresentadas na tabela 14.

A partir da análise destas figuras, percebe-se que houve um aumento no valor do coeficiente de cultura observado em função da evolução da %CVeg e IAF, até o momento em que ocorre uma queda abrupta devido à alta demanda evaporativa e diminuição da água disponível no solo verificado por volta dos 40 DAE, como discutido no item 4.7.2. Após esse período particular, a cultura apresenta uma recuperação, atingindo o valor máximo de consumo de água próximo a 100% de cobertura vegetal e IAF igual a 3,7.

Nas Fig. 30 e 31, percebe-se que os valores de k_c , antes de se atingir o período de estresse hídrico, foram maiores que os valores estimados de k_{cb} . Isto provavelmente ocorreu devido à influência do umedecimento da superfície do solo.

Nesse tipo de estudo de campo, trabalha-se com valores de coeficiente de cultura, onde ocorre a influência do umedecimento e secamento do solo, além da própria influência do desenvolvimento da cultura. Por isso, o desenvolvimento de relações entre o coeficiente de cultura (k_c), como os obtidos no ensaio de campo, e parâmetros de desenvolvimento da cultura não se mostram tão adequadas se não forem feitas a partir de uma padronização das condições de umedecimento do solo, como sugere WRIGHT, (1981). Em outras palavras, seria feita a partição da influência dos fenômenos de evaporação do solo e transpiração da planta sobre as necessidades hídricas da cultura.

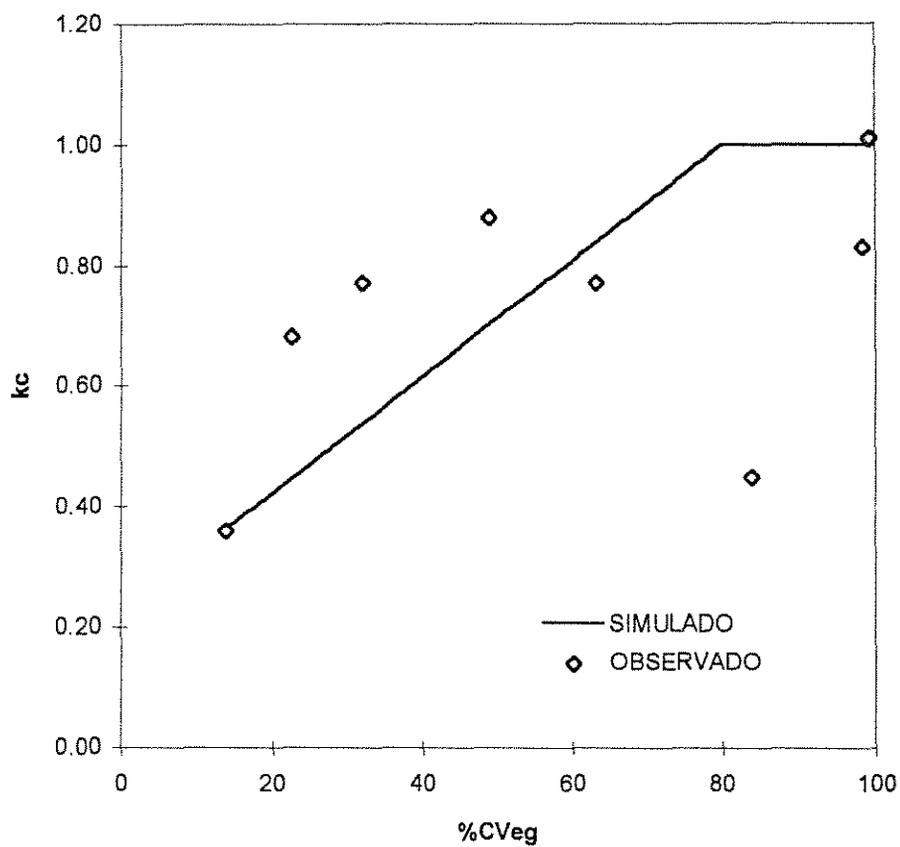


Figura 30. Coeficiente de cultura (k_c), observado e simulado para o tratamento de 28 plantas/m², calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), em função da cobertura vegetal (%CVeg), durante o ciclo da cultura do feijoeiro, no ano de 1994, em Campinas - SP.

