

WAGNER RODRIGUES SOARES

COEFICIENTES DE CULTURA NO ESTÁDIO DE
DESENVOLVIMENTO INICIAL PARA DIFERENTES TEXTURAS
DE SOLOS E CONDIÇÕES DE MOLHAMENTO

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do curso de Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

7
1302022
06/08
1999

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
JULHO – 1999

BIBLIOTECA
DEPTO. ENG. AGRÍCOLA

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S676c
1999

Soares, Wagner Rodrigues, 1969-

Coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial para diferentes texturas de solos e condições de molhamento / Wagner Rodrigues Soares. – Viçosa : UFV, 1999.

67p. : il.

Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Evapotranspiração. 2. Coeficiente de cultura. 3. Ritchie, Modelo de. 4. Penman-Monteith-FAO, Equação.
4. Universidade Federal de Viçosa. Título.

CDD 19.ed. 551.572

CDD 20.ed. 551.572

WAGNER RODRIGUES SOARES

**COEFICIENTES DE CULTURA NO ESTÁDIO DE
DESENVOLVIMENTO INICIAL PARA DIFERENTES TEXTURAS
DE SOLOS E CONDIÇÕES DE MOLHAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do curso de Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de março de 1999.




Prof. Aristides Ribeiro
(Conselheiro)



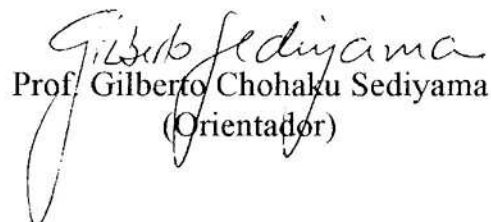
Prof. José Maria Nogueira da Costa
(Conselheiro)



Prof. Marcos Heil Costa



Prof. Neylor Alves Calasans Rego



Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Orientador)

A DEUS, princípio de tudo.

Ao meu pai Antônio Flávio de Almeida Soares (*in memoriam*).

À minha mãe Ligia Rodrigues Soares.

À minha noiva Geysa A. Rocha Gomes.

Às minhas irmãs Vera, Magda e Fernanda.

Aos meus sobrinhos Georgea, Leonardo, Kelen, Carina, Carolina e Laura.

Com todo o meu amor.

AGRADECIMENTO

Em especial, ao professor Gilberto Chohaku Sedyama, pela orientação, que proporcionou o aprofundamento e a melhoria deste trabalho.

Aos professores José Maria Nogueira da Costa e Aristides Ribeiro, pelo apoio, pela compreensão e pelas sugestões.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de fazer o curso de Meteorologia Agrícola.

Às Sras. Maria Rocha Gomes e Dionéia Rocha Gomes, pelo apoio, incentivo e por me tornar um dos membros da família.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial aos professores Luiz Cláudio, Marcos, Neylor, Paulo e Prusky e aos funcionários Édna, Galinário, Fátima e Daniel, pela colaboração e amizade.

A todos os amigos do curso de Meteorologia Agrícola, em especial a Alexandre (Gari), Lineu (The Ritchie), Carlos (Papagaio), Marcelo, Adriana, Silvano, Alexandre, Tarcísio, Ana, Alessandra, Delton, Fúlvio, Solon, Joaquim, Graça, Marcio e Marcos. Aos amigos Homero e Carlos Amauri, Marshall, Maurício, Fernando (Zébix), Vó Ana e Ione, Plutarco e Carmem (tios), Flávio, Paulo Roberto, Aline, Inocencia, Wiking e Eduardo.

BIOGRAFIA

WAGNER RODRIGUES SOARES, filho de Antônio Flávio de Almenda Soares e Ligia Rodrigues Soares, natural de São Gabriel, Rio Grande do Sul, nasceu no dia 30 de dezembro de 1969.

Em 1994, graduou-se em Meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas.

Em março de 1995, iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em 22 de março de 1999.

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
EXTRATO	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Aspectos básicos de evapotranspiração	4
2.2. Coeficiente de cultura.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Modelo de Penman-Monteith	15
3.1.1. Elementos climáticos e parâmetros de entrada no modelo de Penman-Monteith.....	15
3.1.2. Tratamento matemático	16
3.2. Modelo de Ritchie	20
3.2.1. Elementos climáticos e parâmetros de entrada no modelo de Ritchie	21
3.2.2. Caracterização dos tipos de solo	22
3.2.3. Simulação de irrigação	22

3.2.4. Tratamento matemático	22
3.2.5. Caracterização das fases de secamento do solo	26
3.3. Coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial	27
3.3.1. Tratamento matemático	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. Efeito da frequência de irrigação	29
4.2. Efeito da lâmina d'água aplicada	49
4.3. Efeito da textura do solo	51
4.4. Comparação dos resultados do presente estudo com os resultados apresentados por Pereira e Allen	52
5. RESUMO E CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE	62

LISTA DE QUADROS

1. Valores dos parâmetros U e α utilizados no modelo de Ritchie, para três texturas de solo.....	22
2. Valores das lâminas aplicadas, em cada intervalo entre irrigações simuladas, nas três texturas de solo	23
3. Equações de regressão dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) em função da evapotranspiração de referência (E_{To}), para solo de textura fina, e coeficiente de determinação.	40
4. Equações de regressão dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) em função da evapotranspiração de referência (E_{To}), para solo franco-arenoso (textura grossa), e coeficiente de determinação.....	42
5. Equações de regressão dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) em função da evapotranspiração de referência (E_{To}), para solo de textura grossa, e coeficiente de determinação.	44
6. Comparação dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) em solo de texturas fina e grossa submetidas a aplicação de 20 mm d'água, nos intervalos entre aplicações de 4, 7, 10 e 20 dias.....	52

7. Coeficiente angular (<i>a</i>), coeficiente linear (<i>b</i>) e coeficiente de regressão para as equações de regressão linear simples entre os coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial estimados por PEREIRA e ALLEN (1997) $Kc_{ini}(PA)$ e estimados pelo presente estudo (Kc_{ini}) em solo de textura fina e grossa, nos intervalos entre aplicações de água de 4, 7, 10 e 20 dias.....	55
--	----

LISTA DE FIGURAS

1. Principais interações consideradas no modelo de Penman-Monteith.....	17
2. Principais interações consideradas no modelo de Ritchie.	26
3. Representação das fases de secamento do solo no modelo de Ritchie.....	27
4. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 5 mm a cada simulação de irrigação	30
5. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 10 mm a cada simulação de irrigação.....	30
6. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 15 mm a cada simulação de irrigação.....	31
7. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 20 mm a cada simulação de irrigação.....	31

8. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 25 mm a cada simulação de irrigação.....	32
9. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 30 mm a cada simulação de irrigação.....	32
10. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 40 mm a cada simulação de irrigação.....	33
11. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 50 mm a cada simulação de irrigação.....	33
12. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 5 mm a cada simulação de irrigação.....	34
13. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 10 mm a cada simulação de irrigação.....	34
14. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 15 mm a cada simulação de irrigação.....	35
15. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 20 mm a cada simulação de irrigação.....	35
16. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 25 mm a cada simulação de irrigação.....	36

17. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da E_{To} e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 5 mm a cada simulação de irrigação.....	36
18. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da E_{To} e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 10 mm a cada simulação de irrigação.....	37
19. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da E_{To} e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 15 mm a cada simulação de irrigação.....	37
20. Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da E_{To} e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 20 mm a cada simulação de irrigação.....	38
21. Valores do $K_{c_{ini}}$ em solo de textura fina para intervalos entre irrigações simuladas de dez dias, em função da lâmina de água aplicada.....	49
22. Valores do $K_{c_{ini}}$ em solo franco-arenoso (textura grossa) para intervalos entre irrigações simuladas de dez dias, em função da lâmina de água aplicada.	50
23. Valores do $K_{c_{ini}}$ em solo de textura grossa para intervalos entre irrigações simuladas de dez dias, em função da lâmina de água aplicada.....	50
24. Comparação dos valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos no presente trabalho ($K_{c_{ini}}$) com os valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos por PEREIRA e ALLEN (1997) $K_{c_{ini}}(PA)$ em solo de textura fina com lâmina aplicada de 40 mm por vez, equação de regressão e coeficiente da regressão para intervalos entre aplicações de (a) 4, (b) 7, (c) 10 e (d) 20 dias.	53
25. Comparação dos valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos no presente trabalho ($K_{c_{ini}}$) com os valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos por PEREIRA e ALLEN (1997) $K_{c_{ini}}(PA)$ em solo de textura grossa com lâmina aplicada de 20 mm por vez, equação de regressão e coeficiente da regressão para intervalos entre aplicações de (a) 4, (b) 7, (c) 10 e (d) 20 dias.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

λ = calor latente de evaporação (MJ.kg^{-1})

γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

δ = constante de Stefan-Boltzmann ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}.\text{K}^{-4}$)

α = parâmetro característico da fase 2 de evaporação direta da água do solo
($\text{mm.d}^{-0.5}$)

γ^* = coeficiente psicrométrico modificado ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

α_c = albedo da cultura

α_s = albedo do solo

$(e_s - e_d)$ = déficit de pressão de vapor do ar (kPa)

ΣE_{s1} = somatório da evaporação da água do solo durante a fase 1 de evaporação
(mm)

ΣE_{s2} = somatório da evaporação da água do solo durante a fase 2 de evaporação
(mm)

ω_s = ângulo horário do pôr-do-sol (rad)

A = área foliar por planta (cm^2 por planta)

A_0 = área foliar máxima por planta ($\text{cm}^2.\text{planta}^{-1}$)

b = dimensão inicial da planta (parâmetro experimental)

d = dia

d_r = distância relativa Terra-Sol
 e_a = pressão parcial de vapor (kPa)
 E_p = transpiração (mm.d^{-1})
 E_s = evaporação da água do solo (mm.d^{-1})
 e_s = pressão de vapor de saturação (kPa)
 E_{s1} = evaporação da água do solo durante a fase 1 de evaporação (mm.d^{-1})
 E_{s2} = evaporação da água do solo durante a fase 2 de evaporação (mm.d^{-1})
 ET = evapotranspiração (mm.d^{-1})
 ET_c = evapotranspiração de uma cultura (mm.d^{-1})
 ET_{max} = evapotranspiração máxima (mm.d^{-1})
 ET_o = evapotranspiração de referência (mm.d^{-1})
 ET_p = evapotranspiração potencial (mm.d^{-1})
 ET_r = evapotranspiração real (mm.d^{-1})
 G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
 h = altura (m)
 IAF = índice de área foliar (m^2 de folha por m^2 de terreno)
 k = parâmetro que define as taxas de crescimento da planta
 K_c = coeficiente de cultura
 $K_{c_{\text{ini}}}$ = coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial
 $K_{c_{\text{ini}}(\text{PA})}$ = coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial
 estimados por PEREIRA e ALLEN
 N = horas de brilho solar (horas)
 PP = densidade de plantio (planta.m^{-2})
 R_a = radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
 R_b = saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
 R_n = saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
 R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
 R_s = radiação solar incidente à superfície (radiação global) ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
 r_s = resistência de superfície (s.m^{-1})
 s = declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 T = temperatura média diária de ar ($^{\circ}\text{C}$)

t = tempo transcorrido desde a mudança da fase 1 para a fase 2 (dias)

T_b = temperatura-base da cultura ($^{\circ}\text{C}$)

T_{kn} = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$)

T_{kx} = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$)

T_{max} = temperatura máxima do ar observada ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} = temperatura mínima do ar observada ($^{\circ}\text{C}$)

TTA = tempo térmico acumulado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)

T_u = temperatura do bulbo molhado ($^{\circ}\text{C}$)

U = lâmina da água evaporada acumulada na fase 1 de evaporação (mm)

$U_{10\rightarrow 2}$ = redução da velocidade obtida a 10 m para o nível de 2 m ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

EXTRATO

SOARES, Wagner Rodrigues, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1999. **Coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial para diferentes texturas de solos e condições de molhamento.** Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Conselheiros: José Maria Nogueira da Costa e Aristides Ribeiro.

Estimou-se o coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial por meio da relação entre a evaporação direta da água do solo e a evapotranspiração de referência. Para o cálculo da evaporação direta da água do solo, utilizou-se o modelo proposto por Ritchie (1972) modificado por Ritchie e Johnson (1990), o qual considera as fases de evaporação da água no solo. O modelo de Ritchie possibilitou a estimativa da evaporação direta da água do solo para diferentes padrões de molhamento do solo, em que foram simulados nove valores de lâmina de água aplicada (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 mm) em quatro diferentes intervalos entre aplicações de água (4, 7, 10 e 20 dias), para três texturas de solo. Os valores da evapotranspiração de referência foram estimados utilizando-se o método de Penman-Monteith, padrão FAO 1991, para o qual foi construído e executado um modelo, que representa este método, dentro do ambiente computacional ModelMaker versão 3.0.2. Os dados meteorológicos referentes ao ano de 1998 utilizados para executar os modelos de Ritchie e

Penman-Monteith foram coletados na estação meteorológica do INMET, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa. Foram analisados os efeitos da frequência de irrigação, do valor da lâmina de água aplicada e da textura do solo. Os resultados mostraram que maior frequência de aplicação de água e maior valor da lâmina de água aplicada resultaram em maiores valores do coeficiente de cultura no estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$). Entretanto, os valores do $K_{c_{ini}}$ não aumentaram quando o valor da lâmina aplicada foi maior que o suficiente para que, no modelo de Ritchie, ocorresse o retorno ao início da fase 1 de evaporação da água do solo. Após a fase 1, de evaporação direta da água do solo, os valores do $K_{c_{ini}}$ decresceram à medida que a demanda evaporativa aumentou. Sob mesmas condições climáticas e de molhamento, solo de textura fina apresentou $K_{c_{ini}}$ maior do que solo de textura grossa. Também foi feita a comparação dos resultados do presente estudo com os resultados apresentados por Pereira e Allen em 1997, em que os coeficientes de determinação foram superiores a 0,96, o que significa boa aproximação do método proposto neste estudo.

ABSTRACT

SOARES, Wagner Rodrigues, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 1999.
Culture coefficients in the stadium of initial development for different textures of soils and wetness conditions. Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama. Committee Members: José Maria Nogueira da Costa and Aristides Ribeiro.

The culture coefficient was estimated for the initial development stage by means of the relationship between the direct soil water evaporation and the reference evapotranspiration. For the calculation of the direct evaporation of the soil water, the model proposed by Ritchie (1972) and modified by Ritchie and Johnson (1990) was used, which considers the evaporation phases of the water from the soil. The Ritchie's model facilitated the estimation of the direct soil water evaporation for different patterns of soil wetness. It was simulated nine values of water depths (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 and 60 mm) in four different intervals of water applications (4, 7, 10 and 20 days), for three different soil textures. The values of the reference evapotranspiration were estimated by the method of Penman-Monteith, standard FAO 1991. The ModelMaker software version 3.02 was used for the implementation of this method. The meteorological data of the year 1998 were collected from the meteorological station of the INEMET located in the campus of the Federal University of Viçosa and used to

execute the models of Ritchie and Penman-Monteith. The effects of the irrigation frequency were analyzed together with the values of the applied water depths and the texture of the soil. The results showed that larger water application frequency and larger value of the water depths resulted in larger values of the culture coefficient during the initial stage of development ($K_{c_{ini}}$). However, the values of $K_{c_{ini}}$ did not increase when the value of the applied water depth was larger than the necessary for, in the Ritchie's model, causing a return to the beginning of evaporation phase 1. After phase 1 of direct soil water evaporation, the values of $K_{c_{ini}}$ decreased as the evaporation demand increased. Under the same climatic and wetness conditions, the fine textured soil presented larger $K_{c_{ini}}$ than the coarse textured soils. It was also made the comparison of the results of the present study with the results presented by Pereira and Allen in 1997 and determination coefficients greater than 0,96 were found, what means a good approximation of the method proposed in this study.

1. INTRODUÇÃO

As variações na produtividade de culturas agrícolas em uma determinada região têm como principais causas as técnicas de manejo utilizadas e as limitações impostas pelos fatores meteorológicos, como temperatura, radiação e precipitação, bem como as condições edáficas e nutricionais da planta (SEDIYAMA et al., 1993). Tal constatação ressalta a necessidade da realização de estudos agrometeorológicos, visando quantificar as respostas fisiológicas das culturas às diferentes condições de clima e manejo a que estão expostas.

Os estudos de processos agrometeorológicos são feitos basicamente de três formas: experimentos tradicionais, que têm como características particulares um alto custo, além da grande demanda de tempo e equipamentos; modelos de simulação, que permitem as análises de sistemas complexos, como é o caso da interação clima-cultura-manejo; e estudos que unem as duas metodologias supracitadas. O uso destas ferramentas revela resultados de extrema importância, pois permitem reduzir ou evitar os efeitos das oscilações na produtividade agrícola (AZAM-ALI et al., 1994; CHAN, 1992; WITCHERS e LUPOND, 1974).

Sabe-se que tanto o excesso como a deficiência de água, além da sua qualidade, são fatores limitantes da produção agrícola em várias regiões do mundo. CARVALHO (1995) destaca que, em cada região, o clima, o tipo do

solo, a disponibilidade, a qualidade e o manejo da água de irrigação, a facilidade de drenagem, o sistema de cultivo, a disponibilidade de mão-de-obra e o nível de tecnologia empregado, bem como os fatores socio-econômicos, determinam até que ponto a produção da cultura é limitada pela deficiência ou pelo excesso de água.

Devido ao alto custo da tecnologia e dos recursos hídricos disponíveis para o agricultor, a deficiência de água na agricultura é um fenômeno comum na América Latina e, provavelmente, em outras regiões tropicais e subtropicais do mundo onde não existe facilidade de irrigação (BERNARDO, 1995; CARVALHO, 1995; FAGERIA, 1989). Sabe-se que a irrigação é influenciada pelos fatores ambientais, principalmente pelas características físicas dos solos, pelos tipos de cultura e pelo clima. Nos trópicos, a irrigação tornou-se uma das principais ferramentas para a agricultura moderna. Dessa forma, torna-se necessário o estudo de parâmetros que auxiliem na tomada de decisão agrícola. Um desses parâmetros é o coeficiente de cultura (K_c).

O conhecimento dos valores desse coeficiente é essencial em projetos de irrigação, pois permite determinar quando e quanto irrigar, mediante o uso dos dados climáticos, dos parâmetros físicos do solo e das condições de manejo da cultura (CARVALHO, 1995; DOORENBOS e PRUITT, 1984; JENSEN, 1973; WRIGHT, 1982).

