

ISSN 0104-1347

Estimativa da evapotranspiração da cultura do milho pelo método Penman-Monteith modificado

Estimating the evapotranspiration of a maize crop through the modified Penman-Monteith method

Bernadete Radin¹, Antonio Odair Santos², Homero Bergamaschi³, Luis Mauro Gonçalves Rosa³ e João Ito Bergonci³

Resumo - Comparou-se a evapotranspiração estimada através do modelo de PENMAN-MONTEITH modificado com medidas em lisímetro de pesagem, ao longo do ciclo da cultura do milho e em diferentes condições atmosféricas. O lisímetro foi instalado no centro de uma área de 0,54ha, localizada na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em Eldorado do Sul/RS (latitude: 30°05'S, longitude: 51°39'W e altitude: 40m). Os resultados mostraram que a evapotranspiração do milho é baixa no início do ciclo, aumentando com o desenvolvimento da cultura, até um máximo próximo aos estádios de pendoamento e espigamento. Após, a evapotranspiração decresce, em função, principalmente da senescência das folhas. No início do ciclo, quando grande parte do solo está descoberto, a evapotranspiração estimada pelo modelo é inferior àquela medida. Porém, à medida em que o índice de área foliar aumenta e cobre o solo, as diferenças entre os valores estimados e medidos tornam-se menores, sendo estes semelhantes a partir do pendoamento, mesmo para diferentes condições atmosféricas.

Palavras-chave: água, lisímetro, milho.

Abstract - In a field experiment conducted at the Agronomic Experimental Station of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, in Eldorado do Sul, Brazil (latitude: 30°05'S, longitude: 51°39'W, altitude: 40m), the crop evapotranspiration estimated through the modified Penman-Monteith model was compared to the crop evapotranspiration (ETc) measured in a weighing lysimeter, throughout the entire crop cycle of maize, at different weather conditions. The lysimeter was installed in the center of a 0.54ha plot. The crop evapotranspiration is low at the beginning of the crop cycle, increasing according to the plant development up to maximum values close to tasseling and silking stages. After that, the ETc decreases as function of the leaf senescence. Early in the crop cycle, when most of soil surface is not covered by plants the evapotranspiration estimated through the model is lower than the measured ETc. However, as the leaf area index increases, the differences between estimated and measured ETc are reduced; those values are similar after tasseling stage, independent of weather conditions.

Key words: water, lysimeter, maize.

Introdução

A determinação da demanda hídrica de uma cultura permite o ajuste de diversas práticas de manejo entre elas a irrigação, bem como um melhor planejamento de lavouras no sentido de aumentar o potencial produtivo, promovendo reduções de riscos e

de custos para produção e aumento da eficiência de utilização da água, principalmente em regiões ou épocas em que há limitações hídricas. O consumo de água pela cultura é tecnicamente denominado evapotranspiração (ET) e pode ser medido ou estimado através de diferentes métodos.

¹Eng^a Agr^a, MS., Doutoranda em Fitotecnia, opção Agrometeorologia. Bolsista PG CNPq. E-mail: b.radin@terra.com.br

²Eng^o Agr^o, Dr., Pesquisador do Instituto Agronômico (IAC), Campinas/SP. E-mail: odairsan@cec.iac.br

³Prof. Dr./UFRGS, Cx. Postal 776, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS.

Entretanto, instrumentos para medição da ET são apenas apropriados para trabalhos experimentais. Para fins mais operacionais, pode-se lançar mão de métodos de estimativas a partir de dados meteorológicos. Um adequado monitoramento hídrico das culturas, através de modelos devidamente ajustados, permite o acompanhamento do seu desenvolvimento e uso racional de práticas como irrigação, além de outras aplicações importantes como diagnósticos culturais e zoneamentos agroclimáticos.

A modernização das redes agrometeorológicas, como o uso de sistemas eletrônicos de coleta, transmissão e processamento de dados permite o emprego de métodos mais robustos e sofisticados para calcular novos índices, que possam reproduzir de forma mais aproximada possível as diferentes situações que se apresentam.

Dentre os métodos de estimativas de evapotranspiração, o modelo combinado de PENMAN-MONTEITH (1965) é um dos mais avançados. MONTEITH (1965) desenvolveu, com base na equação de PENMAN (1948), um modelo que não somente concilia os aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, mas também inclui a resistência do ar ao fluxo de calor sensível (r_{ah}) e vapor d'água (r_{av}) e a resistência da superfície vegetada (r_c) à transferência de vapor d'água para a atmosfera (SEDIYAMA, 1996).