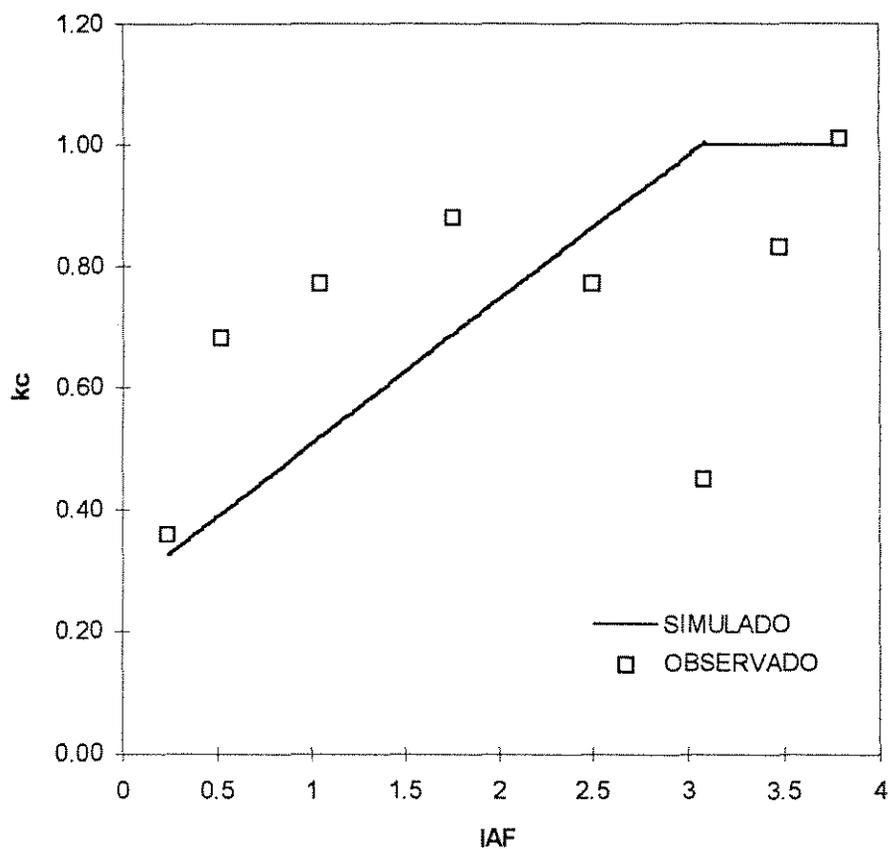


Figura 31. Coeficiente de cultura (k_C), observado e simulado para o tratamento de 28 plantas/m², calculado pelo método de Penman modificado (VILLA NOVA & OMETTO, 1981), em função do índice de área foliar (IAF), durante o ciclo da cultura do feijoeiro, no ano de 1994, em Campinas - SP.

4.9. Análise temporal do coeficiente de cultura

Elaborou-se a curva de coeficiente de cultura, em função do tempo, para a cultura do feijão conduzida no campo, em ambos os tratamentos de densidade populacional, para as seguintes situações:

- a partir dos valores sugeridos pela FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1976);
- através das equações discriminadas na Tabela 14 e a partir da equação 47, adotando-se o valor máximo de 1,0 para k_c quando a cultura atinge um IAF de 3,0 e %Cveg de 80%.

As Fig. 32, 33, 34 e 35 apresentam as curvas de coeficiente de cultura para as situações analisadas.

Na elaboração das curvas do coeficiente de cultura simuladas através das equações discriminadas na tabela 14 e equação 47, tornou-se necessário a estimativa da %CVeg e do IAF diários. Isto foi obtido através do ajuste das medidas desses parâmetros, realizadas durante o ciclo, por meio de equações polinomiais.

As equações para a estimativa da %Cveg e IAF em função do tempo foram:

a) Tratamento de 14 plantas/m²

Durante todo o experimento adotaram-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \%CVeg &= 2,395 - 0,0823*DAE + 0,0439*DAE^2 - 0,00042*DAE^3 & (49) \\ n &= 18 \quad r = 0,99^{**} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} IAF &= 0,177 - 0,0496*DAE + 0,00357*DAE^2 - 3,378*10^{-5}*DAE^3 & (50) \\ n &= 16 \quad r = 0,98^{**} \end{aligned}$$

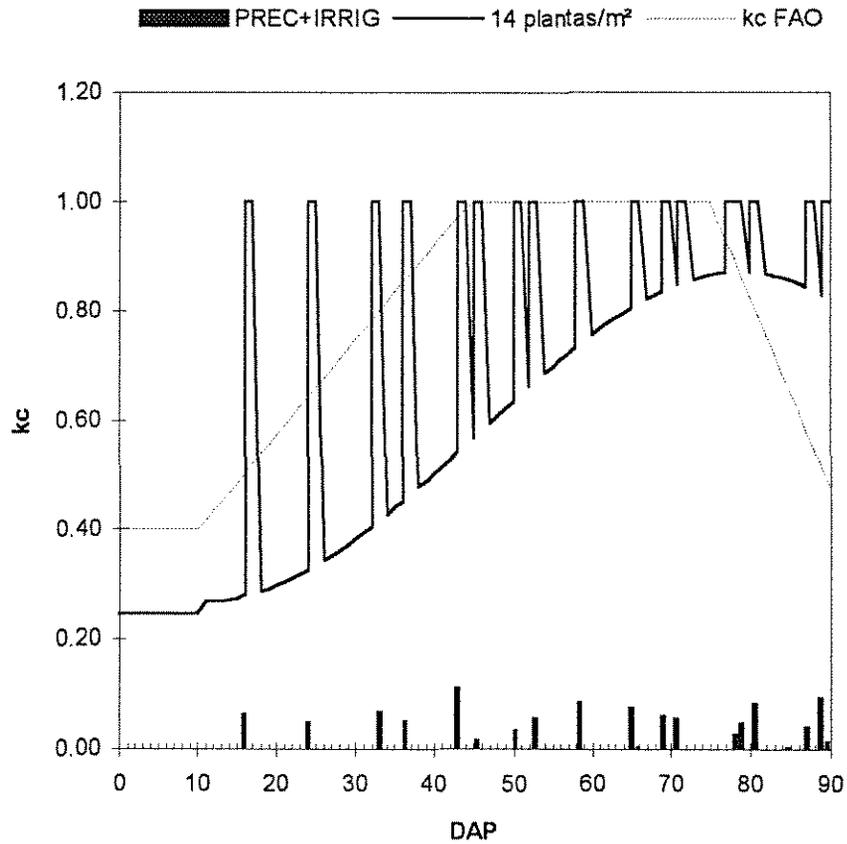


Figura 32. Curva de coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva de coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária da %CVeg, para uma população de 14 plantas/m², em função de dias após o plantio (DAP).