O K_c é determinado pela razão entre a evapotranspiração de uma cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o), a qual pode ser obtida por meio de uma equação empírica ou semi-empírica. Entre os métodos para obtenção da ET_c , o modelo de Ritchie permite a obtenção direta da ET_c , além de possibilitar sua estimativa para diferentes padrões de frequência de irrigação e diferentes texturas de solos. Em reunião da FAO, em 1990, a equação de Penman-Monteith foi considerada a de melhor desempenho para o cálculo da ET_o (GRANT, 1975; PEREIRA et al., 1997; RITCHIE, 1972; RITCHIE e JONHSON, 1990; SEDIYAMA, 1996; SMITH, 1991).

O uso da ET_o e dos coeficientes de cultura associados é uma técnica prática, porque fornece uma forma conservativa de estimar a ET_c em estágio

progressivo de desenvolvimento (JENSEN, 1973). DOORENBOS e PRUITT (1984) apresentam coeficientes de cultura para várias espécies de interesse agrônômico. Entretanto, esses mesmos autores recomendam a realização de estudos regionais, visando ajustar coeficientes de cultura às condições edafoclimáticas locais e às características da planta.

A ET_c , durante o estágio de crescimento inicial, é predominantemente devida à evaporação da água do solo na sua camada superficial. Conseqüentemente, as estimativas mais precisas de coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$), do plantio até 10% de cobertura do solo, devem considerar a freqüência de umedecimento da superfície do solo durante o período inicial, tanto pela rega como pela precipitação (JENSEN, 1973).

Segundo PEREIRA e ALLEN (1997), o $K_{c_{ini}}$ pode ser aprimorado por meio de gráficos mais detalhados e por processos numéricos que considerem as fases de secamento do solo.

Estudos agrometeorológicos para determinação do $K_{c_{ini}}$ devem se basear no equilíbrio entre a necessidade de utilizar conceitos e equações que permitam a representação das complexas interações clima-cultura-manejo e a simplicidade necessária para permitir que os resultados alcançados sejam utilizados como uma ferramenta útil na tomada de decisão agrícola.

Tendo em vista o exposto anteriormente, este trabalho teve como objetivos principais:

1. Determinar a evaporação direta da água do solo no estágio de desenvolvimento inicial para diferentes texturas de solos e condições de molhamento, por intermédio do modelo de Ritchie.
2. Determinar o $K_{c_{ini}}$ por meio da relação entre os valores de evaporação direta da água do solo e os valores de ET_o determinados pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO-1991.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos básicos da evapotranspiração

O processo de evaporação de água do solo e o de transpiração das plantas ocorrem simultaneamente, porém podem ser tratados como processos independentes, daí a utilização do termo evapotranspiração (ET). A evaporação da água é o processo de mudança de sua fase líquida para a fase gasosa. Tal processo ocorre tanto numa massa contínua (rio, lago e represa) como numa superfície úmida (planta e solo). É um fenômeno que utiliza a energia externa ao sistema e a transforma em calor latente. Sendo o calor latente de evaporação a quantidade de calor necessária para causar a mudança de fase, são necessárias 585 calorias para evaporar 1 g de água, estando esta a 20°C. Nota-se que a evaporação é um processo bastante exigente em energia (PEREIRA et al., 1997).

Com base no glossário da meteorologia, ROSENBERG (1974) define evaporação como “o processo físico pelo qual um sólido ou líquido passa para o estado gasoso” e transpiração como “o processo de evaporação da água que passa pela planta, entrando pelas raízes, passando pelos tecidos vasculares até as folhas ou outros órgãos e saindo para a atmosfera, pelos estômatos ou superfície das cutículas”. Basicamente, a transpiração envolve dois estádios: a evaporação

da água da parede das células e sua difusão para fora das folhas, principalmente, através dos estômatos (KRAMER, 1983).

Os métodos para estimação da ET podem ser classificados em diretos (lisímetros, parcelas experimentais no campo, controle da umidade do solo, método de entrada e saída) e indiretos (evaporímetros e equações).

Segundo KLAR (1984), a transpiração é um fenômeno fundamental para as plantas, pois serve como solvente e agente transportador de materiais pelo floema e xilema e promove o resfriamento na superfície dos tecidos e também as atividades metabólicas, através da movimentação da água pela planta. A transpiração também é responsável pela turgescência das células, o que permite muitas reações bioquímicas na planta.

Quando a superfície de um solo está totalmente coberta com vegetação rasteira em fase de crescimento ativo e o teor de umidade do solo está próximo à capacidade de campo, a ET é conhecida como evapotranspiração potencial (ET_p). No campo, o consumo de água pela planta ocorre em condições de evapotranspiração real (ET_r).

A ET_r é a taxa de perda de água da superfície vegetada na unidade de tempo, nas condições prevaletentes (KLAR, 1984; PEREIRA et al., 1997).

De acordo com PEREIRA e ALLEN (1997), qualquer uma das equações usadas na literatura para o cálculo da ET_r requer o conhecimento de vários parâmetros climáticos e de vários parâmetros caracterizadores da superfície evaporante que permitam estimar as resistências de superfície e aerodinâmica. Visto que esses parâmetros de dossel variam de cultura para cultura, com o próprio crescimento da cultura e com seus estados fenológicos e são influenciados pelas práticas culturais, é difícil utilizar qualquer equação para a ET_r para o cálculo direto da ET_c. Daí ser necessária a aproximação utilizando-se os coeficientes de cultura.

Como a determinação da ET_r é bastante trabalhosa e exige, normalmente, aparelhagem de alto custo, recomenda-se a determinação da ET_p usando-se métodos indiretos e, em seguida, considerando os fatores limitantes das condições potenciais.

Segundo PENMAN (1956), a ETp é o total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, por unidade de tempo, de uma superfície extensa, completamente coberta de vegetação de porte baixo, com altura uniforme e sem limitação de água. Nestas condições, a ETp pode ser considerada como função apenas das condições meteorológicas, ou seja, do poder evaporante do ar, associado às condições de saldo de radiação.

Atualmente, quando se define vegetação rasteira (*Paspalum notatum* L.), a ETp passa a ser conhecida como evapotranspiração de referência (ETo).

Assumindo que todas as folhas do dossel estão expostas às mesmas condições ambientais, MONTEITH (1965) introduziu a teoria da “*big leaf*” ou folhona, na qual a planta é representada por uma única folha. Esta teoria pode ser explicada da seguinte forma: admitindo-se que o dossel da folhona esteja a uma temperatura (T_o), com pressão de vapor $e_s(T_o)$, haverá uma transpiração induzida entre a camada superficial adjacente e a folhona, como consequência da diferença entre a pressão de vapor da camada superficial e a folhona. Acima da camada superficial, o ar encontra-se com temperatura e pressão de vapor diferentes daquelas desta camada, o que resulta numa resistência do ar ao transporte de vapor. Da diferença de temperatura entre a folhona e o ar ocorre o transporte de calor sensível, que é governado pela resistência do ar a este transporte.

Com o intuito de padronizar a evapotranspiração de comunidades vegetais, DOORENBOS e PRUITT (1984) fixaram as condições nas quais a medida da ETo deve ser feita. Definiram então a ETo como “a quantidade de água evapotranspirada na unidade de tempo e área, por uma cultura verde, de baixo porte, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme e sem deficiência de água”.

Em 1990, a FAO reuniu um grupo de especialistas em evapotranspiração para rever o *Irrigation and Drainage paper 24*, de autoria de DOORENBOS e PRUITT (1984), e, com base nos resultados apresentados por ALLEN et al. (1989), adotou o método de Penman-Monteith como método-padrão para estimar a ETo. Em estudos relacionados com a evapotranspiração de culturas agrícolas, os conhecimentos atuais permitem escolher uma cultura de referência para a qual

seja possível normalizar uma altura h e a densidade de plantio (representada pelo índice de área foliar-IAF), o que permite calcular as respectivas resistências aerodinâmicas (r_a) e de superfície (r_s). Isso resultou na definição da ET_o como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência- padrão para a qual se assume a altura constante $h = 0,12$ m, a resistência de superfície constante $r_s = 70$ s m^{-1} e o albedo também constante de 0,23, que se assemelha à taxa de evapotranspiração de uma extensa superfície de relva verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem carência de água (DOORENBOS e PRUITT, 1984; PEREIRA et al., 1997).

De acordo com ALLEN (1986) e ALLEN et al. (1989), o modelo de Penman-Monteith apresenta estimativas confiáveis e consistentes de ET_o . Segundo SMITH (1991), este modelo foi considerado como aquele de melhor desempenho entre os métodos combinados, sendo recomendado como método-padrão para obtenção da ET_o . JENSEN et al. (1990) mostraram os resultados da avaliação feita por um comitê técnico da Sociedade Americana de Engenharia Civil, para dez localidades de vários países, em que se compararam 19 métodos de determinação da ET_o com os valores medidos em lisímetros. O método de Penman-Monteith apresentou comportamento superior ao dos demais. PERES et al. (1995) avaliaram o modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração padronizada pela FAO, em três localidades do Estado de São Paulo, e concluíram que o modelo estimou a ET_o medida em lisímetro de drenagem-padrão de forma consistente, tanto na escala decendial quanto na mensal. Os autores constataram que, na escala mensal, os valores estimados e medidos apontaram correlação e concordância superiores aos valores da escala decendial.

Apesar da grande precisão da determinação na ET_o , a fórmula de Penman-Monteith, padrão FAO, apresenta inconvenientes, sendo o principal deles o envolvimento de grande número de dados meteorológicos medidos, os quais nem sempre são disponíveis em muitas regiões.

Para considerar o efeito das características de uma planta na evapotranspiração, conceituou-se a evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a

taxa de evapotranspiração de uma cultura livre de doenças, cultivada em uma área relativamente grande, sob condições ótimas de umidade e fertilidade do solo. A ETc é a perda combinada de água para a atmosfera, em forma de vapor, por meio dos processos de evaporação da água do solo (Es) e pela transpiração das plantas (Ep) em condições ótimas de desenvolvimento (RITCHIE e JOHNSON, 1990).

De acordo com BERLATO e MOLION (1981), a Es é, em princípio, governada pelos elementos meteorológicos que influenciam a evaporação de uma superfície de água livre, pois a evaporação da água do solo nada mais é que a evaporação da película de água que envolve as partículas de solo e que ocupa os espaços existentes entre as partículas. A diferença reside no fato de que a superfície líquida apresenta oportunidade ilimitada de evaporação, em virtude da disponibilidade de água, ao passo que, no solo, a água nem sempre está francamente disponível para ser evaporada.

Segundo RODRIGUES et al. (1998), a Es é menor em solos de textura grossa do que em solos de textura fina. Solo de textura fina apresenta maior poder de retenção de umidade, devido à sua menor porosidade. KLOCKE et al. (1990) observaram diferenças na contribuição da Ep na ETc ao longo do desenvolvimento de uma cultura. Esses autores atribuíram essas diferenças ao aumento do índice de área foliar (IAF) e ao tipo de cobertura do solo. Verificaram alta taxa de Es, em relação a Ep, em umidade elevada, havendo inversão da situação para solos com baixos níveis de umidade.

Quando o IAF é baixo, a Es é a principal componente da ETc. Resultados apresentados por RODRIGUES et al. (1998) mostram que a Es foi responsável por cerca de 80% da água evapotranspirada até 10% da cobertura do solo. Observaram também que diminuição no valor da Es não provoca redução equivalente na ETc, uma vez que a Ep aumenta.

Diversos modelos foram utilizados com êxito para calcular Es e Ep (RITCHIE, 1972; KANEMASU et al., 1976; TANNER e JURY, 1976; BLACK et al., 1970).

Para possibilitar o aumento do uso desses modelos em programação de irrigação, RITCHIE e JOHNSON (1990) adaptaram a função de crescimento de Gompertz, que considera três parâmetros para simular o aumento da área foliar das culturas. Um dos modelos mais utilizados, que separa a E_s e a E_p para determinação da E_{Tc} , é o proposto por RITCHIE (1972) e modificado por RITCHIE e JOHNSON (1990). Este modelo permite o cálculo direto da E_{Tc} , além de possibilitar sua estimativa para diferentes padrões de frequência de irrigação e diferentes solos. Segundo RITCHIE (1972), este modelo foi desenvolvido para calcular a E_{Tc} , separando a E_s e a E_p , para culturas plantadas em linha, em que o suprimento de água não é limitado e a cultura não está em estágio avançado de maturação ou senescência. Para o uso deste modelo são necessários os parâmetros da planta (IAF), do clima (radiação solar ou insolação, temperaturas máxima e mínima e precipitação) e do solo.

O modelo de Ritchie, em sua formulação básica, considera as fases de evaporação da água do solo descritas por PHILIP (1957) e comprovadas, posteriormente, por IDSO et al. (1974).

Assim, no cálculo da E_s , o método considera as fases de evaporação da água das camadas de perfil e superfície do solo. Partindo do perfil de solo úmido, durante a fase 1, a E_s processa-se à taxa potencial determinada pela energia disponível à superfície do solo. Na fase 2, a evaporação é limitada pela capacidade de fluxo de água para a superfície, a partir das camadas inferiores do solo. Na fase 1, a superfície do solo mantém-se úmida, enquanto na segunda a superfície do solo encontra-se parcialmente seca, sendo a evaporação alimentada pelos fluxos ascendentes de água do solo, influenciados pelo transporte de calor para o perfil do solo. Nesta segunda fase, a evaporação da água do solo decresce à medida que a umidade do solo diminui, podendo assumir-se como proporcional a razão entre a quantidade de água remanescente na camada de solo, que produz a evaporação, e o total que pode ser evaporado durante esta segunda fase.

O valor máximo da E_{Tc} ocorre apenas após cada irrigação. A partir daí a E_{Tc} decresce em função do teor de água remanescente na camada exposta à radiação na fase 1.

Segundo KLOCKE et al. (1990), a E_s é dependente, basicamente, da textura do solo, da frequência de irrigação e da porcentagem de cobertura do solo.

Para definição da duração da fase 1 de evaporação da água do solo, RITCHIE (1972) estabeleceu o parâmetro U , que é a lâmina da água evaporada acumulada até o fim desta fase. O mesmo autor estabeleceu também o parâmetro α como a taxa com que a água evapora do solo na fase 2 de evaporação. Esses parâmetros (U e α) podem ser determinados utilizando-se microlisímetros de pesagem. Na fase 1, a E_s depende fundamentalmente das condições climáticas e, na fase 2, ela passa a depender também de parâmetros físicos do solo (RODRIGUES, 1996). Segundo RITCHIE e JOHNSON (1990), o valor de U é alcançado mais rapidamente em condições de alta evaporação do que em condições de baixa evaporação, e, quando medido no campo, seu valor varia de aproximadamente 5 mm, para um solo arenoso, a 14 mm para um solo de textura mais argilosa.

De acordo com RODRIGUES et al. (1998), com a redução do parâmetro U , a segunda fase de evaporação é atingida mais rapidamente. Assim, em solos de textura grossa, onde o valor desse parâmetro é menor, predomina a segunda fase de evaporação e, em consequência, a evaporação total é menor. Ainda, segundo RODRIGUES et al. (1998), o efeito do turno de rega é similar ao efeito do parâmetro U , isto é, prolongar ou reduzir a duração das fases de evaporação. Esses autores mostraram que, para o turno de rega de cinco dias, à medida que diminui o valor do parâmetro U , diminui também o valor da evaporação acumulada na fase 1 e aumenta na fase 2. O aumento do valor da evaporação acumulada na fase 2 com a redução do parâmetro U deve-se ao aumento do tempo de permanência nesta fase. Quando se diminui o turno de rega, maior é o tempo de permanência da fase 1 no modelo de Ritchie.

Sadeghi et al. (1984) e Bond e Wills (1970), citados por RITCHIE e JOHNSON (1990), encontraram valores de U , em condições de laboratório, muito maiores que em condições normais de campo. Segundo RODRIGUES et al. (1998), quanto maior o valor do parâmetro U , maior é o tempo de

permanência do modelo de Ritchie na fase 1 e maior é o valor da lâmina de água aplicada para reconduzir a evaporação ao estágio inicial.

Valores do parâmetro α , obtidos por vários pesquisadores, situam-se em torno de $3,5 \text{ mm t}^{-1/2}$, sendo t em dias (RITCHIE e JOHNSON, 1990).

Para RITCHIE (1972), uma das limitações das equações usadas no modelo é a aparente superestimação no cálculo da ETc, quando a superfície do solo está úmida e a cultura encontra-se em estágio avançado de desenvolvimento. Nessas condições, segundo o autor, a mais provável fonte de erro está na equação que calcula a Ep, uma vez que esta é empírica e foi desenvolvida em condições de alta demanda de ET.

Para o cálculo da energia realmente disponível para ser utilizada na evapotranspiração, faz-se necessário o conhecimento do albedo, que é o coeficiente médio de reflexão da superfície, para a radiação de ondas curtas (radiação solar).

Em virtude desse fato, o modelo de Ritchie usa uma equação empírica, função do IAF, para simular o albedo da superfície. Pela formulação de RITCHIE (1972), até à germinação prevalece o albedo do solo (α_s) e, após a cobertura total, o albedo da cultura (α_c). Na fase intermediária, o albedo da superfície é calculado em função de uma inter-relação de α_c e α_s .

2.2. Coeficiente de cultura

As determinações da água necessária para as culturas são dados básicos que precisam ser conhecidos para se planejar e manejar adequadamente qualquer projeto de irrigação. Dessa forma, torna-se necessário o estudo de parâmetros que auxiliem na tomada de decisão agrícola. Um desses parâmetros é o coeficiente de cultura (Kc), que é determinado pela razão entre a ETc e a ETo.

DOORENBOS e PRUITT (1984) dividem o ciclo da cultura em quatro fases: inicial, crescimento rápido, média e final. A duração dessas fases varia de acordo com as condições ambientais e da cultura. Os mesmos autores apresentam

valores de K_c para diversas culturas, para locais sob alta umidade relativa ($UR > 70\%$) com vento fraco ($< 5 \text{ m/s}$) e locais sob baixa umidade relativa ($UR < 20\%$) com vento forte ($> 5 \text{ m/s}$), sendo essa tabela conhecida como “Tabela da FAO”. Nela está definido o K_c para cinco estádios de desenvolvimento das culturas:

- estágio I - da germinação até 10% da cobertura do solo;
- estágio II - de 10% de cobertura do solo até 80% de cobertura do solo;
- estágio III - de 80% de cobertura do solo até o início do amadurecimento;
- estágio IV - do início do amadurecimento até a colheita; e
- estágio V - colheita.