Diversos autores consideram que o método de PENMAN-MONTEITH (1965) é um dos mais representativos e apresenta vantagens sobre os demais métodos na quantificação da evapotranspiração de referência. Partindo de modificações introduzidas por PETERSEN et al. (1991) e FUCHS et al. (1987), SANTOS et al. (1999) expandiram o modelo de PENMAN-MONTEITH, incluindo procedimentos físico-matemáticos para o cálculo da transpiração das partes sombreada e ensolarada de um dossel de milho. Segundo esses autores, a fração de folhas sombreadas do dossel representa uma grande parte do índice de área foliar (IAF), nos estádios em que a cultura do milho está completamente desenvolvida. Com isto, a perda d'água nesta fração do dossel, no cômputo geral da transpiração, pode ser significativa, uma vez que, mesmo sob baixa irradiação, os estômatos mantêm um certo grau de abertura, principalmente por influência da luz na faixa do azul (ZEIGER & FIELD, 1982). A ocorrência de períodos críticos da cultura do milho, em relação ao déficit hídrico, coincide com esses estádios de desenvolvimento. Neste caso, a precisão do monitoramento das necessidades hídricas, em curtos intervalos, tor-

na-se crucial para potencializar a produtividade das culturas (MATZENAUER et al., 1995).

Com base nas premissas feitas, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo de PENMAN-MONTEITH, com as modificações e ajustes introduzidos por PETERSEN et al. (1991) e SANTOS et al. (1999) na estimativa da evapotranspiração do milho, comparada a medições diretas com lisímetro.

Material e métodos

O trabalho foi realizado na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), Eldorado do Sul/RS (latitude: 30° 05' S, longitude: 51° 39' W e altitude: 40m), região climática da Depressão Central. O clima da região, conforme a classificação climática de Köppen, é subtropical úmido de verão quente do tipo fundamental "Cfa" (BERGAMASCHI & GUADANIN, 1990).

Utilizou-se milho híbrido Pioneer 3230. A semeadura, foi realizada no dia 29 de outubro de 1996, utilizando-se um espaçamento de 0,20m entre plantas e 0,75m entre linhas com uma densidade de aproximadamente 67.000 plantas por hectare, numa área de 0,54ha. No centro dessa, estava instalado um lisímetro de pesagem com 5,1m² de superfície. Os dados do lisímetro e os elementos meteorológicos (temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar) foram coletados por um "datalogger" (marca Campbell, modelo CR10) de uma estação meteorológica automática, instalada junto à parcela experimental. A irrigação foi realizada sempre que necessária para manter a umidade do solo, dentro e fora do lisímetro, próxima à capacidade de campo, monitorada através de tensiômetros.

A evapotranspiração horária da cultura do milho (ET_c), a partir de medições feitas no lisímetro, foi obtida com base no balanço hídrico do solo da seguinte maneira:

$$ET_c = \frac{(M_i - M_{i+1})}{A} + P + I - D \quad [1]$$

sendo ET_c em mm, M_i a massa do sistema (solo+água+plantas) na hora i (kg), M_{i+1} a massa do sistema na hora seguinte (kg), P a precipitação pluviométrica (mm), I a irrigação (mm), D a drenagem (mm) e A a área do lisímetro (5,1m²). A divisão da diferença de massa do sistema ($M_i - M_{i+1}$) pela área interna do lisímetro (A) possibilitou obter as variações de

armazenamento da água em milímetros, com resolução de 0,1mm.

Para calcular a ETc diária foi utilizado o mesmo procedimento anterior, porém M_i representou a massa do sistema no dia considerado e M_{i+1} a massa do sistema no dia seguinte.

A evapotranspiração da cultura (ETc, em Wm^2) foi calculada separadamente para folhas ensolaradas e sombreadas, com base no modelo PENMAN-MONTEITH (1965):

$$ETc = \left\{ \frac{s}{s+g} Rn \right\} + \left\{ \frac{rc_p (e_{s(Ta)} - e_a)}{(s+g)(1/g_v)} \right\} / \left\{ 1 + \frac{g}{(g+s)(g_v/g_s)} \right\} \quad [2]$$

sendo s a tangente à curva de pressão de saturação de vapor ($kPa K^{-1}$), γ a constante psicrométrica ($kPa K^{-1}$), Rn o saldo de radiação na superfície ensolarada ou sombreada de folhas ($W m^{-2}$), ρ a densidade do ar ($kg m^{-3}$), c_p o calor específico do ar à pressão constante ($J.kg^{-1}K^{-1}$), $e_{s(Ta)}$ a pressão de saturação de vapor à temperatura do ar (kPa), e_a a pressão real de vapor (kPa), g_v a condutância aerodinâmica ao transporte de vapor para as partes sombreada e ensolarada do dossel que é uma função da condutância da camada limite da folha (g_b) e condutância estomática (g_s), todas em ms^{-1} .