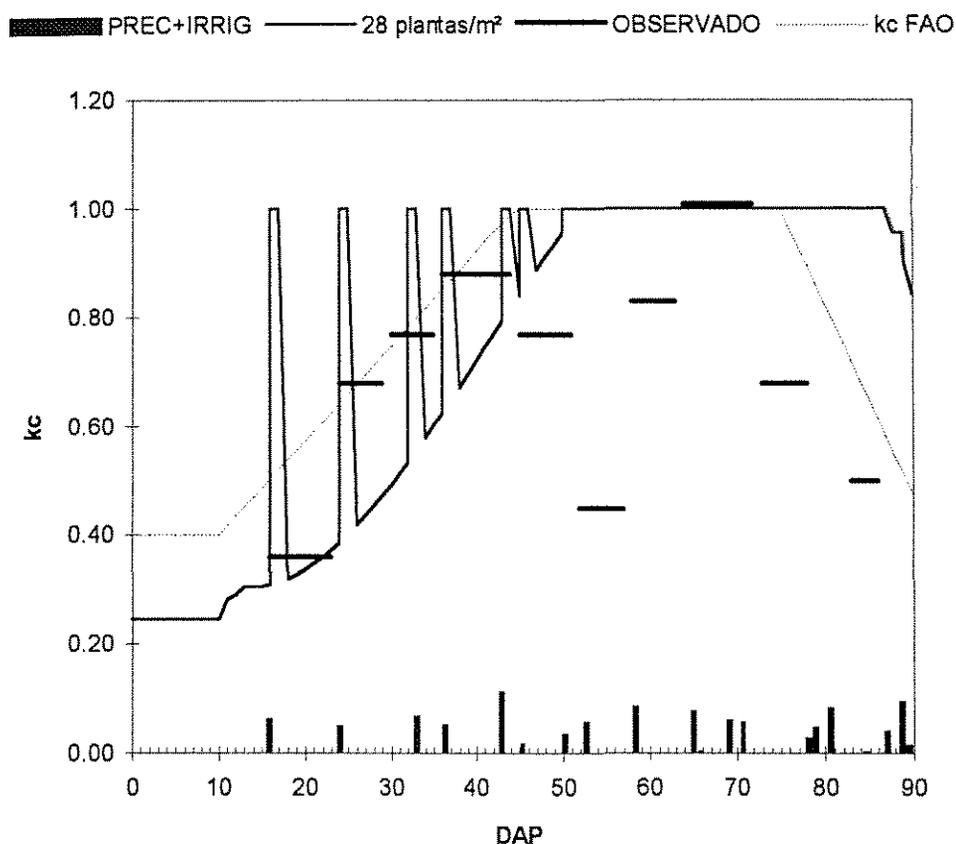


Figura 33. Curva de coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva de coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária da %CVeg, e valores médios observados de coeficiente de cultura através da técnica do balanço hídrico de campo, para uma população de 28 plantas/m², em função de dias após o plantio (DAP).

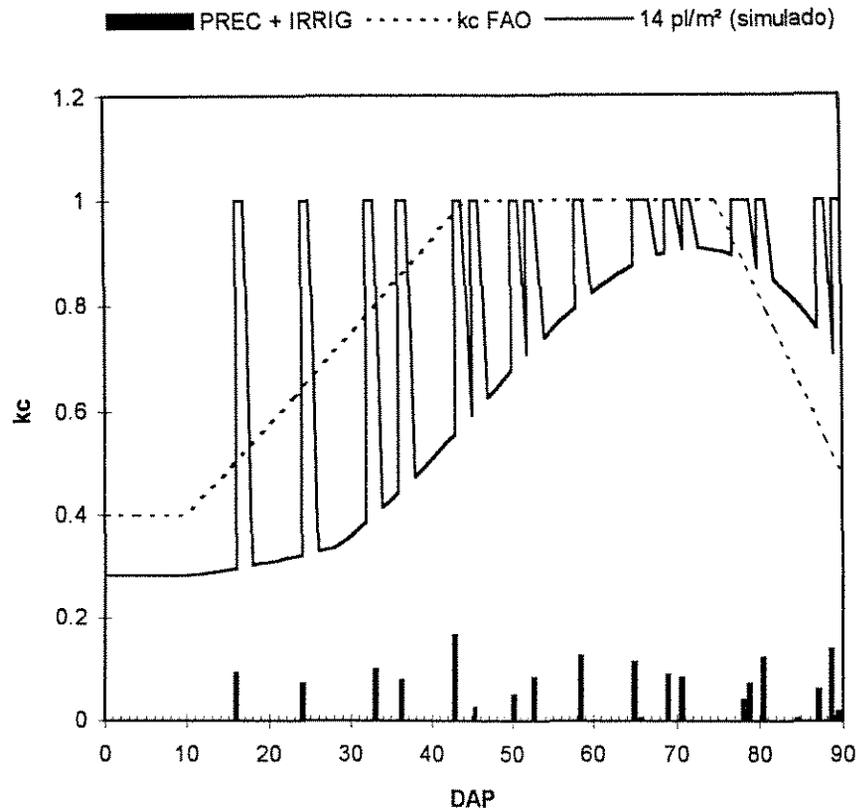


Figura 34. Curva do coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva do coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária do IAF, para uma população de 14 plantas/m², em função de dias após o plantio (DAP).