Segundo DOORENBOS e PRUITT (1984), os principais fatores que afetam os valores do K_c são: época de plantio, características específicas de cada cultura, condições climáticas predominantes durante o início de desenvolvimento, frequência de chuva e irrigação e duração da estação de crescimento. Dessa forma, não se recomenda a generalização de seu uso. Para BAUSCH e NEALE (1985) e WRIGHT (1982), os fatores que afetam os valores do K_c são: características fenológicas da planta, profundidade e densidade do sistema radicular, ciclo da cultura e capacidade evaporativa da atmosfera. Segundo MANTOVANI (1993), o K_c , em condições de cobertura completa (fases média e final), é pouco variável para determinada cultura; já em condições de cobertura parcial (fases inicial e de crescimento rápido) depende, fundamentalmente, do conteúdo de água na camada superficial do solo, uma vez que, nessas fases, a E_s representa grande parte da E_Tc .

DOORENBOS e PRUITT (1984) apresentam valores desse parâmetro para diferentes culturas, em função do estágio de desenvolvimento, da umidade relativa e da velocidade do vento, e consideram o K_c constante para cada um dos estádios do ciclo das culturas, anteriormente citados. Os mesmos autores propõem a utilização de um ábaco em que o K_c , na fase inicial, é estimado em função da E_{To} média e da frequência de umedecimento (irrigação ou chuva) durante esse período. Ainda assim, esse procedimento acarreta erros quando

aplicado aos cultivos extensivos (VILLALOBOS e FERERES, 1989). Esses valores, porém, têm servido de base para manejo da irrigação em locais onde não existem dados medidos.

VILLALOBOS e FERERES (1989) apresentam uma alternativa para calcular a frequência de umedecimento do solo necessária para determinação do K_c , na fase de cobertura incompleta. No entanto, não resolvem o problema da incerteza sobre a duração das fases de desenvolvimento e, além disso, empregam coeficientes de correções empíricos, que necessitam de calibração local.

Segundo JENSEN et al. (1971), o K_c pode ser determinado pelo produto entre um coeficiente que modifica a percentagem da cobertura do solo pelo dossel e a ET_c , para cada estágio de desenvolvimento da cultura, e um coeficiente que diminui a ET_c da cultura à medida que o perfil do solo vai secando. A este produto é adicionado um coeficiente que aumenta a ET_c quando a superfície do solo é molhada (precipitação ou irrigação). O mesmo autor comenta, ainda, que os valores de K_c não ultrapassam 1,0 para a maioria das culturas.

Teoricamente, o K_c pode ser decomposto em dois componentes: um devido à planta, também chamado de basal, e outro devido ao solo. A decomposição do K_c melhora sua estimativa nas fases iniciais, pois utiliza um coeficiente de cultura ajustado, obtido do coeficiente basal de cultura, que é função da transpiração da cultura, e também o coeficiente que representa a evaporação direta da água do solo (WRIGHT, 1982).

JAGTAP e JONES (1989) mostram que o K_c , devido ao solo, depende da frequência de irrigação, sendo maior em intervalos menores de irrigação. No entanto, essa diferença tende a desaparecer quando a cultura atinge 30% a 40% do seu desenvolvimento.

PEREIRA e ALLEN (1997) estimaram os coeficientes de culturas durante o estágio de desenvolvimento inicial da cultura, quando o intervalo médio entre precipitações ou irrigações é conhecido ou pode ser estimado. Apresentaram novas aproximações aos $K_{c_{ini}}$, considerando a lâmina máxima evaporável e a lâmina de água evaporável durante a primeira fase de evaporação

direta da água do solo. Segundo os autores, os Kc_{ini} podem ser melhorados tanto por processos gráficos como por procedimentos numéricos, concluindo que o procedimento de cálculo utilizado adapta-se bem a estudos de planejamento e de condução de irrigação por aspersão e por superfície, em que os intervalos entre aplicações de água são próximos de uma semana ou superiores.

O Kc também pode ser calculado a partir dos coeficientes de cultura médios, que incluem efeitos gerais de umedecimento do solo pela precipitação ou irrigação, os quais são utilizados para calcular a ET_c relativa a períodos de vários dias, principalmente para a condição de irrigação por gravidade ou aspersão (PEREIRA e ALLEN, 1997).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Modelo de Penman-Monteith

Os valores de ETo foram estimados através do modelo de Penman-Monteith, executado dentro do ambiente do programa computacional ModelMaker versão 3.0.2. De acordo com ALLEN (1986) e ALLEN et al. (1989), o modelo de Penman-Monteith apresenta estimativas confiáveis e consistentes de ETo, sendo considerado aquele de melhor desempenho entre os métodos combinados e recomendado como método-padrão para obtenção da ETo (SMITH, 1991).

3.1.1. Elementos climáticos e parâmetros de entrada no modelo de Penman-Monteith

Os elementos climáticos diários foram relativos ao período de 1/1/1998 até 30/8/1998 e obtidos na estação climatológica do INMET, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, MG (20° 45' S; 42° 51' W; e 651m). Os elementos climáticos utilizados para executar o modelo de Penman-Monteith foram: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura do ar lida no termômetro de bulbo seco, temperatura do termômetro de bulbo molhado,

velocidade do vento a 10 metros, umidade relativa, pressão atmosférica e insolação, obtidos às 9, 15 e 21 horas. Os parâmetros utilizados no modelo estão listados no Apêndice.

3.1.2. Tratamento matemático

Utilizou-se a equação de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração de referência, escrita da seguinte forma:

$$ET_o = \frac{s}{s + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{(s + \gamma^*)(T + 275)} U_2 (e_s - e_a) \quad (1)$$

em que

T = temperatura média diária de ar (°C);

($e_s - e_d$) = déficit de pressão de vapor do ar (kPa);

λ = calor latente de evaporação (MJ.kg⁻¹);

s = declividade da curva de pressão (kPa.°C⁻¹);

γ = coeficiente psicrométrico (kPa.°C⁻¹);

γ^* = coeficiente psicrométrico modificado (kPa.°C⁻¹);

$U_{10 \rightarrow 2}$ = velocidade do vento a 2 metros de altura (m.s⁻¹);

R_n = saldo de radiação (MJ.m⁻².d⁻¹); e

G = fluxo de calor no solo (MJ.m⁻².d⁻¹).

O fluxograma (Figura 1) representa o modelo construído, utilizando-se o software Model Maker versão 3.0.2.

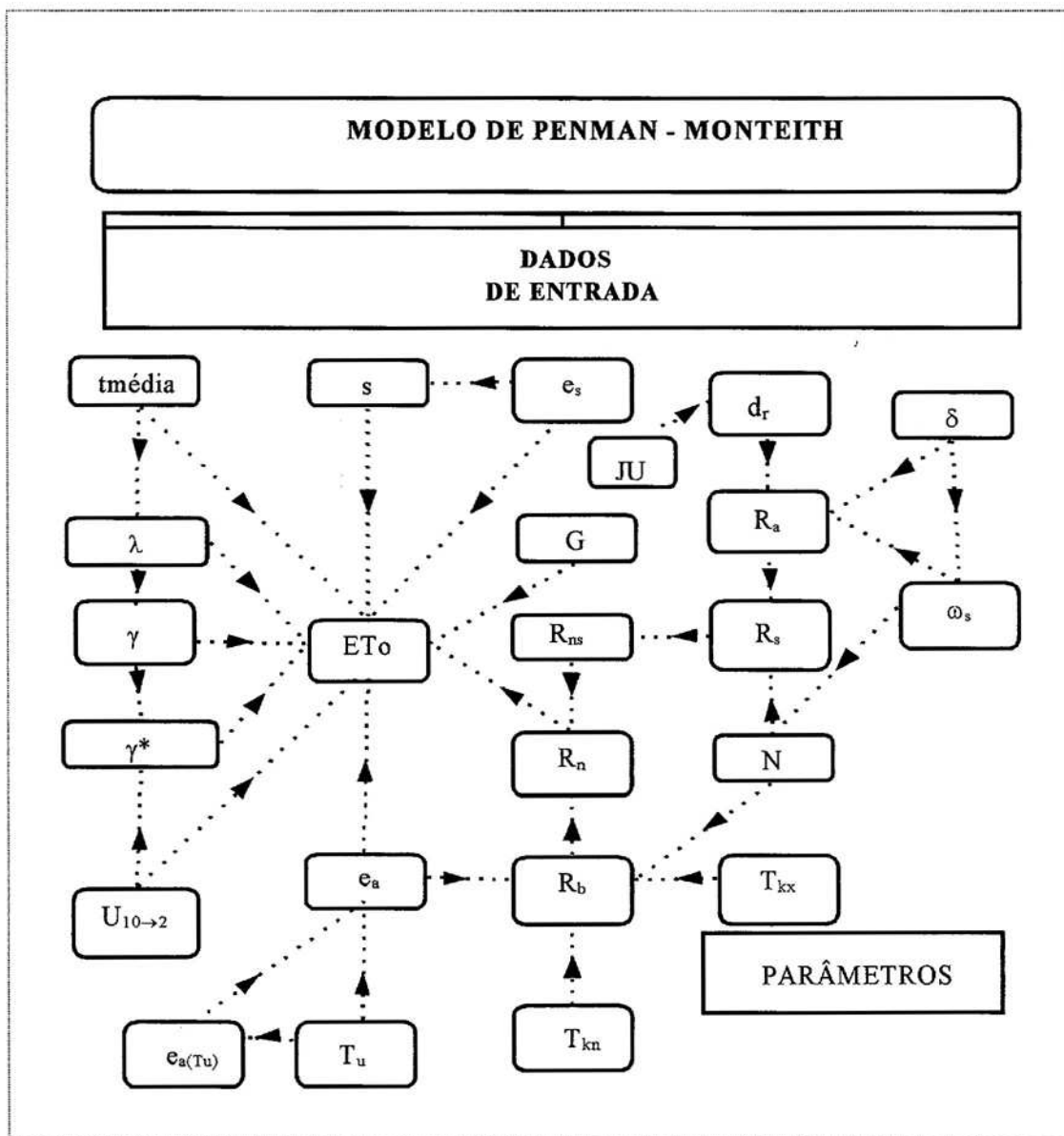


Figura 1 – Principais interações consideradas no modelo de Penman-Monteith.

Para melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no modelo, foi feita a descrição de cada um dos componentes da Figura 1, com suas respectivas equações:

E_{To} = evapotranspiração estimada pela equação 1.

JU = dia juliano

δ = constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}.\text{K}^{-4}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

$$G = 0,38 \times (t_{\text{média}} - t_{3d}) \quad \text{na escala diária} \quad (2)$$

ou

$$G = 0,07 \times (t_{\text{mês}} - t_{3\text{mes}}) \quad \text{na escala mensal} \quad (3)$$

R_n = saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

$$R_n = R_{ns} + R_b \quad (4)$$

T_{kx} = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$)

$$T_{kx} = T_{\text{max}} + 273 \quad (5)$$

T_{kn} = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$)

$$T_{kn} = T_{\text{min}} + 273 \quad (6)$$

R_b = saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

$$R_b = -(0,9 \times \frac{n}{N} + 0,1) \times (0,34 - 0,14\sqrt{e_d}) \times (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) \times \frac{1}{2} \times \sigma \quad (7)$$

R_s = radiação solar incidente à superfície (radiação global) ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

$$R_s = (a + b \times \frac{n}{N}) \times R_a \quad (8)$$

N = horas de brilho solar (horas)

$$N = \frac{24}{\pi} \times \omega_s \quad (9)$$

ω_s = ângulo horário do pôr-do-sol (rad)

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \times \tan\sigma) \quad (10)$$

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

$$R_{ns} = (1 - r) \times R_s \quad (11)$$

d_r = distância relativa Terra-Sol

$$d_r = 1 + 0,33 \times \cos\left(\frac{2 \times \pi}{365} \times J\right) \quad (12)$$

R_a = radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)

$$R_a = 37,586 \times d_r \times (\omega_s \times \sin\varphi \times \sin\sigma + \cos\varphi \times \cos\sigma \times \sin\omega_s) \quad (13)$$

T_u = temperatura do bulbo molhado ($^{\circ}\text{C}$)

$$T_u = \frac{T_{u9} + T_{u15} + 2 \times T_{u21}}{4} \quad (14)$$

e_a = pressão parcial de vapor (kPa)

$$e_a = e_{a(T_u)} - 0,0622 \times (t_{\text{média}} - T_u) \times P \quad (15)$$

$U_{10 \rightarrow 2}$ = velocidade do vento a 2 m de altura (redução da velocidade obtida a 10 m para o nível de 2 m).

$$U_{10 \rightarrow 2} = U_z \times \left[\frac{\text{Ln}\left(\frac{z_2 - d}{z_0}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{z - d}{z_0}\right)} \right] \quad (16)$$

γ^* = coeficiente psicrométrico modificado ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$$\gamma^* = \gamma \times (1 + 0,33 \times U_{10 \rightarrow 2}) \quad (17)$$

γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (18)$$

$t_{m\u00e9dia}$ = temperatura m\u00e9dia ($^{\circ}\text{C}$)

$$t_{m\u00e9dia} = \frac{T_9 + T_{\text{max}} + T_{\text{min}} + 2 \times T_{21}}{5} \quad (19)$$

λ = calor latente de evapora\u00e7\u00e3o (MJ.kg^{-1})

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3}) \times t_{m\u00e9dia} \quad (20)$$

s = declividade da curva de press\u00e3o de vapor ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$$s = \frac{4098 \times e_s}{(t_{m\u00e9dia} + 273,3)^2} \quad (21)$$

e_s = press\u00e3o de vapor de satura\u00e7\u00e3o (kPa)

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times t_{m\u00e9dia}}{t_{m\u00e9dia} + 237,3}\right) \quad (22)$$

3.2. Modelo de Ritchie

O modelo de Ritchie foi executado utilizando-se o ambiente do programa computacional desenvolvido por RODRIGUES e MANTOVANI (1995), os quais se basearam em trabalhos de RITCHIE (1972), RITCHIE e JOHNSON (1990) e JONES e RITCHIE (1990).

O modelo de Ritchie foi utilizado com a finalidade de calcular a evapora\u00e7\u00e3o direta da \u00e1gua do solo (E_s). O modelo permitiu estimar a E_s para diferentes padr\u00f5es de frequ\u00eancia de irriga\u00e7\u00e3o e tr\u00eas diferentes tipos de solo (textura fina, franco-arenoso e textura grossa). Solo franco-arenoso tamb\u00e9m \u00e9 considerado de textura grossa.

Esse modelo calcula separadamente a evapora\u00e7\u00e3o direta da \u00e1gua do solo (E_s) e a transpira\u00e7\u00e3o da cultura (E_p), isto \u00e9:

$$ET_c = E_s + E_p \quad (23)$$

3.2.1. Elementos climáticos e parâmetros de entrada no modelo de Ritchie

Os elementos climáticos diários foram relativos ao período de 1/1/1998 até 30/8/1998 e obtidos na estação climatológica do INMET, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, MG (20° 45' S; 42° 51' W; e 651 m). Os elementos climáticos utilizados para executar o modelo de Ritchie foram: temperatura máxima do ar, temperatura mínima do ar e radiação. A radiação foi estimada por meio do modelo de Penman-Monteith, onde foram eliminados os dias em que ocorreram precipitações. A eliminação dos dias em que ocorreram precipitações deveu-se à necessidade de se ter domínio da água a ser aplicada nas simulações de irrigação, no modelo de Ritchie. Além disso, entrando-se diretamente com os dados de radiação, foram definidas a data de início das simulações e a seqüência dos dados de entrada no modelo.

Para a execução do modelo, foram utilizados os seguintes parâmetros: temperatura basal = 10°C, albedo da cultura = 0,24 (grama) e albedo do solo = 0,15, que é o coeficiente de reflexão médio para solo arado úmido. Superfícies mais claras refletem mais que aquelas mais escuras e, portanto, têm menos energia disponível. Assim, um solo mais escuro, sob mesmas condições climáticas, reflete menos radiação solar que um solo mais claro. Dessa forma, se o valor do albedo utilizado for maior, a Es estimada no modelo de Ritchie será menor, pois existirá maior reflexão. Além dos dados de entrada e dos parâmetros listados anteriormente, o método incorpora também as características de crescimento das plantas, representadas pelo índice de área foliar (IAF), o qual foi considerado igual a zero, uma vez que o objetivo era apenas estimar os valores da Es. Com o valor do IAF = 0, a radiação não é interceptada e não existe redução da energia disponível para o processo de evaporação, ou seja, a Es corresponde ao total da ETc, no estágio de desenvolvimento inicial.

3.2.2. Caracterização dos tipos de solo

Os tipos de solo considerados nas simulações de irrigação foram caracterizados por dois parâmetros: o parâmetro U, que é a lâmina da água evaporada acumulada até o fim da fase 1, e o parâmetro α , que é a taxa com que a água evapora do solo na fase 2 de evaporação da água do solo. Os valores de U e α são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores dos parâmetros U e α utilizados no modelo de Ritchie, para três texturas de solo

Textura do solo	U (mm)	α (mm.d ^{-0,5})	Fonte
Fina	13,7	8,2	BURMAN e POCHOP, 1994
Franco-arenoso	6,04	3,86	RODRIGUES, 1996
Grossa	5,4	3,34	BURMAN e POCHOP, 1994

3.2.3. Simulação de irrigação

Para cada textura de solo utilizada para simulação, dentro do modelo de Ritchie, foram simulados nove valores de lâmina d'água aplicada (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 mm), em quatro diferentes intervalos (4, 7, 10 e 20 dias) entre cada irrigação simulada. A representação das simulações feitas no modelo de Ritchie pode ser observada no Quadro 2.

3.2.4. Tratamento matemático

O tratamento matemático para a estimativa da evaporação direta da água do solo abrangeu as seguintes equações:

$$Es1 = ET_{max} (1 - 0,43 \cdot IAF) \quad \text{para } IAF < 1 \quad (24)$$

Quadro 2 – Valores das lâminas aplicadas, em cada intervalo entre irrigações simuladas, nas três texturas de solo

Textura Fina				
Intervalo (dias)	4	7	10	20
Lâmina aplicada (mm)	5	5	5	5
	10	10	10	10
	15	15	15	15
	20	20	20	20
	25	25	25	25
	30	30	30	30
	40	40	40	40
	50	50	50	50
	60	60	60	60
Franco-arenoso				
Intervalo (dias)	4	7	10	20
Lâmina aplicada (mm)	5	5	5	5
	10	10	10	10
	15	15	15	15
	20	20	20	20
	25	25	25	25
	30	30	30	30
	40	40	40	40
	50	50	50	50
	60	60	60	60
Textura Grossa				
Intervalo (dias)	4	7	10	20
Lâmina aplicada (mm)	5	5	5	5
	10	10	10	10
	15	15	15	15
	20	20	20	20
	25	25	25	25
	30	30	30	30
	40	40	40	40
	50	50	50	50
	60	60	60	60

ou

$$Es1 = \frac{ET \max}{1,1} e^{-0,4IAF} \quad \text{para } IAF \geq 1 \quad (25)$$

em que

ETmax = evapotranspiração máxima (mm.d⁻¹); e

IAF = índice de área foliar (m² de folha por m² de terreno).

$$Es2 = \alpha.t^{0,5} - \alpha.(t-1)^{0,5} \quad (26)$$

$$\Sigma Es2 = \alpha.t^{0,5} \quad (27)$$

em que

t = tempo transcorrido desde a mudança da fase 1 para a fase 2 (dias); e

α = parâmetro característico da fase 2 de evaporação direta da água do solo.