A condutância da camada limite foi calculada da seguinte forma (GATES, 1980):

$$g_b = 300 \left(\frac{U}{D} \right)^{0,5} \quad [3]$$

sendo D a largura média de uma folha de milho e U a velocidade do vento ($m s^{-1}$), computada no topo ensolarado ou sombreado do dossel.

O coeficiente de transporte turbulento (g_a) para o dossel foi calculado de acordo com FUCHS et al. (1987):

$$g_a = k^2 U / \{ [\ln(z-d)/z_0] [\ln(z-d)/z_E] \} \quad [4]$$

sendo k a constante de Von Karman para difusão turbulenta ($k = 0,41$), U a velocidade do vento ($m s^{-1}$) medido à altura z (m), d o deslocamento do plano zero (m), z_0 o comprimento de rugosidade (m) e z_E o comprimento de rugosidade para a transferência de calor sensível (m). Os parâmetros d e z_0 foram determinados a partir de medidas do perfil do vento na própria parcela experimental. Para z_E considerou-se um valor de 20% de z_0 (GARRAT & HICKS, 1973).

A condutância da camada limite da folha (g_b) foi considerada como conectada em paralelo em todo o índice de área foliar (IAF) ensolarado e sombreado e, em série, com g_a (THOM, 1975), obtendo-se g_v :

$$g_v = (g_a) + (g_b IAF_{\Delta}) \quad [5]$$

onde IAF_{Δ} é o IAF ensolarado ou sombreado.

A condutância estomática (g_s em $m s^{-1}$), integrada no dossel, foi determinada da seguinte forma:

$$g_s = g_f IAF_{\Delta} \quad [6]$$

onde g_f é a condutância estomática da parte ensolarada ou sombreada do dossel, estimada em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$), a partir de ajuste feito no modelo de GATES (1980), resultando em:

$$g_f = \frac{1,39RFA}{1 + (0,0024RFA)} \quad [7]$$

O índice de área foliar ensolarado (IAF^*) foi estimado a partir do IAF total, considerando-se uma distribuição angular esférica de folhas (LEMEUR, 1973):

$$IAF^* = [1 - \exp(-fIAF)] / f \quad [8]$$

onde f é a área média horizontal de sombra projetada por uma folha, calculada de acordo com MONTEITH (1975):

$$f = \frac{0,5}{\cos \theta} \quad [9]$$

sendo θ o ângulo zenital solar.

O IAF total foi estimado a partir da altura da cultura, através de modelo ajustado na própria cultura e local por SANTOS (1998) e FRANÇA (1997):

$$IAF = -0,51 + 0,04h - 6,36 \cdot 10^{-5} h^2 \quad [10]$$

sendo h a altura do dossel (cm).

O fluxo de radiação solar direta (R_d) foi computado a partir da radiação global média, adaptado de FUCHS et al. (1984) e SANTOS (1998), do seguinte modo:

$$R_d = \left(\frac{R_{de}}{R_{ge}} \right) (R_g) \quad [11]$$

sendo R_{de} a radiação solar direta estimada, R_{ge} a radiação global estimada (CAMPBELL, 1977) e R_g a radiação global medida. Para fluxo de radiação solar difusa foi considerada a diferença entre a radiação global medida e a radiação direta calculada pela equação [11].

O cômputo da RFA interceptada pelo dossel seguiu procedimento descrito por SANTOS (1998). O saldo de radiação (Rn) para a parte ensolarada do dossel foi calculado considerando-se radiação difusa e direta, enquanto que para a parte sombreada somente a radiação difusa foi considerada, de acordo com a equação seguinte:

$$Rn = IAF_{\Delta} [\alpha (R_{de} + cR_{di}) + cR_l] \quad [12]$$

sendo α o coeficiente de absorção para radiação de onda curta, em que foi utilizado um valor de 0,5 (JONES, 1992), R_{di} radiação difusa e R_l a troca de onda longa entre folhas expostas e a atmosfera, sendo que χ é um fator de visada para transferência de radiação entre folhas e o céu (parte do céu vista pela folha) (FUCHS et al., 1987) definido como:

$$\chi = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \exp(-fIAF) \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad [13]$$

onde ϕ é o ângulo azimutal solar.