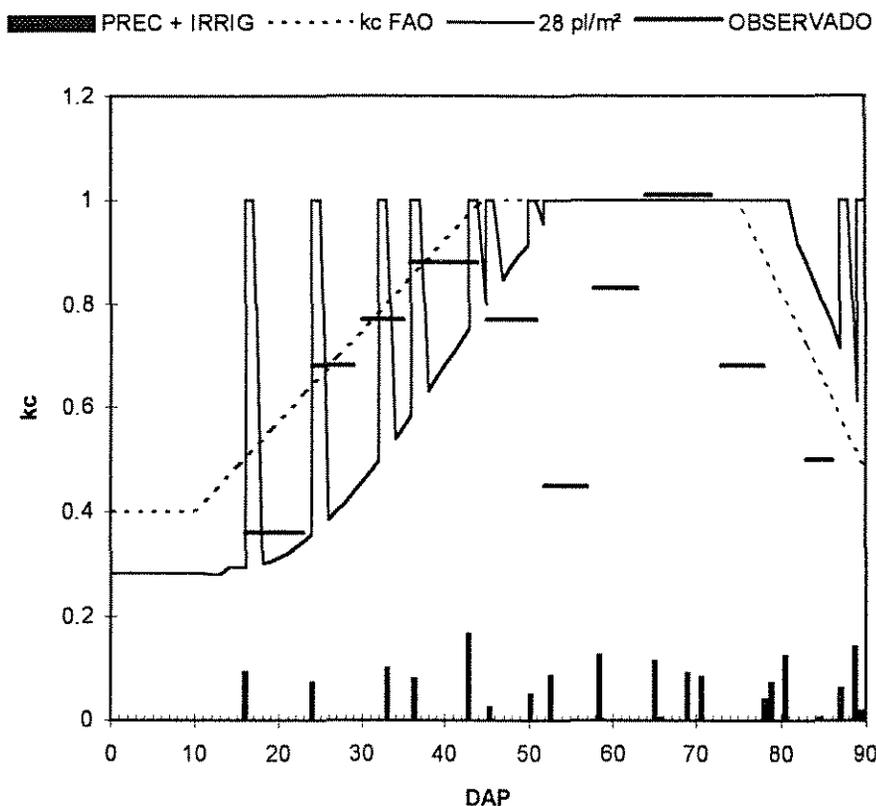


Figura 35. Curva de coeficiente de cultura recomendada pela FAO para a cultura do feijoeiro, curva de coeficiente de cultura simulada para o feijoeiro, baseada na variação diária do IAF, e valores médios observados do coeficiente de cultura através da técnica do balanço hídrico de campo, para uma população de 28 plantas/m², em função de dias após o plantio (DAP).

b) Tratamento de 28 plantas/m²

Durante todo o experimento adotaram-se as seguintes relações:

$$\%CVeg = 7,930 - 0,784*DAE + 0,111*DAE^2 - 0,00119*DAE^3 \quad (51)$$

$$n=18 \quad r = 0,98^{**}$$

$$IAF = 0,163 - 0,0465*DAE + 0,00487*DAE^2 - 5,162*10^{-5}*DAE^3 \quad (52)$$

$$n = 16 \quad r = 0,99^{**}$$

Nesse trabalho simulou-se também a variação do coeficiente de cultura após a irrigação. Adotou-se que no dia em que ocorreu chuva ou irrigação, e no dia seguinte, o valor do coeficiente de cultura atingiu o valor 1,0. Por falta de informação explícita adotou-se que no segundo dia após a irrigação este valor retorna ao valor de k_{cb} .

AL-KHAFAT et al. (1978) encontraram que a evaporação potencial do solo acontece também no primeiro dia após a irrigação, até a evaporação acumulativa do solo ter alcançado 5,8 mm. Neste período, entre o dia da irrigação e o seguinte, o valor do coeficiente de cultura iguala-se a 1,0.

WRIGHT (1981) adotou o período de 5 dias após a irrigação para que um solo nu ou com pequena cobertura vegetal retorne à condição do coeficiente de cultura basal, nas condições de Kimberly - Idaho. Para solos arenosos o autor recomenda três dias, e para solos argilosos sete ou mais dias.

A escolha de um dia após a irrigação para se manter o valor de k_c igual à unidade, deveu-se ao fato de que o tipo de solo tropical utilizado no presente estudo,

tem um comportamento semelhante a solos de textura média ou mais arenosa de regiões de clima semi-árido e temperado. Observa-se nestes solos que após uma irrigação feita no período da manhã, a superfície se encontra totalmente seca já no final da tarde, diferente do que se observa num solo de mesma textura em região semi-árida, segundo ARRUDA² (1995). Certamente, a definição do número de dias após a irrigação em que o valor de k_c permanece 1,0 merece ser melhor investigado

A estimativa diária do valor de k_c através de metodologia proposta pela FAO, foi feita através do critério apresentado na Tabela 15. Nesta tabela, a fase inicial corresponde ao período entre o plantio e a emergência.

Tabela 15. Valores adotados de coeficiente de cultura (k_c), de acordo com metodologia proposta por DOORENBOS & PRUITT (1976), para a cultura do feijoeiro no período de agosto a novembro de 1994, em Campinas - SP.