As equações 24 ou 25 foram utilizadas para calcular a evaporação direta da água do solo durante a fase 1, e as equações 26 e 27 foram utilizadas para o cálculo e acúmulo da evaporação direta da água do solo durante a fase 2 de evaporação.

Para situações em que é necessário o cálculo do IAF, o modelo utiliza as seguintes equações:

$$IAF = \frac{A.PP}{1000} \quad (28)$$

em que

A = área foliar por planta (cm² por planta); e

PP = densidade de plantio (planta.m⁻²).

$$A = A_0.e^{-b.x} \quad (29)$$

em que

A₀ = área foliar máxima por planta (cm².planta⁻¹); e

b = dimensão inicial da planta (parâmetro experimental).

$$x = e^{-k.TTA} \quad (30)$$

em que

k = parâmetro que define as taxas de crescimento da planta.

$$TTA = (T_{\max} + T_{\min}) - T_b \quad (31)$$

em que

TTA = tempo térmico acumulado ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$);

T_{\max} = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_{\min} = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); e

T_b = temperatura-base da cultura ($^{\circ}\text{C}$).

O índice de área foliar, como mencionado anteriormente, foi considerado igual a zero. Assim, as equações 25, 28, 29, 30 e 31 não foram utilizadas pelo modelo.

Dentro do modelo de Ritchie, a taxa de transpiração é calculada em função da evapotranspiração máxima e do estágio de desenvolvimento da cultura (IAF), utilizando-se as equações

$$E_p = ET_{\max} (1 - \exp(-IAF)) \quad \text{para } IAF \leq 3 \quad (32)$$

ou

$$E_p = ET_{\max} \quad \text{para } IAF > 3 \quad (33)$$

em que

ET_{\max} = evapotranspiração máxima ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); e

IAF = índice de área foliar (m^2 de folha por m^2 de terreno).

Porém, o cálculo da componente E_p não interessa nas condições deste trabalho, pois trata-se somente do estágio de desenvolvimento inicial, referente à evaporação direta da água do solo.

Dessa forma, a equação 1 fica reduzida a

$$ET_c = E_s \quad (34)$$

O fluxograma (Figura 2) representa a estrutura simplificada do modelo de Ritchie.

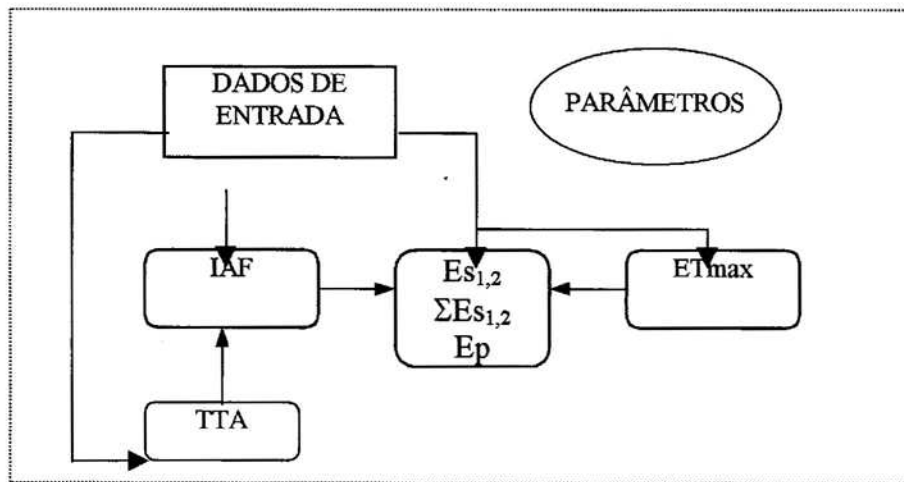


Figura 2 – Principais interações consideradas no modelo de Ritchie.

3.2.5. Caracterização das fases de secamento do solo

A Figura 3 mostra as fases de secamento do solo, em que a duração da fase 1 é determinada pelo parâmetro U e, na fase 2, ocorre diminuição no valor da evaporação. Na fase 1, a evaporação diária é calculada por Es_1 e seus valores são acumulados pelo somatório da evaporação durante esta fase. Durante a fase 1, quando o valor do somatório atinge o valor do parâmetro U , o modelo passa para a fase 2, e o valor da evaporação diária é calculado por meio da equação 26. Os valores diários da evaporação são acumulados pelo somatório durante essa fase. Quando acontece uma irrigação ou precipitação, o modelo compara o valor da lâmina aplicada, ou chuva, com o valor do somatório de Es_2 e U . Caso o valor da lâmina de água aplicada, ou chuva, não ultrapasse o valor do somatório de Es_2 , o modelo volta para algum ponto anterior, dentro da fase 2, e se o valor da lâmina de água aplicada, ou chuva, ultrapassar somente o valor do somatório de Es_2 , o modelo retorna a algum ponto dentro da fase 1 de secamento do solo.

Se o valor da lâmina de água aplicada, ou chuva, ultrapassar o valor do somatório de Es_2 e U , o modelo retorna ao início da fase 1. Por exemplo: se para

determinado intervalo entre aplicação de água, 20 mm de água aplicada foram suficientes para o modelo retornar ao início da fase 1, as lâminas com valores maiores que este terão o mesmo efeito, ou seja, voltarão ao início da fase 1.

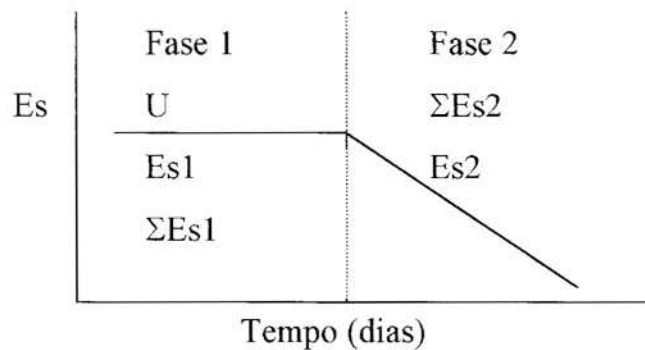


Figura 3 – Representação das fases de secamento do solo no modelo de Ritchie.

3.3. Coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial

De posse dos valores de ET_o calculados por meio do modelo de Penman-Monteith e dos valores de ET_c (representada pela componente Es) calculados por meio do modelo de Ritchie, foram estimados os valores dos coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}), para as três diferentes texturas de solo e diferentes condições de molhamento do solo.

3.3.1. Tratamento matemático

O Kc é calculado pela razão entre a ET_c e a ET_o ; recorrendo-se à equação 23, o Kc pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$Kc = \frac{Ep + Es}{ET_o} \quad (35)$$

em que

E_s = evaporação direta da água do solo (mm.d^{-1});

E_p = transpiração da cultura (mm.d^{-1}); e

ET_o = evapotranspiração de referência (mm.d^{-1}).

Recorrendo-se à equação 34, os valores dos $K_{c_{ini}}$ foram estimados calculando-se suas médias, em cada intervalo entre lâmina de água aplicada, pela seguinte equação:

$$K_{c_{ini}} = \frac{E_s}{ET_o} \quad (36)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Efeito da frequência de irrigação

Para melhor análise dos resultados obtidos das estimativas dos Kc_{ini} , foram apresentadas as Figuras 4 a 11 para solos de textura fina, as Figuras 12 a 16 para solo franco-arenoso e as Figuras 17 a 20 para solos de textura grossa. Essas figuras mostram ainda as curvas de regressão do tipo potência em função da ET_o .

As Figuras 4 a 11 representam os valores estimados dos Kc_{ini} para intervalos entre irrigações de 4, 7, 10 e 20 dias, em solo de textura fina, onde a lâmina de água aplicada nas simulações de irrigação foi de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50 mm em cada irrigação simulada, respectivamente.

As Figuras 12 a 16 representam os valores estimados dos Kc_{ini} para intervalos entre irrigações de 4, 7, 10 e 20 dias, em solo franco-arenoso (textura grossa), onde a lâmina de água aplicada nas simulações de irrigação foi de 5, 10, 15, 20 e 25 mm em cada irrigação simulada, respectivamente.

As Figuras 17 a 20 representam os valores estimados do Kc_{ini} para intervalos entre irrigações de 4, 7, 10 e 20 dias, em solo de textura grossa, onde a lâmina de água aplicada nas simulações de irrigação foi de 5, 10, 15 e 20 mm em cada irrigação simulada, respectivamente.

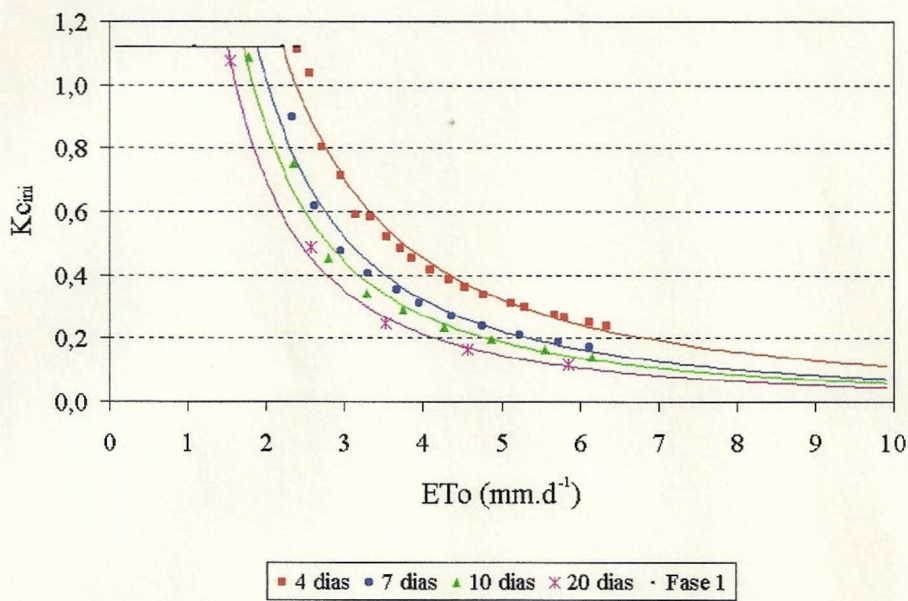


Figura 4 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 5 mm a cada simulação de irrigação.

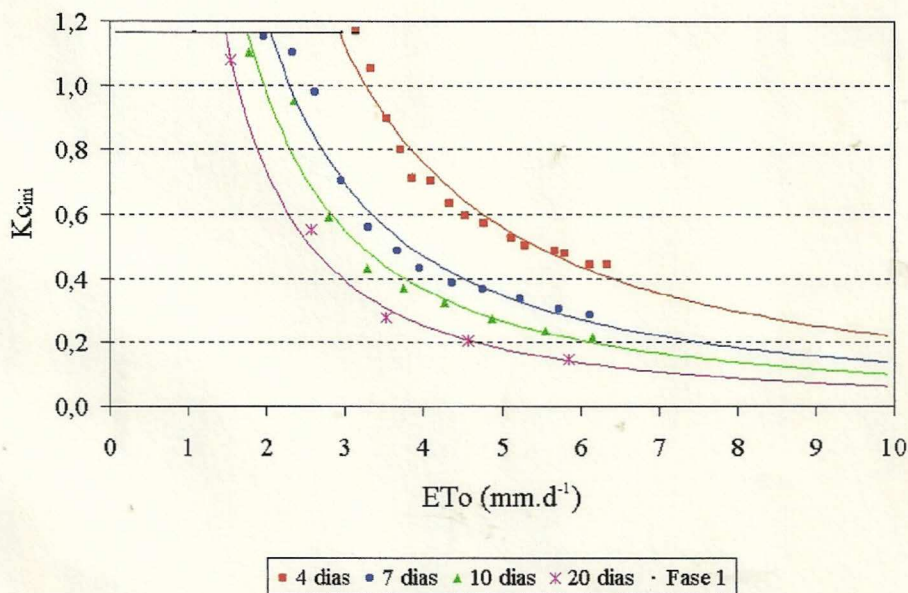


Figura 5 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 10 mm a cada simulação de irrigação.

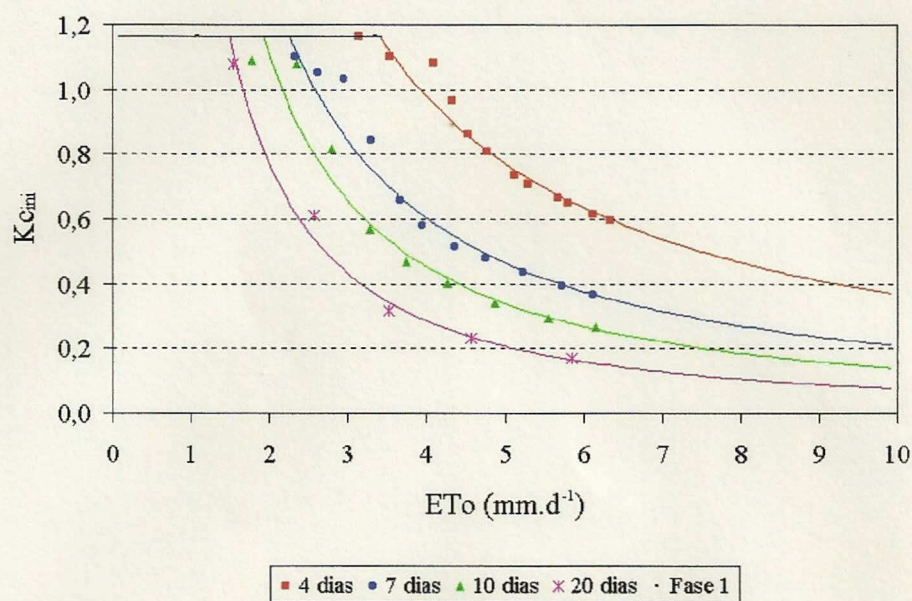


Figura 6 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 15 mm a cada simulação de irrigação.

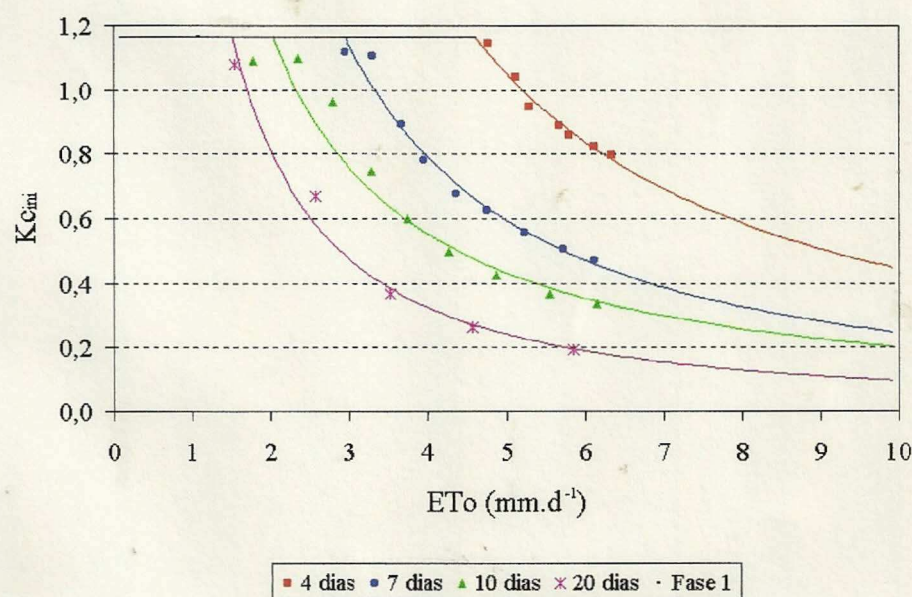


Figura 7 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 20 mm a cada simulação de irrigação.

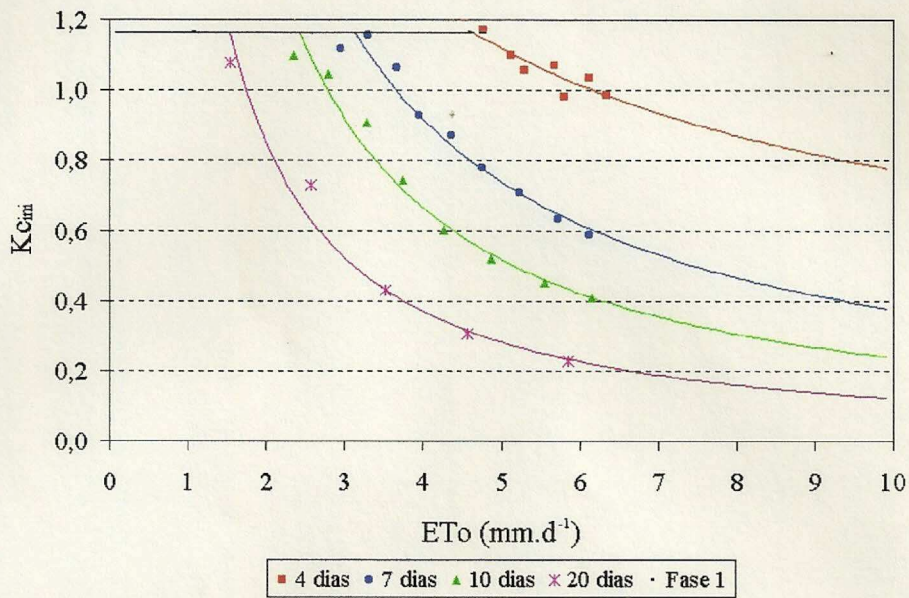


Figura 8 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 25 mm a cada simulação de irrigação.