O modelo trata a folhagem como uniformemente distribuída sobre o solo. Durante os estádios iniciais, a estrutura da fileira concentra folhas em uma pequena fração de solo. A interceptação média, neste caso, é menor do que aquela para um dossel uniforme. Para uma forma retangular da fileira, de altura h , largura w e espaçamento E_s , o IAF de entrada foi corrigido (IAF^o), em função do IAF* ensolarado (Equação 8) de acordo com GOUDRIAAN (1977):

$$IAF^o = (E_s IAF^*) / (w + sp) \quad [14]$$

onde sp é o comprimento de sombra projetada pelas plantas da fileira, e equacionado da seguinte forma:

$$sp = \tan \theta \sin \varphi \quad [15]$$

sendo φ o menor ângulo horizontal entre a direção do sol e a direção da fileira.

Resultados e discussão

Como se observa na Figura 1, a evapotranspiração medida através do lisímetro foi mais elevada que a estimada pelo modelo até próximo ao pendoamento, mas principalmente no início

do ciclo. Como o IAF é baixo nesse período, essa diferença pode ser atribuída ao fato de que a ET medida integra também a evaporação do solo, o que não ocorreu com a estimada pelo modelo. Essa maior ETc medida pelo lisímetro ocorreu principalmente em dias que sucederam chuvas ou irrigações. A correção feita para o cálculo da ET nas etapas iniciais do ciclo (Equação 14) não representou o acréscimo esperado em precisão de estimativa. De fato, o equacionamento apresentado é sensível à distância entre fileiras, neste caso 0,75m, que pode ser considerado um valor alto. Os valores da Figura 1 sugerem que, neste caso e em outros, onde o desenvolvimento inicial permite rápida cobertura do solo pela cultura, a modelagem deste item pode não compensar a complexidade através do acréscimo nas variáveis de entrada. SANTOS et al. (1999), trabalhando com milho, também observaram resultados semelhantes.

À medida em que as plantas do milho cresceram, aumentando assim a cobertura do solo, as diferenças entre os dados estimados pelo modelo e medidos em lisímetro reduziram-se a partir do pendoamento das plantas, quando o IAF encontrava-se em torno de 4. A partir desse momento, a ETc obtida através dos dois métodos manteve-se próxima.

Aos 48 dias após a emergência, a cultura encontrava-se próxima ao estádio de pendoamento. Neste dia, houve oscilações no curso da radiação solar (R_s) (Figura 2a). A temperatura máxima foi de 28,4°C entre as 14 e 16h (Figura 2c). Houve oscilações no curso diário da ET, sendo essas mais acentuadas nas medições realizadas através do lisímetro (Figura 2d). Segundo BERGAMASCHI et al. (1997) essas variações na ET medida por lisímetro de pesagem são esperadas quando feitas em intervalos curtos. Dentre as possíveis causas estariam as oscilações na velocidade do vento e os abalos físicos. Por outro lado, essas variações na ET também devem estar associadas às oscilações na radiação solar. O aumento desta eleva a ET, pela maior carga energética sobre o dossel e pelo aumento da condutância da cultura ao fluxo de vapor d'água.

A estimativa da ET pelo modelo também apresentou oscilações, porém menores do que as apresentadas na medição pelo lisímetro. No total diário verifica-se que os valores foram iguais, sendo de 4,5mm dia⁻¹ por ambos métodos, demonstrando que o modelo foi bom estimador da ETc nestas condições. A velocidade do vento permaneceu baixa em praticamente todo o período, com exceção do final da tarde, quando ultrapassou 2m s⁻¹ (Figura 2b).

Aos 52 dias após a emergência, na semana do pendoamento, o IAF se encontrava próximo a 5.

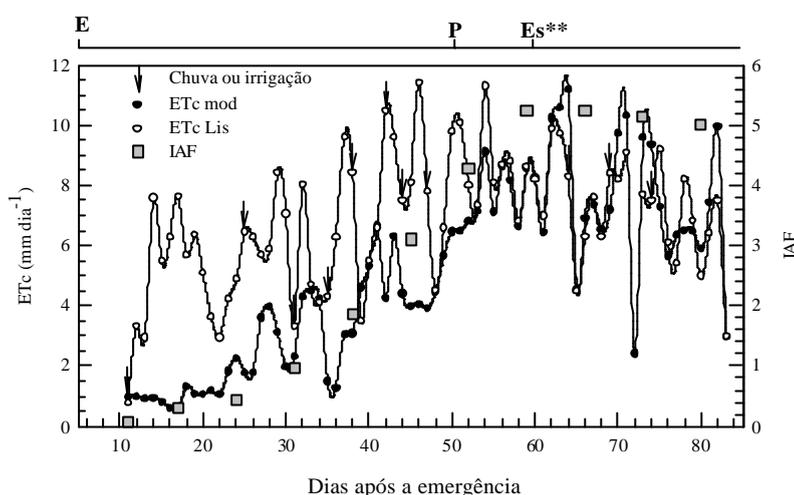


Figura 1. Evapotranspiração da cultura do milho medida pelo lisímetro (ETc Lis), e estimada pelo modelo (ETc mod), índice de área foliar (IAF) e as setas representam as irrigações ou precipitações. EEA/ UFRGS, 1996/97. Eldorado do Sul - RS.