Fase da cultura	Período	Coeficiente de cultura k_c
Fase inicial	16 a 26/08/1994	0,4
Fase de desenvolvimento	1 a 35 DAE	$0,4 + 0,0174.DAE$
Fase intermediária	36 a 65 DAE	1,0
Fase final	66 a 85 DAE	$3,275 - 0,035.DAE$

² ARRUDA, Flávio Bussmeyer. Comunicação verbal. Seção de Irrigação e Drenagem : Instituto Agrônômico, Campinas. 1995.

Na fase de desenvolvimento, devido à dificuldade de se prever antecipadamente o dia em que a cultura atinge 80% de cobertura vegetal, adotou-se o seu término no início do florescimento, que para o feijão ocorre de 30 a 35 DAE (BULISANI et al. 1987). O valor diário de k_C é estimado através da reta definida pelo valor de $k_C = 0,4$, ocorrido no primeiro dia (emergência), e $k_C = 1,0$ ocorrido no último dia da fase de desenvolvimento.

Na fase intermediária adotou-se um período de 30 dias, como recomendado por DOORENBOS & PRUITT (1976).

Na fase final estimou-se a reta definida por $k_C = 1,0$, aos 65 DAE, e $k_C = 0,3$, aos 85 DAE, que é a data definida para o final do ciclo da cultura, de acordo com recomendação da FAO (1976).

A principal limitação na curva de coeficiente de cultura da FAO, está na definição do comprimento das fases de desenvolvimento da cultura. A definição do momento em que a cultura atingirá 80% de cobertura vegetal variará de acordo com as condições ambientais, tais como: temperatura, disponibilidade de água, compactação e fertilidade do solo, entre outros, além do espaçamento da cultura.

Isto pode ser observado a partir das Fig. 32, 33, 34 e 35 onde a curva de coeficiente de cultura, proposta pela FAO, não simulou adequadamente a cultura do feijão semeada a diferentes espaçamentos, visto que o tratamento de 14 plantas/m² não apresentou uma cobertura de solo completa, atingindo um valor máximo de 70%.

Muitos autores tem verificado que o máximo consumo de água da cultura do feijoeiro ocorre entre o florescimento e o enchimento de grãos (ENCARNAÇÃO, 1980; PAVANI, 1985; OLIVEIRA & SILVA, 1990). A FAO (DOORENBOS & KASSAN, 1979)

inclui o período de floração e formação da vagem na fase intermediária de desenvolvimento da cultura do feijoeiro, onde o valor de k_c varia de 1,05 a 1,2.

Através das Fig. 32 e 34, para o tratamento de 14 plantas/m², observa-se que o valor máximo de k_c , simulado pelas equações discriminadas na tabela 14 e equação 47, é atingido aos 75 DAE, 40 dias após o florescimento, quando ocorre a máxima %Cveg (70%) e o máximo IAF (2,69). Portanto, o máximo consumo de água passa a ser função da demanda evaporativa máxima e da cobertura vegetal maior que 70%.

Comparando-se as Fig. 32 e 33 com as Fig. 34 e 35, observa-se que a curva do coeficiente de cultura gerada a partir da estimativa do IAF diário e equação 47, simulou o comportamento de k_c mais próximo do observado, no período de senescência, do que a curva gerada a partir da %Cveg diária e relações da tabela 14. Isto ocorreu principalmente no tratamento de 28 plantas/m², o qual apresentou um maior desfolhamento e amarelecimento das folhas. Esse fato sugere que o IAF, obtido de folhas verdes, é um parâmetro melhor que a %Cveg para se estimar k_{cb} no período de senescência.

Um outro aspecto a ser focado diz respeito ao valor do coeficiente de cultura para a fase inicial da cultura, o qual foi estimado em 0,4 pela metodologia da FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1976). Este valor foi considerado alto para as condições de solo utilizado neste trabalho. Através de análise de regressão encontrou-se valores de 0,24 e 0,28 (equações 46 e 47).

O consumo de água da cultura do feijoeiro, nos tratamentos de 14 e 28 plantas/m² foi estimado através das equações discriminadas na Tabela 14, no período entre a emergência e o último dia de irrigação aos 69 DAE. Esse consumo foi de 234,2

mm e 305,6 mm, para os tratamentos de 14 e 28 plantas/m², respectivamente. Através da curva proposta pela FAO o consumo seria de 346,2 mm, ou seja, uma diferença de 47,8% e 13,3% em relação aos tratamentos de 14 e 28 plantas/m², respectivamente.

Conseqüentemente, demonstra-se a importância da utilização de uma curva de coeficiente de cultura que leve em conta o desenvolvimento e o histórico da cultura, e que possa estimar k_C a partir da determinação de dados de cobertura vegetal ou índice de área foliar em tempo real.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

A fase de desenvolvimento da cultura ou de cobertura vegetal incompleta, é a que apresenta maior possibilidade de erro na aplicação de água no solo, quando se deseja realizar um bom manejo de irrigação visando um uso racional da água.

Nessa fase, o valor do coeficiente de cultura basal é diretamente dependente do desenvolvimento apresentado pela cultura no campo. Posteriormente, o valor do coeficiente de cultura é máximo, sendo a estimativa do consumo de água da cultura baseada exclusivamente no método de estimativa da evapotranspiração de referência.