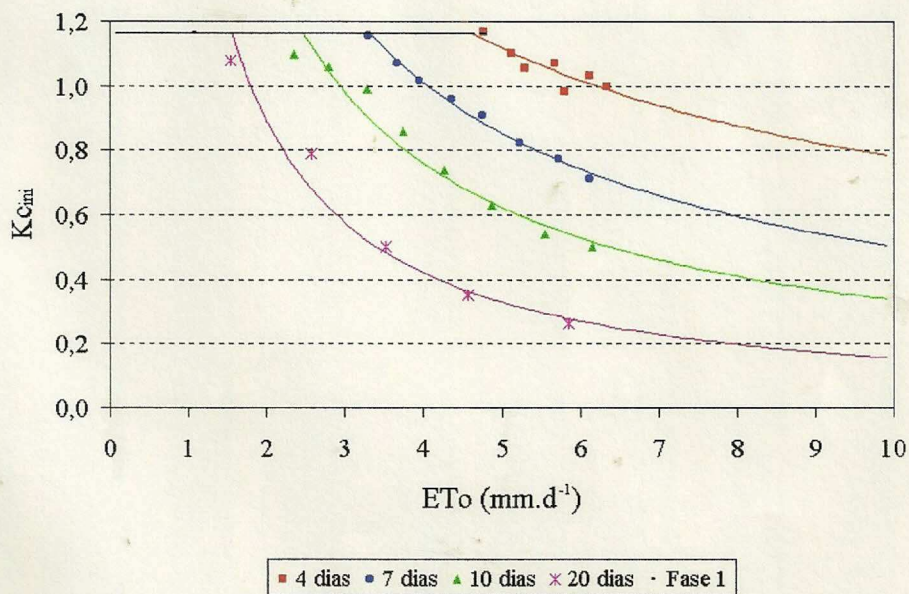


Figura 9 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 30 mm a cada simulação de irrigação.

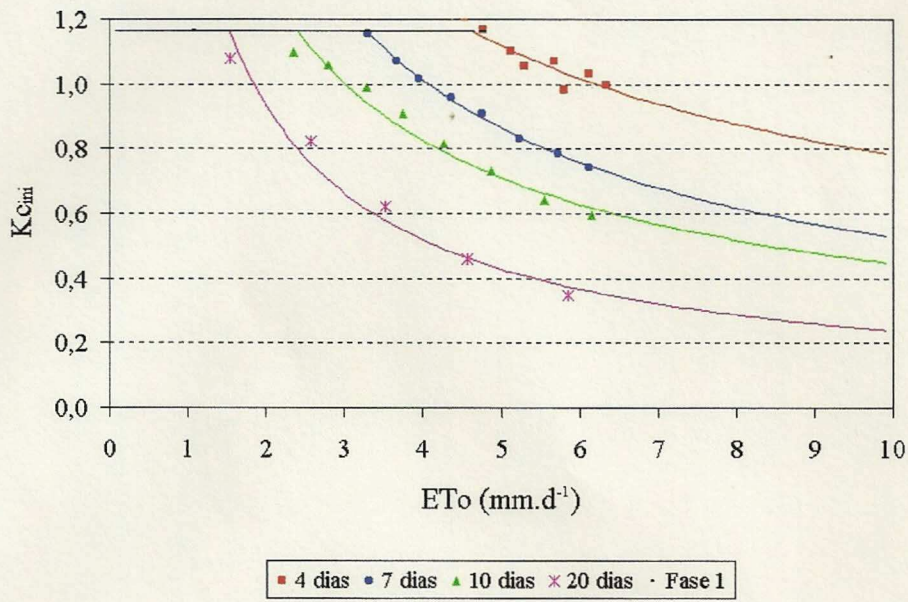


Figura 10 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 40 mm a cada simulação de irrigação.

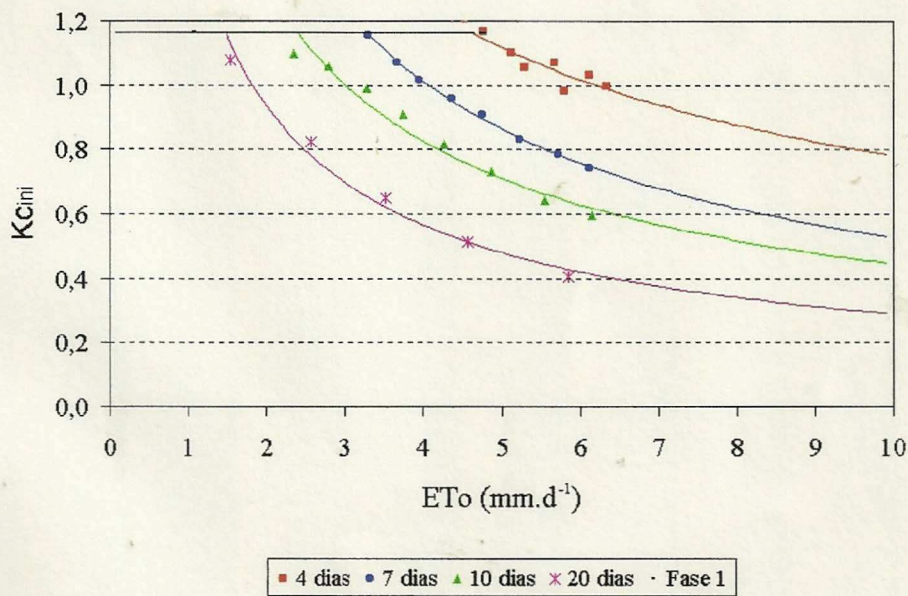


Figura 11 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura fina sob efeito de irrigação de 50 mm a cada simulação de irrigação.

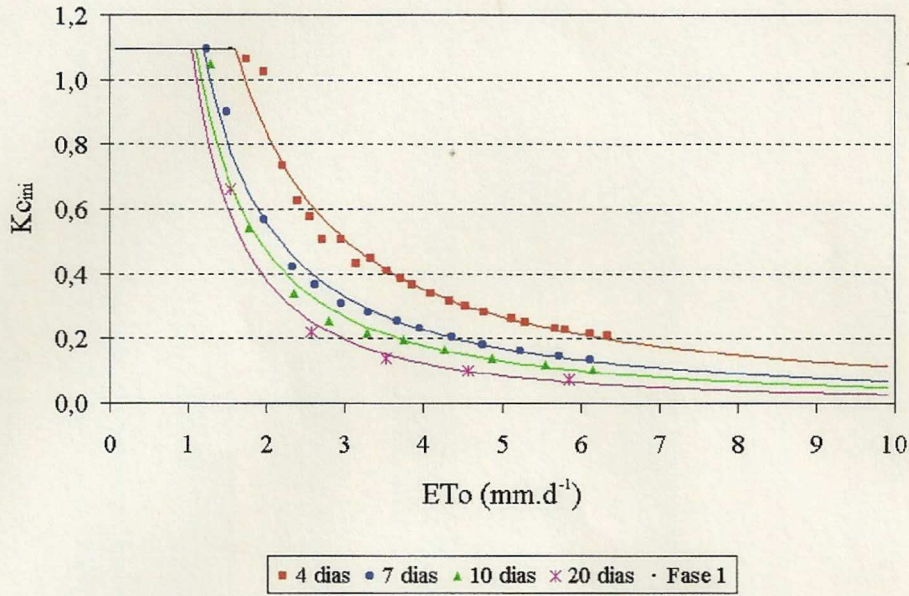


Figura 12 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 5 mm a cada simulação de irrigação.

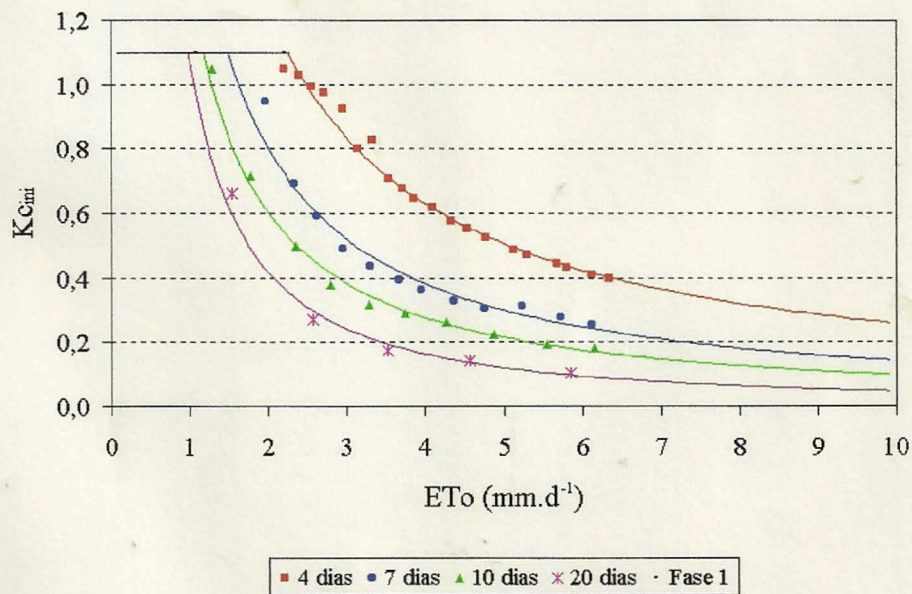


Figura 13 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 10 mm a cada simulação de irrigação.

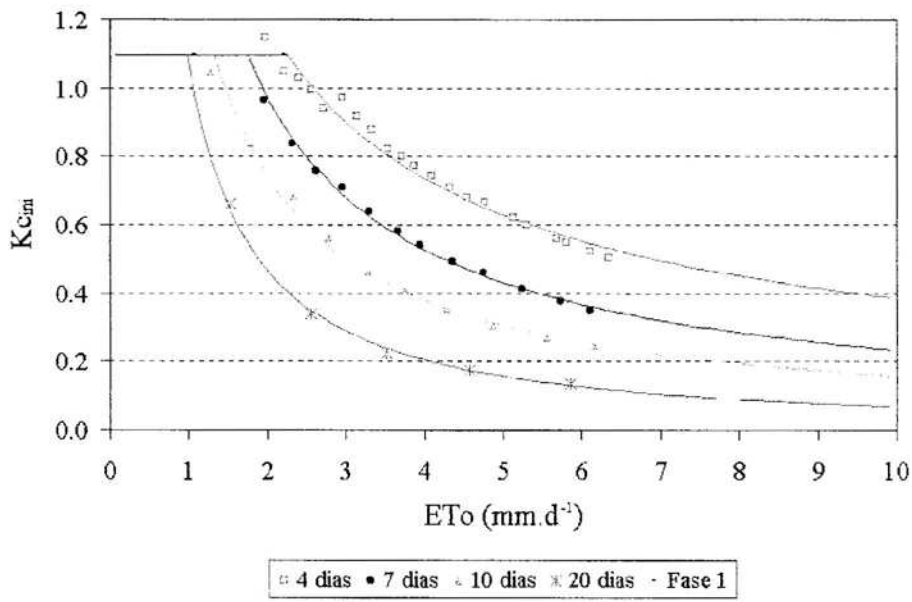


Figura 14 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 15 mm a cada simulação de irrigação.

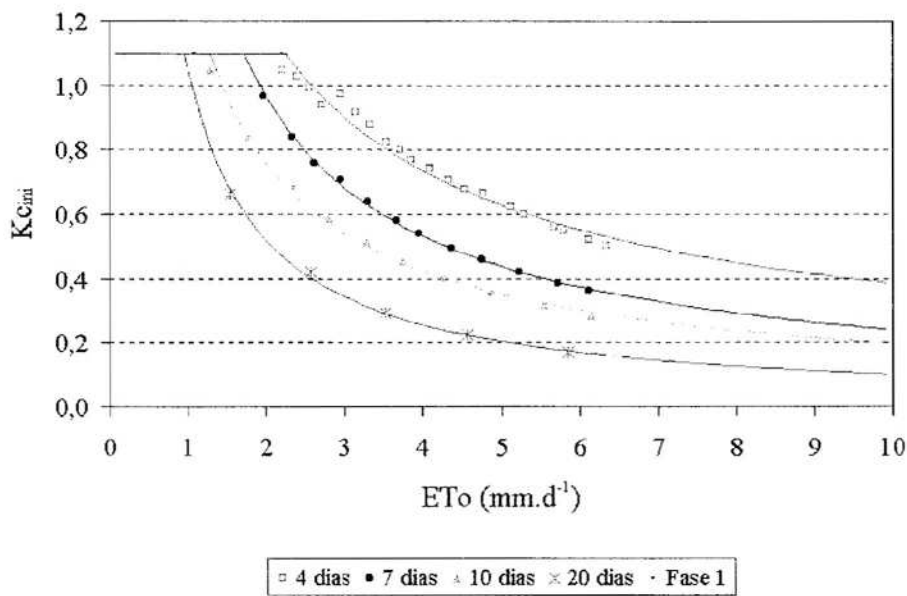


Figura 15 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 20 mm a cada simulação de irrigação.

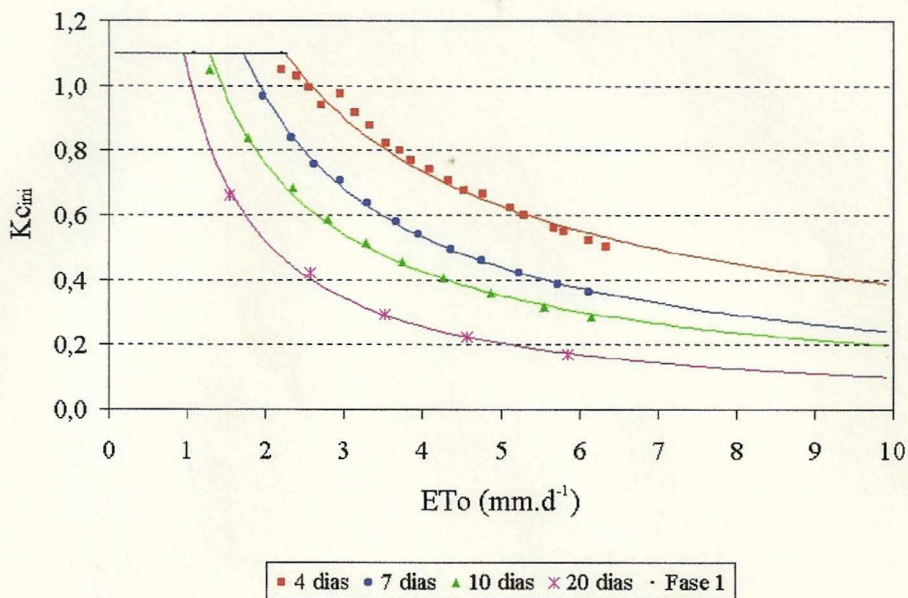


Figura 16 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo franco-arenoso sob efeito de irrigação de 25 mm a cada simulação de irrigação.

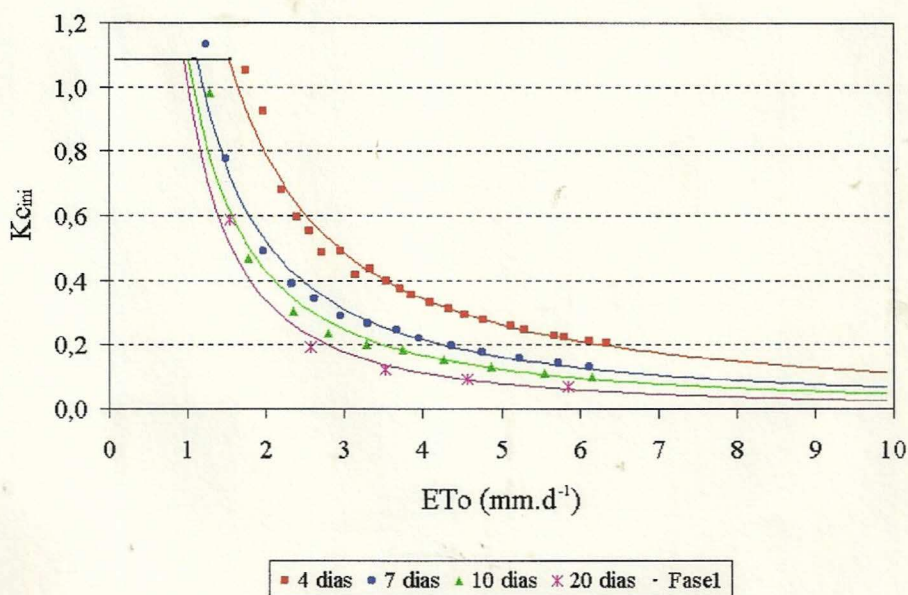


Figura 17 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 5 mm a cada simulação de irrigação.

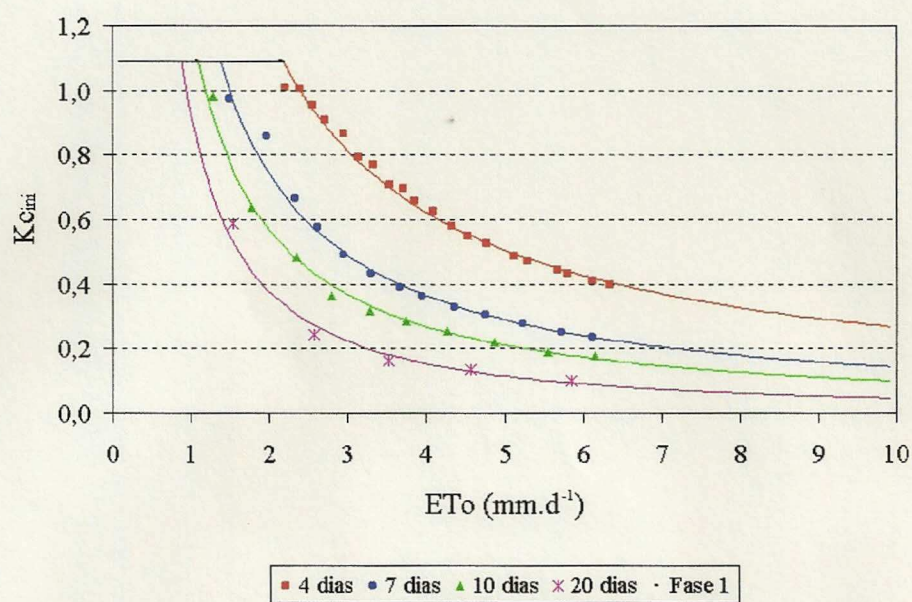


Figura 18 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 10 mm a cada simulação de irrigação.