Nas condições de campo, há indicação de que o efeito do déficit hídrico e do molhamento da superfície são importantes na simulação do uso da água no solo e para o manejo de irrigação. Conseqüentemente, há a necessidade de mais pesquisas sobre esses efeitos.

A curva de coeficiente de cultura elaborada em uma base temporal, como a comumente recomendada e encontrada na literatura, mostrou-se ineficaz frente às variações de manejo de cultura e condições ambientais. Conclui-se que a elaboração

de uma curva relacionando o coeficiente de cultura com parâmetros de desenvolvimento da planta é mais adequado ao manejo da irrigação.

O período de máximo consumo de água pela cultura mostrou ser resultado da combinação entre uma elevada demanda evaporativa e a cobertura vegetal completa (maior que 70%), independente de ser a fase reprodutiva como é usualmente relatado na literatura.

O IAF, calculado a partir da área de folhas verdes, estimou melhor a variação do coeficiente de cultura do que a %CVeg, na fase de senescência da cultura do feijoeiro.

Os evapotranspirômetros de nível constante, com as modificações realizadas, mostraram-se adequados para a determinação das curvas de coeficiente de cultura basal, visto que as condições de umidade do solo atenderam às exigências estabelecidas por WRIGHT (1981).

A análise seqüencial dos valores de coeficiente de cultura é uma técnica que possibilitou um aumento na faixa de variação de valores de cobertura vegetal, para a obtenção de relações entre k_{cb} e parâmetros de desenvolvimento da cultura.

Os valores de coeficiente de cultura mostraram-se dependentes do método utilizado para a determinação da evapotranspiração de referência.

A cultura do feijoeiro no campo sob condições de manejo adequado de água atingiu uma produção de 2.100 kg/ha. Porém, quando cultivado sob condições que maximizaram a transpiração da planta, minimizaram a evaporação do solo, e sem compactação do solo (cultivo nos evapotranspirômetros) a produção foi acima de 3.000 kg/ha.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A., ALFARARO, A., SMITH, M. Lysimeters. Rome : FAO, 1982. 68 p. Paper n. 39.
- ADAMS, J. E., ARKIN, G. F., RITCHIE, J. T. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. Soil Science Society of American Journal, Madison, WI, v. 40, p. 436 - 442, 1976.
- AL-KAISI, Mahdi, BRUN, Lynn J., ENZ, John W. Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, Netherlands, v. 48, p. 111-116, jan. 1989.
- AL-KHAFRAF, S., WIERENGA, P. J., WILLIAMS, B. C. Evaporative flux from irrigated cotton as related to leaf area index, soil water, and evaporative demand. Agronomy Journal, Madison, WI, v. 70, p. 912-917, 1978.
- ARRUDA, Flavio Bussmeyer. Uso da água na produção agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas. Anais... Campinas : Fundação Cargill, 1987. 226 p. p. 177-199.
- _____. Determinação da cobertura do solo durante o ciclo das culturas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 8, p. 145-150, 1984.
- ARKLEY, R. J. Relationships between plant growth and transpiration. Hilgardia, v. 34, p. 559-84. 1963
- BARBIERI, Valter. Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana de açúcar (*Saccharum spp*). Piracicaba : ESALQ, 1981. 82 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1981.
- BASTOS, Edson Alves, LUNARDI, Dalva Martineli Cury. Determinação do coeficiente de cultura da alface (*Lactuca sativa* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa. Resumos... Viçosa, MG : SBEA, UFV, 1995. 520 p. p. 253.

- BERGAMASCHI, Homero Perda de água e desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob diferentes condições da disponibilidade hídrica no solo e da atmosfera. Piracicaba : ESALQ, 1984. 204 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1984.
- BERG, V., HSIAO, T. C. Solar tracking : light avoidance induce by water stress in leaves of kidney beans seedings in the field. Crop Science, v. 26, p. 980 - 986.
- BRUNINI, O., GROHMANN, F., SANTOS, J. M. Balanço hídrico em condições de campo para dois cultivares de arroz sob duas densidades de plantio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.5, p.1-6, 1981.
- BULISANI, Eduardo Antonio, ALMEIDA, Luiz D'Artagnan, ROSTON, Antonio Jorge. A cultura do feijoeiro no Estado de São Paulo. In: BULISANI, Eduardo Antonio (coord.). Feijão fatores de produção e qualidade. Campinas, SP : Fundação Cargill, 1987. 326 p. p. 29 - 88.
- BULISANI, Eduardo Antonio, ALMEIDA, Luiz D'Artagnan. Feijão : *Phaseolus vulgaris* L. In: JORGE, José Antonio, LOURENÇÃO, André Luiz, ARANHA, Condorcet (ed.). Instruções agrícolas para o Estado de São Paulo. 5. ed. Campinas, SP : Instituto Agrônomo, 1990. 233 p. p. 94 - 95. (Boletim, 200)
- BURMAN, R. D., NIXON, P. R., WRIGHT, J. L., PRUITT, W. O. Water requeriments. In: JENSEN, M. E., ed. Design and operation of farm irrigation systems. St Joseph, ASAE, cap. 6, p. 189-232, 1980.
- CAMARGO, O. A. de, MONIZ, A. C., JORGE, J. A., VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, SP : Instituto Agrônomo, 1986. 94 p. (Boletim, 106)
- CAMPBELL, G. S. An introduction to enviromental biophysics. New York, Springer - Verlag, 1977. 159 p.
- CURY, Dalva Martinelli. Demanda de água na cultura de repolho (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). Piracicaba : ESALQ, 1985. 79 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1985.
- DENMEAD, O. T. & SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agronomy Journal, Madison, WI, v. 43, p. 385 - 390, 1962.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma : FAO, 1976. 194 p. Paper n. 24.