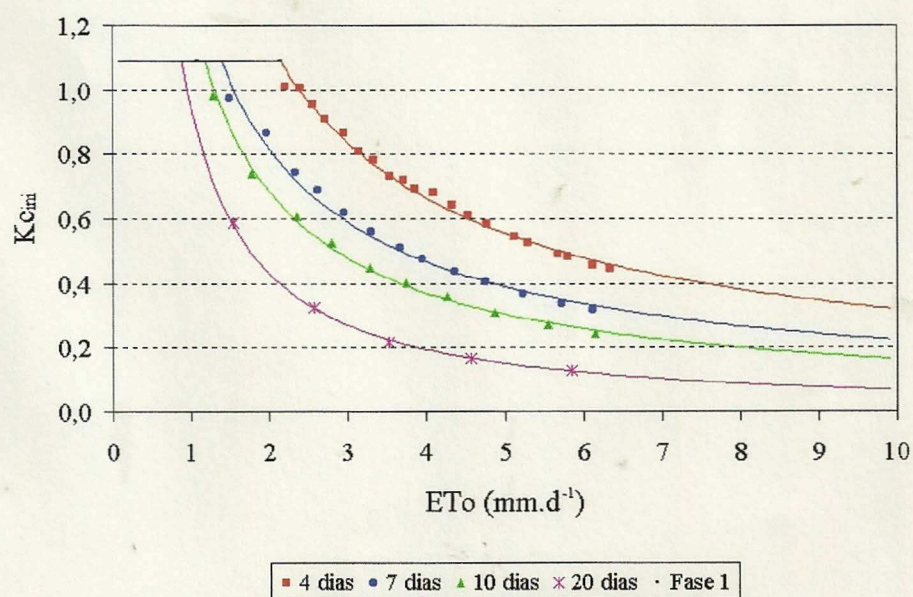


Figura 19 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da ET_o e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 15 mm a cada simulação de irrigação.

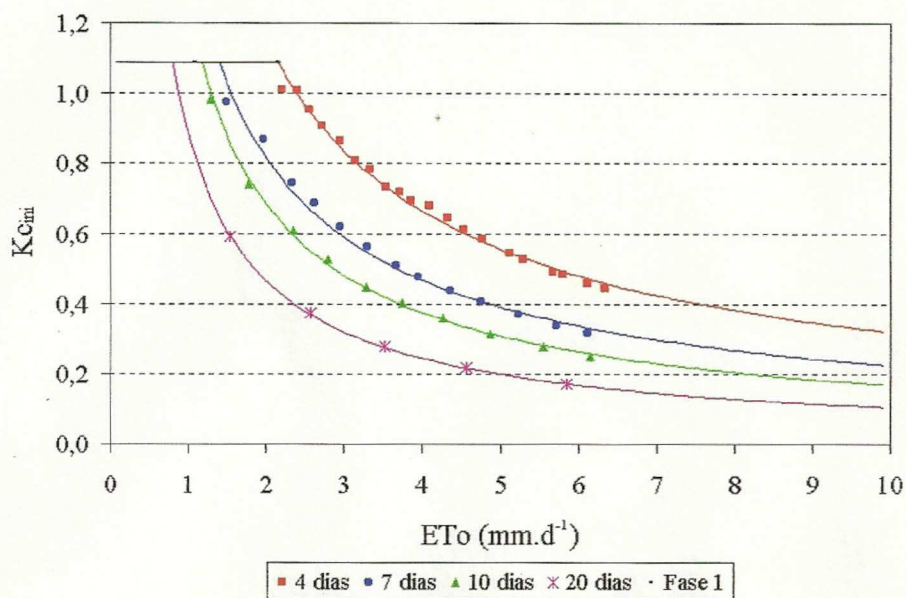


Figura 20 – Variação do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$) a partir da E_{To} e da frequência de umedecimento, em solo de textura grossa sob efeito de irrigação de 20 mm a cada simulação de irrigação.

JAGTAP e JONES (1989) mostraram que o K_c , devido ao solo, depende da frequência de irrigação. Concordando com esses autores, observa-se, nas Figuras 4 a 20, que quanto maior a frequência de irrigação, ou seja, menor intervalo entre aplicações de água, maiores são os valores dos $K_{c_{ini}}$. Isto ocorre porque a E_s teve seu valor aumentado quando o intervalo entre aplicações de água foi menor, consequência do modelo de Ritchie voltar à fase 1 mais vezes, visto que o número de aplicações é maior. RODRIGUES et al. (1998) constataram que o efeito do turno de rega prolonga ou reduz a duração das fases de evaporação. Para KLOCKE et al. (1990), a E_s depende da frequência de irrigação.

Como na fase 1 predominam as condições climáticas (RODRIGUES, 1996), a reta, que representa a fase 1, foi construída por meio das médias dos valores do $K_{c_{ini}}$ durante esta fase.

Como no modelo de Penman-Monteith o maior valor estimado de ET_o foi de $6,44 \text{ mm.d}^{-1}$, para valores maiores de ET_o foram construídas curvas de regressão com prospectivas da ordem de 3,5 unidades. Da mesma forma, como o valor mínimo da ET_o calculada pelo modelo de Penman-Monteith foi de $1,08 \text{ mm.d}^{-1}$, foram feitas retrospectivas até o valor da ET_o próximo de zero.

As diferenças observadas, da duração da fase 1, aconteceram devido ao valor do parâmetro U e do intervalo entre as aplicações de água.

As Figuras 4 a 20 indicam que, em qualquer tipo de solo, os valores do Kc_{ini} decrescem, depois do término da fase 1, à medida que a ET_o cresce. Isto ocorre porque a ET_o está no denominador da equação 35, e, como seus valores vão aumentando, resultam em valores de Kc_{ini} menores. O valor de U foi alcançado mais rapidamente em condições de alta evaporação, concordando com RITCHIE e JOHNSON (1990).

Nos Quadros 3, 4 e 5 são apresentadas as equações de regressão dos Kc_{ini} em função da ET_o para solos de textura fina, franco-arenoso e de textura grossa, respectivamente. Estes quadros contêm também os valores dos coeficientes de regressão (r^2), em que se observa para o solo de textura fina (Quadro 3) o menor valor do (r^2), de 0,91, sendo os demais valores do (r^2) superiores. No Quadro 4 (franco-arenoso), todos os valores do (r^2) são maiores que 0,96. E, no Quadro 5 (solo de textura grossa), os valores do (r^2) são superiores a 0,98. A curva que melhor se ajustou às condições de molhamento e textura do solo foi do tipo $Kc_{ini} = a.ET_o^b$.

No Quadro 3 (solo de textura fina), observa-se, pelos valores de a e b , que, para o intervalo de quatro dias entre cada irrigação simulada, os valores do Kc_{ini} não variaram quando se aumentou o valor da lâmina aplicada de 30 para 40 mm ou mais. Para os intervalos de sete e dez dias, os valores do Kc_{ini} também não variaram quando se aumentou o valor da lâmina aplicada de 40 para 50 mm ou mais. O mesmo ocorreu para o intervalo de 20 dias, quando os valores do Kc_{ini} não variaram no momento em que se aumentou o valor da lâmina aplicada de 50 para 60 mm.

Quadro 3 – Equações de regressão dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) em função da evapotranspiração de referência (ET_o), para solo de textura fina, e coeficiente de determinação

Lâmina aplicada (mm)	Intervalo entre irrigação (dias)	a	b	R^2	ET_o ($mm.d^{-1}$)
5	4	1,1202	0	----	$\leq 2,21$
	4	3,760	-1,5255	0,98	$> 2,21$
	7	1,1202	0	----	$\leq 1,85$
	7	3,1745	-1,6477	0,98	$> 1,85$
	10	1,1202	0	----	$\leq 1,75$
	10	2,7373	-1,6619	0,98	$> 1,75$
	20	1,1202	0	----	$\leq 1,46$
	20	2,249	-1,6946	0,99	$> 1,46$
10	4	1,1646	0	----	$\leq 2,87$
	4	4,9783	-1,3562	0,96	$> 2,87$
	7	1,1646	0	----	$\leq 2,04$
	7	3,0746	-1,3534	0,97	$> 2,04$
	10	1,1646	0	----	$\leq 1,75$
	10	2,5876	-1,4098	0,98	$> 1,75$
	20	1,1646	0	----	$\leq 1,48$
	20	2,1075	-1,528	0,99	$> 1,48$
15	4	1,1646	0	----	$\leq 3,34$
	4	4,328	-1,071	0,95	$> 3,34$
	7	1,1646	0	----	$\leq 2,28$
	7	2,9914	-1,1549	0,96	$> 2,28$
	10	1,1646	0	----	$\leq 1,90$
	10	2,6984	-1,2865	0,97	$> 1,90$
	20	1,1646	0	----	$\leq 1,48$
	20	2,0744	-1,4307	0,99	$> 1,48$
20	4	1,1646	0	----	$\leq 4,60$
	4	7,7487	-1,2405	0,98	$> 4,60$
	7	1,1646	0	----	$\leq 2,95$
	7	4,606	-1,2711	0,98	$> 2,95$
	10	1,1646	0	----	$\leq 2,04$
	10	2,5268	-1,0969	0,95	$> 2,04$
	20	1,1646	0	----	$\leq 1,48$
	20	2,0195	-1,3198	0,99	$> 1,48$
25	4	1,1646	0	----	$\leq 4,60$
	4	2,6266	-0,5305	0,91	$> 4,60$
	7	1,1646	0	----	$\leq 3,14$
	7	3,5426	-0,9745	0,96	$> 3,14$
	10	1,1646	0	----	$\leq 2,39$
	10	3,1422	-1,1205	0,98	$> 2,39$
	20	1,1646	0	----	$\leq 1,48$
	20	1,9587	-1,2034	0,98	$> 1,48$

Continua...

Quadro 3, Cont.

30	4	1,1646	0	----	≤ 4,60
	4	2,5778	-0,5183	0,91	> 4,60
	7	1,1646	0	----	≤ 3,30
	7	2,9001	-0,7602	0,99	> 3,30
	10	1,1646	0	----	≤ 2,42
	10	2,5958	-0,8862	0,96	> 2,42
	20	1,1646	0	----	≤ 1,48
	20	1,8898	-1,084	0,97	> 1,48
40	4	1,1646	0	----	≤ 4,60
	4	2,5778	-0,5183	0,91	> 4,60
	7	1,1646	0	----	≤ 3,30
	7	2,7126	-0,7109	0,99	> 3,30
	10	1,1646	0	----	≤ 2,42
	10	2,0962	-0,6715	0,96	> 2,42
	20	1,1646	0	----	≤ 1,48
	20	1,678	-0,8469	0,97	> 1,48
50	4	1,1646	0	----	≤ 4,60
	4	2,5778	-0,5183	0,91	> 4,60
	7	1,1646	0	----	≤ 3,30
	7	2,7126	-0,7109	0,99	> 3,30
	10	1,1646	0	----	≤ 2,42
	10	2,0962	-0,6715	0,96	> 2,42
	20	1,1646	0	----	≤ 1,48
	20	1,5474	-0,7257	0,98	> 1,48
60	4	1,1646	0	----	≤ 4,60
	4	2,5778	-0,5183	0,91	> 4,60
	7	1,1646	0	----	≤ 3,30
	7	2,7126	-0,7109	0,99	> 3,30
	10	1,1646	0	----	≤ 2,42
	10	2,0962	-0,6715	0,96	> 2,42
	20	1,1646	0	----	≤ 1,48
	20	1,5474	-0,7257	0,98	> 1,48

$$Kc_{ini} = a \cdot ET_o^b$$

Quadro 4 – Equações de regressão dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) em função da evapotranspiração de referência (ET_o), para solo franco-arenoso (textura grossa), e coeficiente de determinação

Lâmina aplicada (mm)	Intervalo entre irrigação (dias)	a	b	R ²	ET _o (mm.d ⁻¹)
5	4	1,093	0	---	≤ 1,64
	4	1,975	-1,241	0,98	> 1,64
	7	1,093	0	---	≤ 1,23
	7	1,3703	-1,2977	0,99	> 1,23
	10	1,093	0	---	≤ 1,15
	10	1,2424	-1,4009	0,98	> 1,15
	20	1,093	0	---	≤ 1,04
	20	1,1678	-1,6217	0,98	> 1,04
10	4	1,0988	0	---	≤ 2,21
	4	2,4274	-0,9732	0,99	> 2,21
	7	1,0988	0	---	≤ 1,48
	7	1,6895	-1,0736	0,96	> 1,48
	10	1,0988	0	---	≤ 1,36
	10	1,3153	-1,1248	0,99	> 1,36
	20	1,0988	0	---	≤ 0,95
	20	1,0689	-1,3547	0,98	> 0,95
15	4	1,0899	0	---	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	---	≤ 1,75
	7	1,803	-0,8876	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	---	≤ 1,36
	10	1,4458	-0,9628	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	---	≤ 0,95
	20	1,0663	-1,1906	0,99	> 0,95
20	4	1,0899	0	---	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	---	≤ 1,75
	7	1,7536	-0,8605	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	---	≤ 1,36
	10	1,3545	-0,8354	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	---	≤ 0,95
	20	1,0499	-1,0168	0,99	> 0,95
25	4	1,0899	0	---	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	---	≤ 1,75
	7	1,7536	-0,8605	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	---	≤ 1,36
	10	1,3545	-0,8354	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	---	≤ 0,95
	20	0,9906	-0,9113	0,99	> 0,95

Continua...

Quadro 4, Cont.

30	4	1,0899	0	----	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	----	≤ 1,75
	7	1,7536	-0,8605	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	----	≤ 1,36
	10	1,3545	-0,8354	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	----	≤ 0,95
	20	0,9906	-0,9113	0,99	> 0,95
40	4	1,0899	0	----	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	----	≤ 1,75
	7	1,7536	-0,8605	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	----	≤ 1,36
	10	1,3545	-0,8354	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	----	≤ 0,95
	20	0,9906	-0,9113	0,99	> 0,95
50	4	1,0899	0	----	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	----	≤ 1,75
	7	1,7536	-0,8605	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	----	≤ 1,36
	10	1,3545	-0,8354	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	----	≤ 0,95
	20	0,9906	-0,9113	0,99	> 0,95
60	4	1,0899	0	----	≤ 2,21
	4	1,9517	-0,7043	0,98	> 2,21
	7	1,0899	0	----	≤ 1,75
	7	1,7536	-0,8605	0,99	> 1,75
	10	1,0899	0	----	≤ 1,36
	10	1,3545	-0,8354	0,99	> 1,36
	20	1,0899	0	----	≤ 0,95
	20	0,9906	-0,9113	0,99	> 0,95

$$Kc_{mi} = a \cdot ETo^b$$

Quadro 5 – Equações de regressão dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) em função da evapotranspiração de referência (ET_o), para solo de textura grossa, e coeficiente de determinação

Lâmina aplicada (mm)	Intervalo entre irrigação (dias)	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²	ET _o (mm.d ⁻¹)
5	4	1,0887	0	----	≤ 1,53
	4	1,8235	-1,2036	0,98	> 1,53
	7	1,0887	0	----	≤ 1,15
	7	1,2542	-1,2691	0,99	> 1,15
	10	1,0887	0	----	≤ 1,05
	10	1,1027	-1,3594	0,98	> 1,05
	20	1,0887	0	----	≤ 0,95
	20	1,0121	-1,5845	0,98	> 0,95
10	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,2483	-0,9264	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,5105	-1,0245	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2025	-1,0801	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,90
	20	0,9264	-1,2959	0,98	> 0,90
15	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,261	-0,8841	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,9461	-1,1422	0,99	> 0,80
20	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2486	-0,8707	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,8843	-0,9295	0,99	> 0,80
25	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2486	-0,8707	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,8843	-0,9295	0,99	> 0,80

Continua...

Quadro 5, Cont.

30	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2486	-0,8707	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,8843	-0,9295	0,99	> 0,80
40	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2486	-0,8707	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,8843	-0,9295	0,99	> 0,80
50	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2486	-0,8707	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,8843	-0,9295	0,99	> 0,80
60	4	1,0899	0	----	≤ 2,14
	4	2,004	-0,7977	0,99	> 2,14
	7	1,0899	0	----	≤ 1,36
	7	1,4222	-0,8033	0,99	> 1,36
	10	1,0899	0	----	≤ 1,08
	10	1,2486	-0,8707	0,99	> 1,08
	20	1,0899	0	----	≤ 0,80
	20	0,8843	-0,9295	0,99	> 0,80

$$Kc_{ini} = a \cdot ETo^b$$

No Quadro 4, solo franco-arenoso (textura grossa), observa-se, pelos valores de a e b , que, para o intervalo de quatro dias entre cada irrigação simulada, os valores do Kc_{ini} não variaram quando se aumentou o valor da lâmina aplicada de 15 para 20 mm ou mais. Para os intervalos de sete e dez dias, os valores do Kc_{ini} também não variaram quando se aumentou o valor da lâmina aplicada de 20 para 25 mm ou mais. O mesmo ocorreu para o intervalo de 20 dias, quando os valores do Kc_{ini} não variaram no momento em que se aumentou o valor da lâmina aplicada de 25 para 30 mm ou mais.

No Quadro 5 (solo de textura grossa), observa-se, pelos valores de a e b , que, para os intervalos de quatro e sete dias entre cada irrigação simulada, os valores do Kc_{ini} não variaram quando se aumentou o valor da lâmina aplicada de 15 para 20 mm ou mais. O mesmo ocorreu para os intervalos de 10 e 20 dias, quando os valores do Kc_{ini} não variaram no momento em que se aumentou o valor da lâmina aplicada de 20 para 25 mm ou mais.

Nos Quadros 3 a 5, isto aconteceu porque a lâmina de água aplicada foi suficiente para que, no modelo de Ritchie, ocorresse o retorno ao início da fase 1 de evaporação, ou seja, a lâmina aplicada ultrapassou o valor do somatório de Es_2 e U . Quando a lâmina aplicada não é suficiente para ultrapassar o valor de U , o modelo volta a algum ponto dentro da fase 1, que seria de menor duração. Por exemplo: em solo de textura fina (Quadro 3), para o intervalo de quatro dias, a lâmina aplicada de 60 mm tem o mesmo efeito que a lâmina de 30 mm, já que 30 mm, para este intervalo, mesmo com o aumento da demanda evaporativa, foi suficiente para o modelo retornar ao início da fase 1 de secamento do solo.