- DOORENBOS, J., KASSAN, A. H. Yield response to water. Rome : FAO, 1979. 193 p. Paper n. 33.
- DOURADO NETO, D., JONG-VAN-LIER, Q. de, BOTREL, T. A., LIBARDI, P. L. Curva de retenção de água no solo: algoritmo em Quick Basic para estimativa dos parâmetros empíricos do modelo GENUTCHEN; manual de instruções ao usuário. Piracicaba, ESALQ, 1990. 33p.
- DUBETZ, S. An unusual phototropism induced by drought in *Phaseolus vulgaris*. Canadian Journal Botany, Ontário, Canadá, v. 47, p. 1640 - 1641.
- ENCARNAÇÃO, Carlos Ramirez Franco da. Estudo da demanda hídrica de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Goiano Precoce. Piracicaba : ESALQ, 1980. 62 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1980.
- _____. Exigências hídricas e coeficientes culturais da batata (*Solanum tuberosum* L.). Piracicaba : ESALQ, 1987. 62 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1987.
- FOLEGATTI, Marcos Vinícius. Desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido a diferentes lâminas médias de água através da irrigação por sulco. Piracicaba : ESALQ, 1985. 99 p. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1985.
- GONÇALVES, Antonio Carlos Andrade, HEINEMAN, Alexandre Bryan, BARBIERI, Valter, MUNDIM, Paulo Márcio, SOARES, Antonio Sergio. Estimativas do coeficiente de cultura (k_c) da cana soca (*Sacharum spp*) em função do comprimento do colmo e do somatório de graus dia. In: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa. Resumos... Viçosa, MG : SBEA, UFV, 1995. 520 p. p. 250.
- GUANDIQUE, Manuel Enrique Gamero. Balanco hídrico no solo e consumo de água pela cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. Piracicaba : ESALQ, 1993. 94 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1993.
- HALTERLEIN, A. J. Bean. In : TEARE, I. D., PEET, M. M. Crop water relations. New York : John Wiley & Sons, 1983. p. 157-186.
- HATFIELD, J. L. Methods of estimating evapotranspiration. In : STEWART, B. A., NIELSEN, D. R. (ed.) Irrigation of agricultural crops. Madison, WI : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1990. 1195 p. p. 435-474. (Agronomy, n. 30)

- HEERMAN, Dale F. Evapotranspiration research priorities for the next decade - Irrigation. Transactions of ASAE, St Joseph, MI, v. 31, n. 2, p. 497-502, mar-abr 1988.
- HUNT, Roderick. Plant growth analysis. London : Institute of Biology's, 1970. v. 96, 67 p. (Studies in Byology).
- INFORZATO, R., MIYAZAKA, S. Sistema radicular do feijoeiro em dois solos do Estado de São Paulo. Bragantia, v. 22, n. 38, p. 477-481, set. 1963
- JENSEN, M. E., WRIGHT, J. L., PRATT, B. J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. Transactions of ASAE, St Joseph, MI, v. 14, n. 6, p. 954-959, 1971.
- KERR, G., POCHOP, L., FORNSTROM, K. J., KRALL, J. M., BROWN, D. Soil water and ET estimates for a wide range of rainfed and irrigated conditions. Agricultural and Water Management, Amsterdam, Netherlands, v. 24, p. 147-159, 1993.
- LEME, Edson José de Arruda. Otimização da irrigação da cana de açúcar (*Saccharum spp*) via coeficientes culturais, função da produção e programação dinâmica. São Carlos : USP, 1991. 399 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1991.
- MANTOVANI, Everardo C., RODRIGUES, Lineu N., RAMOS, Márcio M., SEDIYAMA, Gilberto C. Utilização do modelo de Ritchie para determinação da evapotranspiração do feijão irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa. Resumos... Viçosa, MG : SBEA, UFV, 1995. 520 p. p. 264.
- MELLO, Ana Claudia Araujo de. Efeito do dossel vegetativo na estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura da ervilha (*Pisum sativum L.*). Piracicaba : ESALQ, 1992. 76 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1992.
- MOURA, Marita Conceição Ferreira Luitgards. Determinação do consumo de água para a cultura do milho (*Zea mays L.*) pelo método lisimétrico. Piracicaba: ESALQ, 1990. 94 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1990.
- MUALEN, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Washington, v. 12, n. 3, p. 513 - 22, 1976.
- NEALE, C. M. U., BAUSCH, W. C. Reflectance-based crop coefficients for use in irrigation scheduling models. In: Advances in evapotranspiration. St Joseph, MI : ASAE, 1985. 453 p. p. 250-258.