O Quadro 3 mostra a duração da fase 1, para o intervalo entre aplicações de água de quatro dias, até o valor da ET_o de $2,21 \text{ mm.d}^{-1}$, quando o valor da lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; $2,87 \text{ mm.d}^{-1}$, quando a lâmina aplicada foi de 10 mm; $3,34 \text{ mm.d}^{-1}$, quando a lâmina aplicada foi de 15 mm; e $4,6 \text{ mm.d}^{-1}$, quando a lâmina aplicada foi de 20 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de sete dias, observa-se que a duração da fase 1 acontece até o valor de ET_o de $1,85 \text{ mm.d}^{-1}$, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; $2,04 \text{ mm.d}^{-1}$, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm; $2,28 \text{ mm.d}^{-1}$,

quando o valor da lâmina aplicada foi de 15 mm; 2,95 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 20 mm; 3,14 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 25 mm; e 3,30 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 30 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de dez dias, observa-se que a duração da fase 1 acontece até o valor de ETo de 1,75 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 e 10 mm; 1,90 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 15 mm; 2,04 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 20 mm; 2,39 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 25 mm; e 2,42 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 30 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de 20 dias, observa-se que a duração da fase 1 acontece até o valor da ETo de 1,46 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; e 1,48 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

O Quadro 4 mostra a duração da fase 1, para o intervalo entre aplicações de água de quatro dias, até o valor da ETo de 1,64 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; e 2,21 mm.d⁻¹, quando a lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de sete dias, observa-se que a duração da fase 1 ocorre até o valor da ETo de 1,23 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; 1,48 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm; e 1,75 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 15 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de dez dias, observa-se que a duração da fase 1 acontece até o valor da ETo de 1,15 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; e 1,36 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de 20 dias, observa-se que a duração da fase 1 ocorre até o valor da ETo de 1,04 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; e 0,95 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

O Quadro 5 mostra a duração da fase 1, para o intervalo entre aplicações de água de quatro dias, até o valor da ETo de 1,53 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; e 2,14 mm.d⁻¹, quando a lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de sete dias, observa-se que a duração da fase 1 ocorre até o valor da ETo de 1,15 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; e 1,36 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de dez dias, observa-se que a duração da fase 1 ocorre até o valor da ETo de 1,05 mm.d⁻¹, quando a lâmina aplicada foi de 5 mm; e 1,08 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Para o intervalo de 20 dias, observa-se que a duração da fase 1 ocorre até o valor da ETo de 0,95 mm.d⁻¹, quando a lâmina d'água aplicada foi de 5 mm; 0,90 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 10 mm; e 0,80 mm.d⁻¹, quando o valor da lâmina aplicada foi de 15 mm ou mais em cada simulação de irrigação.

Salienta-se que, se as informações das figuras ou dos quadros, que representam as estimativas dos coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$), forem utilizadas em sistema de irrigação em que a superfície do solo não seja completamente umedecida, como gotejamento ou por sulcos, o $K_{c_{ini}}$, obtido das figuras ou das equações de regressão, deverá ser corrigido, multiplicando-se o valor obtido pela fração de área molhada (0,1 a 0,9); e caso estas informações sejam utilizadas em irrigações com frequências diferentes daquelas para as quais elas foram geradas, o $K_{c_{ini}}$ será subestimado, se a frequência for menor, ou superestimado, se a frequência for maior.

4.2. Efeito da lâmina d'água aplicada

O efeito da lâmina d'água aplicada, nos valores dos coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial, pode ser observado nas Figuras 21 a 23, em que a Figura 21 representa o solo de textura fina; a Figura 22, o solo franco-arenoso (textura grossa); e a Figura 23, o solo de textura grossa. Para as três figuras foram utilizados os mesmos intervalos entre aplicações (dez dias), em que, para cada tipo de solo, houve variação apenas nos valores da lâmina aplicada, neste intervalo.

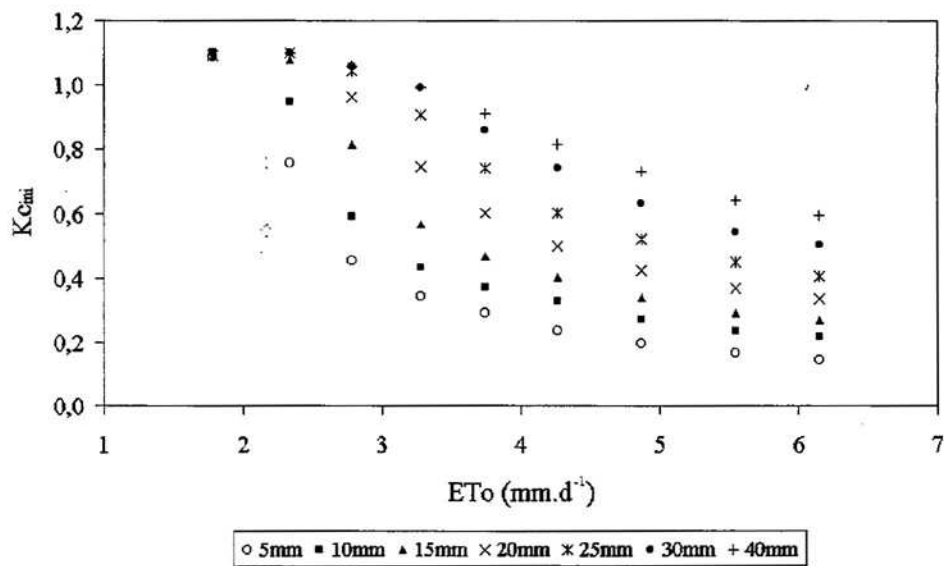


Figura 21 – Valores do $K_{c_{ini}}$ em solo de textura fina para intervalos entre irrigações simuladas de dez dias, em função da lâmina de água aplicada.

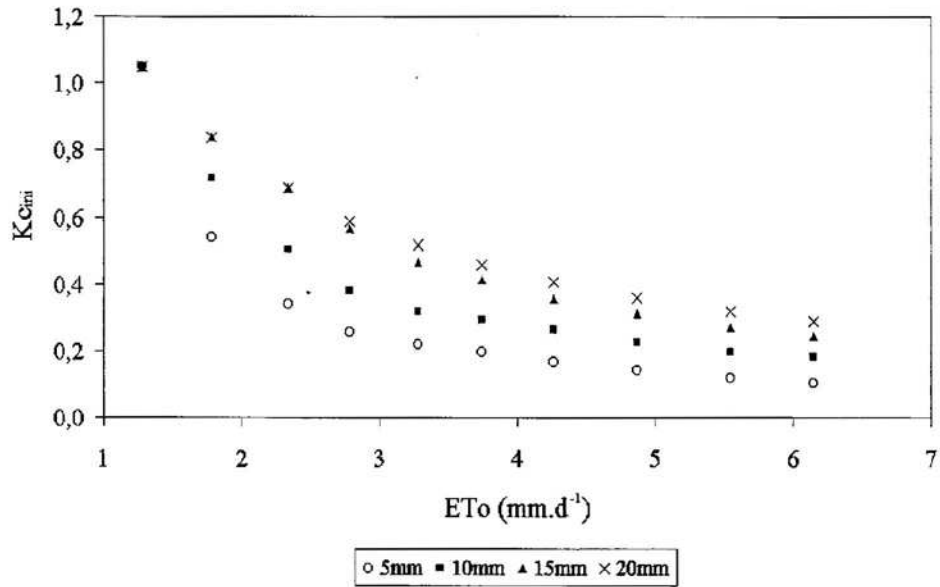


Figura 22 – Valores do Kc_{ini} em solo franco-arenoso (textura grossa) para intervalos entre irrigações simuladas de dez dias, em função da lâmina de água aplicada.

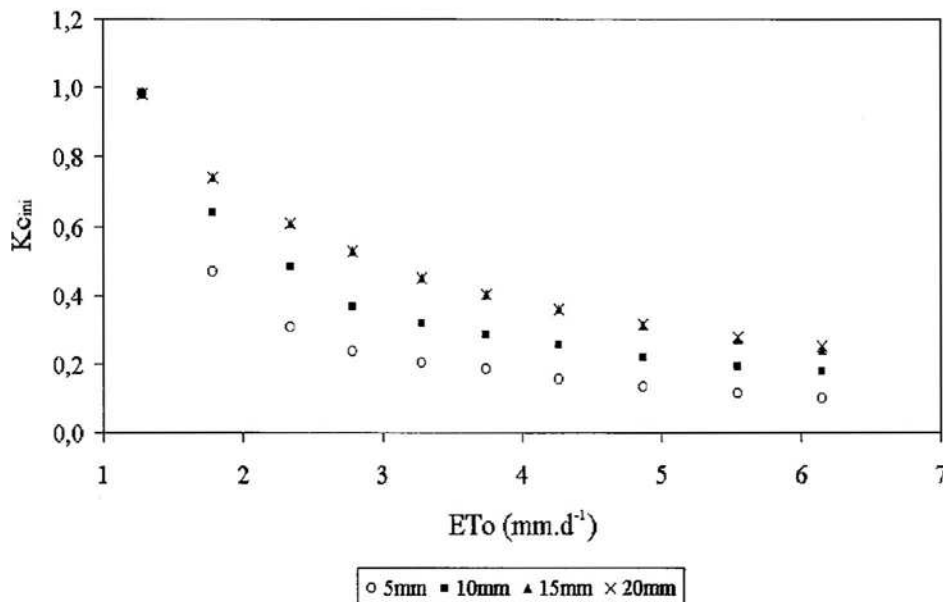


Figura 23 – Valores do Kc_{ini} em solo de textura grossa para intervalos entre irrigações simuladas de dez dias, em função da lâmina de água aplicada.

As Figuras 21 a 23 mostram que, quanto maior for a lâmina aplicada, maior é o valor do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial ($K_{c_{ini}}$), ou seja, o conteúdo de água na superfície do solo foi maior quando a lâmina aplicada aumentou. Assim, lâminas maiores utilizadas nas simulações fizeram com que o modelo de Ritchie ficasse mais tempo na fase 1 de evaporação da água do solo. Dessa forma, os valores de E_s calculados aumentaram quando o valor da lâmina aplicada aumentou. Como consequência, os valores dos $K_{c_{ini}}$ aumentaram. MANTOVANI (1993) constatou que no estágio de desenvolvimento inicial o K_c depende, fundamentalmente, do conteúdo de água na camada superficial do solo. A tendência dos $K_{c_{ini}}$, para os outros intervalos entre aplicações, é semelhante, variando apenas os valores desse parâmetro.

4.3. Efeito da textura do solo

O efeito da textura do solo pode ser observado no Quadro 6, onde são mostrados os valores dos $K_{c_{ini}}$, para o mesmo intervalo entre aplicações e o mesmo valor da lâmina aplicada. Assim, o único efeito observado nos valores do $K_{c_{ini}}$ deve-se à textura do solo, ou seja, aos valores dos parâmetros U e α utilizados para cada textura de solo.

Observa-se que, quando se reduz o valor do parâmetro U , textura fina para grossa, os valores do $K_{c_{ini}}$ são reduzidos. Isto ocorreu porque, quando se reduziu U , resultou em valores de E_s menores; como consequência, o $K_{c_{ini}}$ calculado foi menor. Valor de U maior significa maior tempo de permanência na fase 1 de evaporação, e valores menores, menor tempo de permanência nesta fase. Para valores menores do parâmetro U , a fase 2 de evaporação é atingida mais rapidamente. Assim, em solo de textura grossa, onde o valor desse parâmetro é menor, predomina a segunda fase; como consequência, a E_s calculada no modelo de Ritchie é menor. Quando utiliza-se valores de α maiores, maior tem que ser o valor da lâmina aplicada para vencer o valor do somatório calculado pela equação 27.

Quadro 6 – Comparação dos valores obtidos do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) em solo de texturas fina e grossa submetidas a aplicação de 20 mm d'água, nos intervalos entre aplicações de 4, 7, 10 e 20 dias

ETo (mm.d ⁻¹)	Intervalo entre aplicações (dias)							
	4		7		10		20	
	Textura							
	Fina	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Grossa
	Kc_{mi}							
1	1,16	1,09	1,16	1,09	1,16	1,09	1,16	0,88
2	1,16	1,09	1,16	0,81	1,16	0,68	0,81	0,46
3	1,16	0,83	1,14	0,59	0,76	0,48	0,47	0,32
4	1,16	0,66	1,79	0,47	0,55	0,37	0,32	0,24
5	1,05	0,56	0,60	0,39	0,43	0,31	0,24	0,20
6	0,84	0,48	0,47	0,34	0,35	0,26	0,19	0,17
7	0,69	0,42	0,39	0,30	0,30	0,23	0,15	0,14
8	0,59	0,38	0,33	0,27	0,26	0,20	0,13	0,13
9	0,51	0,35	0,28	0,24	0,23	0,18	0,11	0,11
10	0,45	0,32	0,25	0,22	0,20	0,17	0,10	0,10
média	0,88	0,62	0,66	0,47	0,54	0,40	0,37	0,28

RODRIGUES et al. (1998) constataram também que o efeito da textura do solo prolonga ou reduz a duração das fases de evaporação.

4.4. Comparação dos resultados do presente estudo com os resultados apresentados por Pereira e Allen

Nas Figuras 24 e 25, tem-se a comparação dos valores dos coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial do presente estudo (Kc_{ini}) com os apresentados por PEREIRA e ALLEN (1997) $Kc_{ini}(PA)$. Os coeficientes de determinação, entre os valores de PEREIRA e ALLEN (1997) e os do presente estudo, em solos de textura fina com lâmina aplicada maior que 40 mm, para intervalos entre aplicações de 4, 7, 10 e 20 dias, foram de 0,99; 0,99; 0,99; e 0,96, respectivamente. Em solo de textura grossa com lâmina aplicada maior que

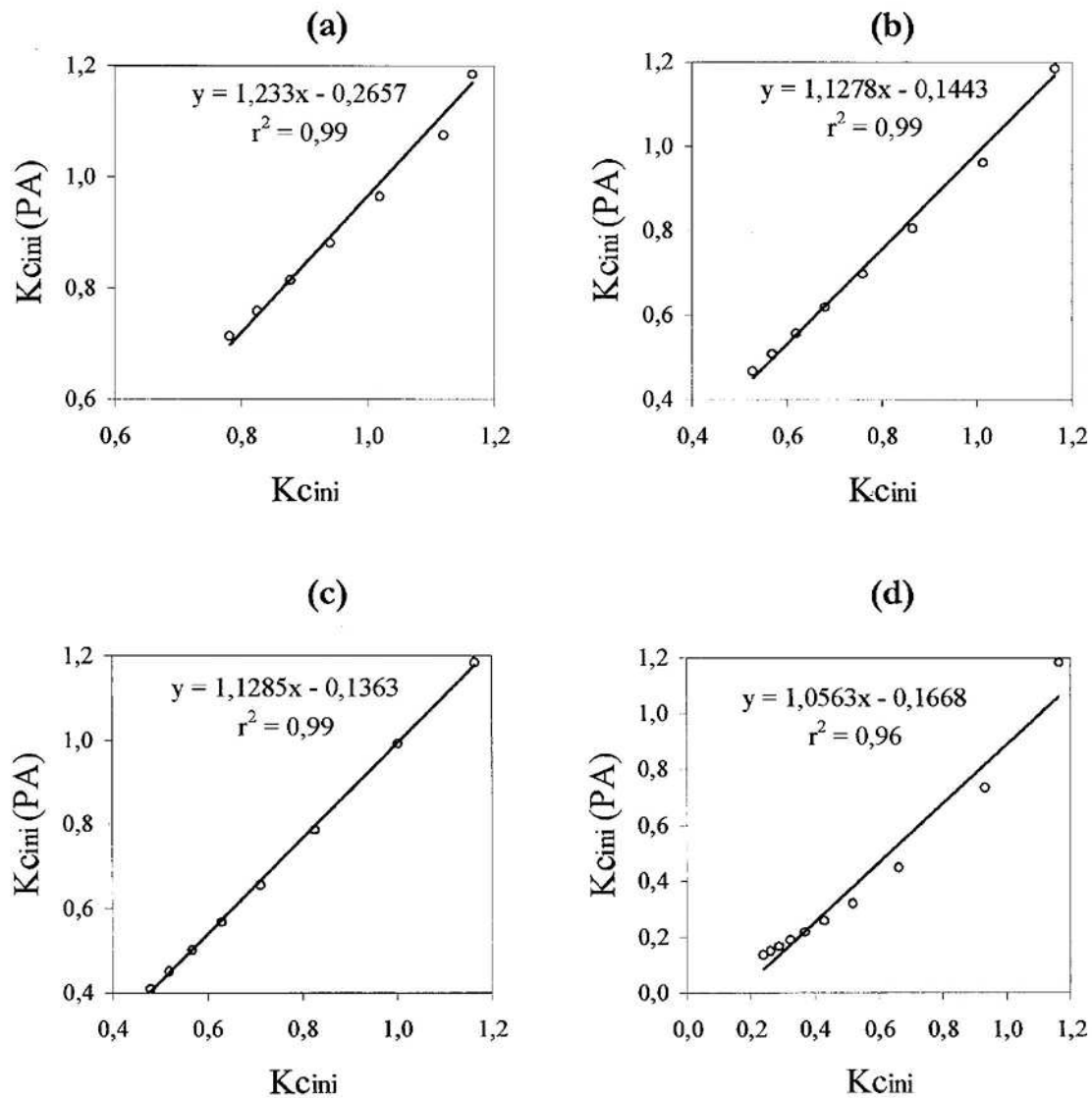


Figura 24 – Comparação dos valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos no presente trabalho (K_{cini}) com os valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos por PEREIRA e ALLEN (1997) $K_{cini}(PA)$ em solo de textura fina com lâmina aplicada de 40 mm por vez, equação de regressão e coeficiente da regressão para intervalos entre aplicações de (a) 4, (b) 7, (c) 10 e (d) 20 dias.