- OLIVEIRA, Francisco Assis de, SILVA, José Joaquim Santana, CAMPOS, Tarciso Gomes da Silva. Evapotranspiração e desenvolvimento radicular do milho irrigado. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 28, n. 12, p. 1407-1415, dez. 1993.
- OLIVEIRA, Francisco Assis de, SILVA, José Joaquim Santana. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 25, p. 371-322, mar 1990.
- OMETTO, José Carlos. Bioclimatologia vegetal. São Paulo : Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440 p.
- PAVANI, Luis Carlos. Evapotranspiração e produtividade em feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L. var. Goiano Precoce) sob três níveis de potencial de água no solo. Piracicaba : ESALQ, 1985. 171 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1985.
- PERRIER, A. Updated evapotranspiration and crop water requirement definitions. In : Les besoins en eau des cultures. Crop water requirements. Paris : INRA Publications, 1984. 927 p. p. 885-887.
- PHENE, C. J., MEEK, D. W., DAVIS, K. R. et al. Real time crop evapotranspiration and determination of crop coefficients. In : Advances in evapotranspiration. St Joseph, MI : ASAE, 1985. 453 p. p. 122-129.
- PIRES, R. C. M., FUJIWARA, M., SAKAI, E., ARRUDA, F. B., BORTOLETTO, N. Estudo da profundidade do sistema radicular das culturas de feijão e trigo sob pivô central. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19, 1990, Piracicaba. Anais... Piracicaba, SP : SBEA, ESALQ, 1990. 628 p. v. 1. p. 349 - 359.
- RAIJ, Bernardo Van, SILVA, Nelson Machado, BATAGLIA, Ondino Cleante et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, SP : Instituto Agrônomo, 1985. 107 p. (Boletim, 100).
- REICHARDT, Klaus. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4 ed. rev. Campinas : Fundação Cargill, 1985. 445 p.
- RICHARDS, L. A., GARDNER, W. R., OGATA, G. Physical processes of determining water loss from soil. Soil Science Society of American Proceedings, Madison, v. 20, p. 310-4, 1956.
- RITCHIE, J. T., JOHNSON, B. S. Soil and plant factors affecting evaporation. In : STEWART, B. A., NIELSEN, D. R. (ed.). Irrigation of agricultural crops. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1990. 1195 p. p. 364-390. (Agronomy, n. 30)

- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research., Washington, v. 8, p. 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, J. T., BURNETT, E. Dryland evaporative flux in a subhumid climate : II. Plant influences. Agronomy Journal, Madison, WI, v. 63, p. 56-62, 1971.
- RODRIGUES, Lineu N., MANTOVANI, Everardo C., SEDIYAMA, Gilberto C., RAMOS, Márcio M. Modelo de Ritchie: análise de sensibilidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa. Resumos... Viçosa, MG : SBEA, UFV, 1995. 520 p. p. 294.
- ROVIRA, L. A. A. Estudo do sistema radicular do feijoeiro (*Phaseolus Vulgaris* L.) var. Carioca. Piracicaba : ESALQ, 1975. 86 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1975.
- SAKAI, Emílio. Balanco hídrico e energético na cultura irrigada do feijoeiro em Latossolo Roxo. Piracicaba : ESALQ, 1989. 121p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1989.
- SAMMIS, T. W., MAPEL, C. L., LUGG, D. G. et al. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. Transactions of ASAE, St Joseph, MI, v. 28, n. 3, p. 773-780, mai-jun 1985.
- SEDIYAMA, Gilberto C. A versão/proposta para o conceito de evapotranspiração de referência. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9, 1995, Campina Grande, PB. 14 p.
- SMITH, Martin. CROPWAT : A computer program for irrigation planning and management. Rome : FAO, 1992. 126 p. Irrigation and Drainage Paper n. 46.
- STEGMAN, E. C. Corn crop curve comparasions for the central and northern plains of the U. S. Applied Engineering in Agriculture, v. 4, n. 3, set 1988.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATTER, J. R. The water balance. New Jersey, 1955. 104 p. (Publication in Climatology, v. 3, n -1).
- THORNTHWAITE, C. W. & WILM, H. G. Report of the Commitee on evapotranspiration and tranpiration, 1943-1944. Am. Geophys. Trans. p. 686 - 693, 1944.
- TAN, C. S. & FULTON, J. M. Ratio between evapotranspiration of irrigated crops from floating lysimeters and class A pan evaporation. Canadian Journal Plant Science, Ontario, Canadá, v. 60, p. 197-201, jan 1980.

VAN GENUTCHEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 44, p. 892-8, 1980.

VAN WIJK, W. R., DE VRIES, D. A. Evapotranspiration. Netherlands Journal of Agricultural Science, Wageningen, v. 2, p. 105-119, 1954.

VILLA NOVA, N. A. & OMETTO, J. C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4., Fortaleza, 1981. Anais. Fortaleza. ABRH, 1981. v. 3., p. 281-99.

WIT, C. T. Transpiration and crop yields. Verslag. van Landbouwk. Onderzoek, n. 646. 88 p. 1958.

WRIGHT, James L. Evapotranspiration and irrigation water requirements. In: Advances in evapotranspiration. St Joseph, MI : ASAE, 1985. 453p. p. 105-113.

_____. New evapotranspiration crop coefficients. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the ASCE, New York, v. 108, n. IR1, p. 57-74, mar 1982.

_____. Crop coefficients for estimates of daily crop evapotranspiration. In: IRRIGATION SCHEDULING FOR WATER & ENERGY CONSERVATION IN THE 80'S, 1981, Chicago. Proceedings of the irrigation scheduling conference. St Joseph : ASAE, 1981. 231 p. p. 18-26.

WRIGHT, James L., JENSEN, Marvin E. Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling. Transactions of ASAE, St Joseph, MI, v. 21, n. 1, p. 88-91, 96, 1978.

_____. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the ASCE, New York, v. 98, n. IR2, p. 193-201, jun 1972.