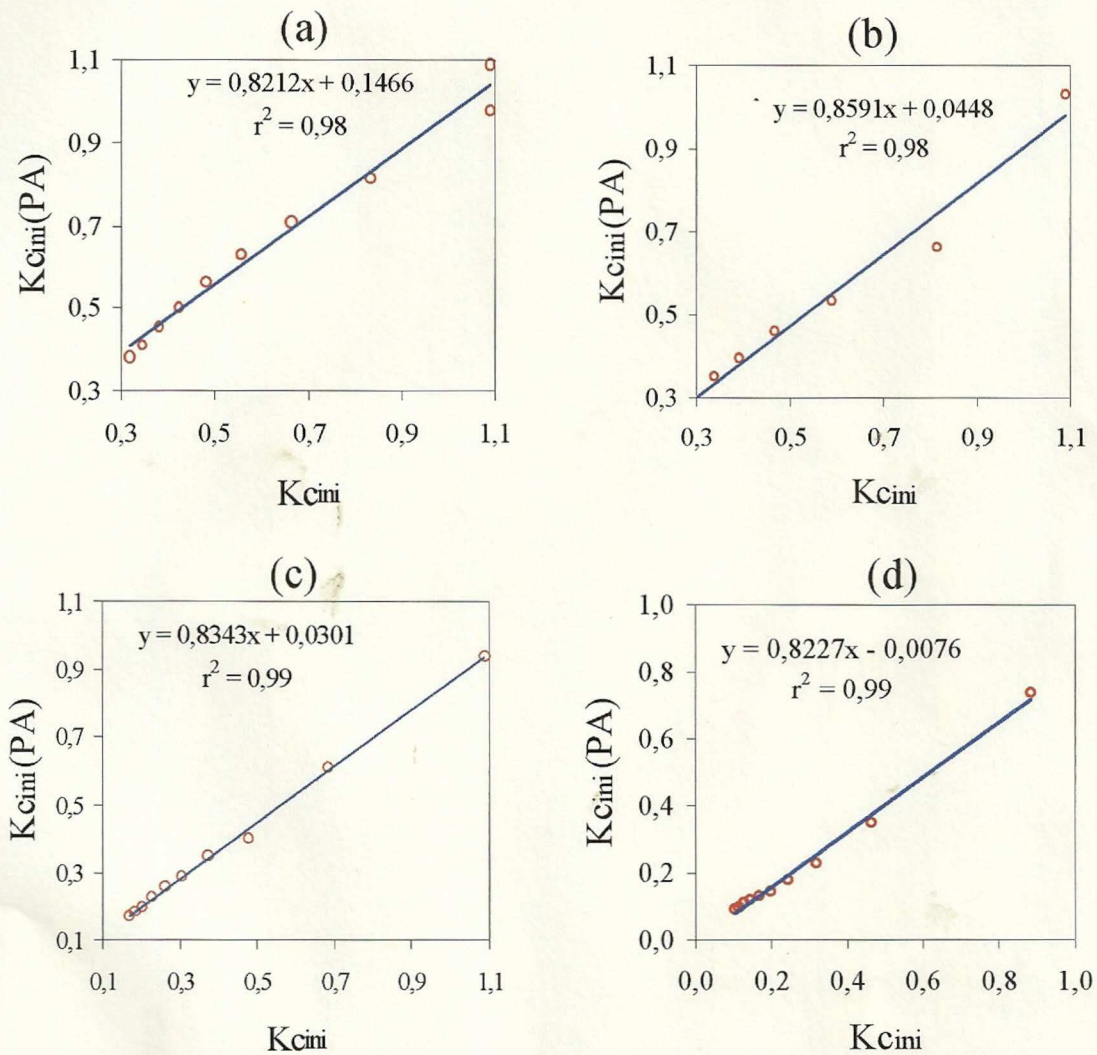


Figura 25 – Comparação dos valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos no presente trabalho (K_{cini}) com os valores do coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial obtidos por PEREIRA e ALLEN (1997) $K_{cini}(PA)$ em solo de textura grossa com lâmina aplicada de 20 mm por vez, equação de regressão e coeficiente da regressão para intervalos entre aplicações de (a) 4, (b) 7, (c) 10 e (d) 20 dias.

20 mm, para intervalos entre aplicações de 4, 7, 10 e 20 dias, os coeficientes de determinação foram de 0,98; 0,98; 0,99; e 0,99, respectivamente.

Pelas equações de regressão e pelos respectivos coeficientes de determinação da comparação dos valores dos $Kc_{ini}(PA)$ e Kc_{ini} , podem-se observar valores de (r^2) superiores a 0,96, o que significa boa aproximação do método proposto, em relação aos coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial apresentados por PEREIRA e ALLEN (1997).

O Quadro 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas Figuras 24 e 25.

Quadro 7 – Coeficiente angular (a), coeficiente linear (b) e coeficiente de regressão (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial estimados por PEREIRA e ALLEN (1997) $Kc_{ini}(PA)$ e os estimados pelo presente estudo e Kc_{ini} em solo de textura fina e grossa, nos intervalos entre aplicações de água de 4, 7, 10 e 20 dias

Intervalo entre aplicações (dias)	Textura					
	Fina			Grossa		
	a	b	r^2	a	b	r^2
4	1,23	0,27	0,99	0,82	0,15	0,98
7	1,13	0,14	0,99	0,86	0,04	0,98
10	1,13	0,14	0,99	0,83	0,03	0,99
20	1,05	0,17	0,96	0,82	0,008	0,99

$$Kc_{ini}(PA) = a.Kc_{ini} - b$$

Analisando os dados do Quadro 7, pode-se observar que existe boa correlação entre os $Kc_{ini}(PA)$ e Kc_{ini} estimados no presente estudo. Provavelmente, as diferenças observadas devem-se ao fato de que o modelo de Ritchie, para a estimativa da E_s , utiliza a equação de Priestley e Taylor no cálculo da ET_{max} .

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram estimados os coeficientes de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial por meio da relação entre a evaporação direta da água do solo (E_s) estimada pelo modelo de Ritchie e a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO-1991. Os dados meteorológicos referentes ao ano de 1998, utilizados para executar os modelos, foram coletados na estação meteorológica do INMET, situada no campus da Universidade Federal de Viçosa. O modelo de Ritchie possibilitou a estimativa da E_s para diferentes texturas de solo e diferentes condições de molhamento do solo. Os valores do parâmetro U utilizados foram: 13,7; 6,04; e 5,4, e os do parâmetro α : 8,2; 3,86; e 3,34, que caracterizaram solos como de textura fina, franco-arenoso (grossa) e de textura grossa, respectivamente. Para cada textura de solo, foram simulados nove valores de lâmina d'água aplicada (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 mm), em quatro intervalos entre aplicações (4, 7, 10 e 20 dias). De posse dos resultados, foram obtidos os valores do $K_{c_{ini}}$ para as diferentes texturas de solo, em cada condição de molhamento simulada, o que possibilitou analisar os efeitos da frequência de irrigação, do valor da lâmina aplicada e da textura do solo no $K_{c_{ini}}$. Também foi feita a comparação dos resultados do presente estudo com os apresentados por PEREIRA e ALLEN, em 1997.

Os resultados obtidos permitiram a obtenção das seguintes conclusões:

1. O coeficiente de cultura para o estágio de desenvolvimento inicial (Kc_{ini}) depende da frequência de irrigação, do valor da lâmina d'água aplicada, da demanda evaporativa e da textura do solo.
2. Maior frequência de aplicação de água resulta em maiores valores do Kc_{ini} .
3. Os valores do Kc_{ini} são maiores quando se aumenta o valor da lâmina de água aplicada. Entretanto, os valores do Kc_{ini} não aumentam quando o valor da lâmina aplicada é maior que o suficiente para que, no modelo de Ritchie, ocorra o retorno ao início da fase 1 de evaporação da água do solo.
4. Após a fase 1, de evaporação direta da água do solo, os valores do Kc_{ini} decrescem à medida que a demanda evaporativa aumenta.
5. Sob mesmas condições climáticas e de molhamento, o solo de textura fina apresenta Kc_{ini} maior que o solo de textura grossa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.112, n.4, p.348-386, 1986.
- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGTH, J.L., BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy J.**, v.81, p.650-663, 1989.
- AZAM-ALI, S.N., CROUT, N.M.J., BRADLEY, R.G. Perspectives in modelling resource capture by crops. In: MONTEITH, J.L.; SCOTT, B.K.; UNSWORTH, M.H. **Resource capture by crops**. p.125-148. 1994.
- BAUSCH, W.C., NEALE, C.M.U. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: A concept. **Transaction of the ASAE**, v.30, n.3, p.703-709, 1985.
- BERLATO, M.A., MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 96p. (Boletim Técnico 7).
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa, MG: UFV, 1995. 657p.
- BLACK, T.A., TANNER, C.B., GARDNER, W.R. Evapo-transpiration from snap bean crop. **Agronomy J.**, v.62, p.66-69, 1970.
- BURMAN, R., POCHOP, L.O. **Evaporation, evapotranspiration and climatic data**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 278p. (Developments in Atmosphere Science,22).

- CARVALHO, A.J. **Coeficientes de cultura, avaliação econômica da produção e análise do crescimento da cenoura (*Daucus carota* L.) irrigada.** Viçosa, MG: UFV, 1995. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1995
- CHAN, A.K. **Simulation of growth and development of faba bean (*Vicia Faba* L.).** Reading, UK: (Ph.D. Thesis) - University of Reading, 1992. 217p.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: FAO, 1984. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).
- FAGERIA, N.K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das cultivares.** Brasília, DF: ENBRAPA, 1989. 425 p. (EMBRAPA-CNPq. Documentos, 18)
- GRANT, D.R. Comparison of evapotranspiration measurements using different methods. **Quart. J.R. Met. Soc.**, v.101, p.543-550, 1975.
- IDSO, S.B., REGINATO, R.J., JACKSON, R.D., KIMBALL, B.A., NAKAYAMA, F.S. The three stages of drying of a field soil. **Soil. Sci. Amer. Proc.**, v.38, p.831-837, 1974.
- JAGTAP, S.S., JONES, J.W. Stability of crop coefficients under different climate and irrigation management practices. **Irrigation Science**, v. 10, p.231-44, 1989.
- JENSEN, M.E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements.** New York: ASCE, 1973. 221p.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements.** New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 360p. (ASCE,70).
- JENSEN, M.E., WRIGHT, J., PRATT, B.J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transaction of ASAE**, v.14, n.5, p.954-959, 1971.
- JONES, J.W., RITCHIE, J.T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G.J., HOWEL, T.A., SOLOMON, K.H. (Eds.). **Management of farm irrigation system.** St. Joseph: ASAE, 1990. p.63-89.
- KANEMASU, E.T., STONE, L.R., POWERS, W.L. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. **Agron. J.**, v.68, p.569-572, 1976.
- KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

- KLOCKE, N.L., MARTIN, D.L., TODD, R.W. et al. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.5, p.1590-1596, 1990.
- KRAMER, J.P. **Water relations of plants**. Orlando: Academic Press, 1983. 489p.
- MANTOVANI, E.C. **Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos**. Córdoba: ETSIA, Univ. de Córdoba, 1993. 184p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Universidad de Córdoba, 1993.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment. In: **The state and movement of water in living organisms**. Swansea: Cambridge Univ. Press, 1965. p. 205-34.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. **Neth. J. Agric. Sci.**, v.4, p.9-29, 1956.
- PEREIRA, A.R., NOVA, N.A.V., SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, L.S., ALLEN, R.G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola.**, v.16, n.4, p.118-43,1997..
- PERES, J.G., PEREIRA, A.R., FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. **Eng. Rural**, v.6, n.1, p.65-75, 1995.
- PHILIP, J.R. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. **Journal of Meteorology**, v.14, p.354-336, 1957.
- RITCHIE, J.T., JOHNSON, B.S. Soil and plant factors affecting evaporation. In: STEWART, B. A. e NIELSEN, D. R. (Eds.). **Irrigation of agricultural crops, agronomy**. Madison; ASA; CSSA; SSSA,1990. p.363-390. (Monograph, 30).
- RITCHIE, J.T. Evaporation empirisms for minimizing risk in rainfed agriculture. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRUCULTURAL ENGINNERS. **Advances in evapotranspiration**. Chicago: 1985. p. 139-50.
- RITCHIE, J.T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resource. Res.**, v.8, p.1204-1213, 1972.

- RODRIGUES, L.N. **Análise e teste do modelo de Ritchie: estudo de caso para a determinação da evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Viçosa, MG: UFV, 1996. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- RODRIGUES, L.N., MANTOVANI, E.C. Programa computacional para cálculo da evapotranspiração utilizando o modelo de Ritchie. **Engenharia na Agricultura**, v.4, n.49, p.1-7, 1995.
- RODRIGUES, L. N., SEDIYAMA, G.C., SOCOOL, O. L., MANTOVANI, E.C. The Ritchie model for determining dry bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) transpiration and soil water evaporation. In: CONFERENCE ON AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 23, 1998, Albuquerque, New Mexico. **Proceedings...** Albuquerque, New Mexico: American Meteorology Society, 1998. p.208-221.
- ROSENBERG, N.J. **Microclimate: the biological environment**. New York, John Wiley e Sons, 1974. 315p.
- SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4. n.1, p.1-12, 1996.
- SEDIYAMA, T., PEREIRA M.G., SEDIYAMA, C.S., GOMES, L.L.J. **Cultura da soja**, Viçosa, MG: UFV, 1993, 96p.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.
- TANNER, C.R., JURY, W.A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agron. J.**, v.68, p.239-243, 1976.
- VILLALOBOS, F., FERERES, E. A simulation model for irrigation sheduling under variable raifall. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.1, p.181-188, 1989.
- WITCHERS, B., LUPOND. S. **Irrigation: design and pratice**. London: B T Batsford, 1974. 657p.
- WRIGHT, T.L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.108, n.IR2, p.57-73, 1982.

APÊNDICE

APÊNDICE

Listagem do modelo de Penman-Montheith construído no software ModelMaker versão 3.0.2 (Figura 1).

t 211 0

Main

COMPARTIMENTOS

dr Unconditional

Distância relativa Terra-Sol

$$dr = 1 + 0.033 * \cos((2 * 3.14159265 / 365) * JU)$$

JU Unconditional

Dia juliano

$$JU = t + 1$$

ea Unconditional

Pressão parcial de vapor (kPa)

$$ea = es * ((UR9 + UR15 + UR21) / 3) / 100$$

eaTu Unconditional

Pressão de vapor de saturação à temperatura do bulbo molhado (kPa)

$$eaTu = 0.6108 * \exp(17.27 * tu / (tu + 237.3))$$

es Unconditional

Pressão de vapor de saturação (kPa)

$$es = 0.6108 * \exp(17.27 * t_{media} / (t_{media} + 237.3))$$

ETo Unconditional

Evapotranspiração de referência (mm.d⁻¹)

$$ETo = (s / (s + YESTRE)) * (Rn - G) * (1 / YPYV) + (YPY / (s + YESTRE)) * (900 / (t_{media} + 275)) * U2 * (es - ea)$$

G Unconditional

Fluxo de calor no solo

$$G = 0$$

N Unconditional

Horas de brilho solar (horas)

$$N = (24/3.14) * ws$$

Ra Unconditional

Radiação no topo da atmosfera (MJ.m⁻².d⁻¹)

$$Ra = 37.586 * dr * (ws * \sin(-0.3622) * \sin(\rho) + \cos(-0.3622) * \cos(\rho) * \sin(ws))$$

Rb Unconditional

Saldo de radiação de ondas longas (MJ.m⁻².d⁻¹)

$$Rb = -(0.9 * (ene / N) + 0.1) * (0.31 - 0.14 * \sqrt{ea}) * cSB * (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) * 1/2$$

rho Unconditional (δ)

Declinação solar (rad)

$$\rho = 0.4093 * \sin((2 * 3.14 * JU / 365) - 1.405)$$

Rn Unconditional

Saldo de radiação (MJ.m⁻².d⁻¹)

$$Rn = Rns + Rb$$

Rns Unconditional

Saldo de radiação de ondas curtas (MJ.m⁻².d⁻¹)

$$Rns = (1 - r) * Rs$$

Rs Unconditional

Radiação solar incidente (MJ.m⁻².d⁻¹)

$$Rs = (as + bs * (ene / N)) * Ra$$

s Unconditional

Declividade da curva de pressão de vapor (kPa.oC⁻¹)

$$s = (4098 * es) / (t_{media} + 237.3)^2$$

Tkn Unconditional

Temperatura mínima diária (oC)

$$Tkn = t_{min} + 273$$

Tkx Unconditional

Temperatura máxima diária (oC)

$$Tkx = t_{max} + 273$$

tmedia Unconditional Global

Temperatura média (oC)

$$t_{media} = (ts9 + t_{max} + t_{min} + 2 * ts21) / 5$$

Tu Unconditional

Temperatura do bulbo molhado (oC)

$$Tu = (tu9 + tu15 + 2 * tu21) / 4$$

U2 Unconditional ($U_{10 \rightarrow 2}$)
Velocidade do vento a 2 metros
 $U2 = U_z * (\ln((z2-d)/z0) / \ln((z-d)/z0))$

Ws Unconditional
Ângulo horário do pôr-do-sol (rad)
 $Ws = \arccos(-\tan(-0.39) * \tan(\rho))$

YESTRE Unconditional (γ^*)
Coeficiente psicrométrico modificado ($\text{kPa} \cdot \text{oC}^{-1}$)
 $YESTRE = YPY * (1 + 0.33 * U2)$

YPY Unconditional (γ)
Coeficiente psicrométrico ($\text{kPa} \cdot \text{oC}^{-1}$)
 $YPY = 0.0016286 * ((p9/10 + p15/10 + p21/10) / 3) / YPYV$

YPYV Unconditional (λ)
Calor latente de evaporação ($\text{MJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$)
 $YPYV = 2.501 - (2.361 * 10^{-3}) * t_{media}$

DADOS DE ENTRADA

t Control

p9 Controlled by: t Global Repeated
Pressão ATM lida às 9 horas (kPa)
Linear interpolation

p15 Controlled by: t Global Repeated
Pressão ATM lida às 15 horas (kPa)
Linear interpolation

p21 Controlled by: t Global Repeated
Pressão ATM lida às 21 horas (kPa)
Linear interpolation

ts9 Controlled by: t Global Repeated
Temperatura lida no termômetro de bulbo seco às 9 horas (oC)
Linear interpolation

ts15 Controlled by: t Global Repeated
Temperatura lida no termômetro de bulbo seco às 15 horas (oC)
Linear interpolation

ts21 Controlled by: t Global Repeated
Temperatura lida no termômetro de bulbo seco às 21 horas (oC)

Linear interpolation

tu9 Controlled by: t Global Repeated
Temperatura lida no termômetro molhado às 9 horas (oC)

Linear interpolation

tu15 Controlled by: t Global Repeated
Temperatura lida no termômetro molhado às 15 horas (oC)

Linear interpolation

tu21 Controlled by: t Global Repeated
Temperatura lida no termômetro molhado às 21 horas (oC)

Linear interpolation

tmax Controlled by: t Global Repeated
Temperatura máxima (oC)

Linear interpolation

tmin Controlled by: t Global Repeated
Temperatura mínima (oC)

Linear interpolation

UR9 Controlled by: t Global Repeated
Umidade relativa lida às 9 horas (%)

Linear interpolation

UR15 Controlled by: t Global Repeated
Umidade relativa lida às 15 horas (%)

Linear interpolation

UR21 Controlled by: t Global Repeated
Umidade relativa lida às 21 horas (%)

Linear interpolation

u29 Controlled by: t Global Repeated
Velocidade do vento lida às 9 horas ($m.s^{-1}$)

Linear interpolation

u215 Controlled by: t Global Repeated
Velocidade do vento lida às 15 horas ($m.s^{-1}$)

Linear interpolation

u221 Controlled by: t Global Repeated
Velocidade do vento lida às 21 horas (m.s⁻¹)
Linear interpolation

ene Controlled by: t Global Repeated
Insolação (horas)
Linear interpolation

PARÂMETROS

as 0.25 0
Parâmetro

bs 0.5 0
Parâmetro

cSB 4.903e-09 0
Parâmetro (Constante de Stefan-Boltzmann)

z 10 0
Parâmetro

z0 0.01476 0
Parâmetro

z2 2 0
Parâmetro

r 0.23 0
Cultura hipotética