** E = emergência P = pendoamento Es = espigamento.

Na Figura 3a observa-se que a radiação solar (R_s) **aumentou até às 11h, tendo** decréscimo acentua-

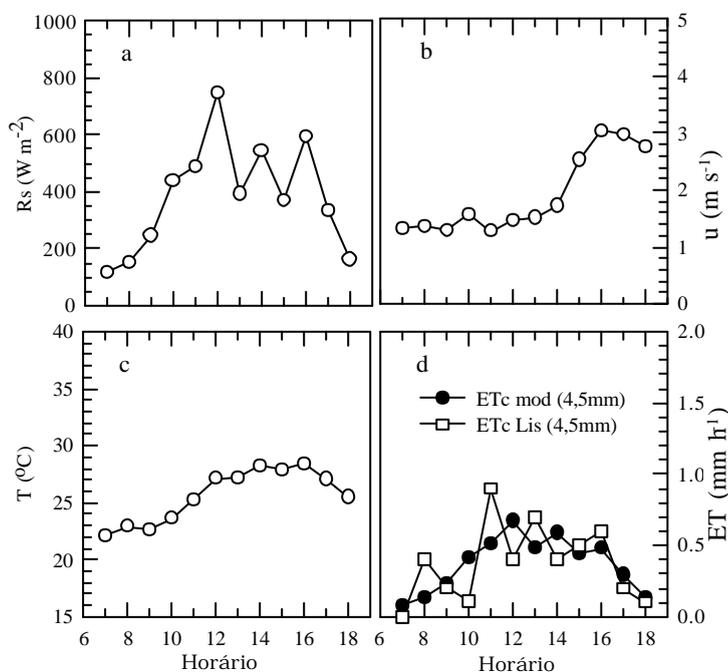


Figura 2 Radiação solar global (R_s) (a), velocidade do vento (u) (b), temperatura do ar (T) (c), evapotranspiração do milho medida em lisímetro (ETc Lis) e estimada pelo modelo (ETc mod) (d). Aos 48 dias após a emergência (23/12/96). EEA / UFRGS, Eldorado do Sul - RS.

do logo a seguir, devido a um aumento de nebulosidade, acompanhada de precipitação pluvial de 2mm, que ocorreu em torno das 13h. Como a cultura encontrava-se em condições de ótima disponibilidade de água no solo, pode-se dizer que a ET foi função apenas das condições meteorológicas. Também na Figura 3b observa-se aumento da velocidade do vento. Por volta das 11h, momento em que a radiação teve seu pico máximo, a ET estimada pelo modelo teve uma pequena defasagem em relação à medida pelo lisímetro. A ET estimada decresceu mais rapidamente do que a medida, provavelmente porque o modelo dá ênfase à interação planta - radiação solar, ficando portanto, sensível às variações do fluxo de energia radiante. A evapotranspiração total medida através do lisímetro foi de **8,1mm dia⁻¹** e a do modelo ficou em 7,1mm por dia.

O presente modelo de estimativa da evapotranspiração corrige a resistência aerodinâmica (r_a) através da velocidade do vento. Segundo SANTOS (1999), a r_a determinada a partir do perfil de vento, decresce conforme aumenta a velocidade do vento. Entretanto, considerando-se o dossel como uma folha grande ("big leaf") para a estimativa dos efeitos aerodinâmicos, dificilmente o modelo irá representar fielmente as condições das fontes de calor e vapor, pois estão situadas em diferentes locais.

A Figura 4 mostra resultados de dias com diferentes condições de demanda evaporativa atmosférica. As curvas de estimativa para as frações ensolarada e sombreada do dossel têm evoluções diferenciadas. Sob alta demanda atmosférica (Figuras 4a, 4c) nota-se uma contribuição significativa da fração sombreada sobre a estimativa da ET total. Sob baixa demanda as curvas são próximas (Figura 4b), devido à permanência de IAF sombreado por maior período, ao longo do dia, em condições de menor fluxo radiativo incidente.

Ao final da tarde a ET estimada para a parte sombreada tende a ultrapassar aquela estimada para a fração ensolarada (Figuras 4a, 4b e 4c), o que pode ser atribuído à prevalência do IAF sombreado sobre o ensolarado, quando a radiação incidente di-

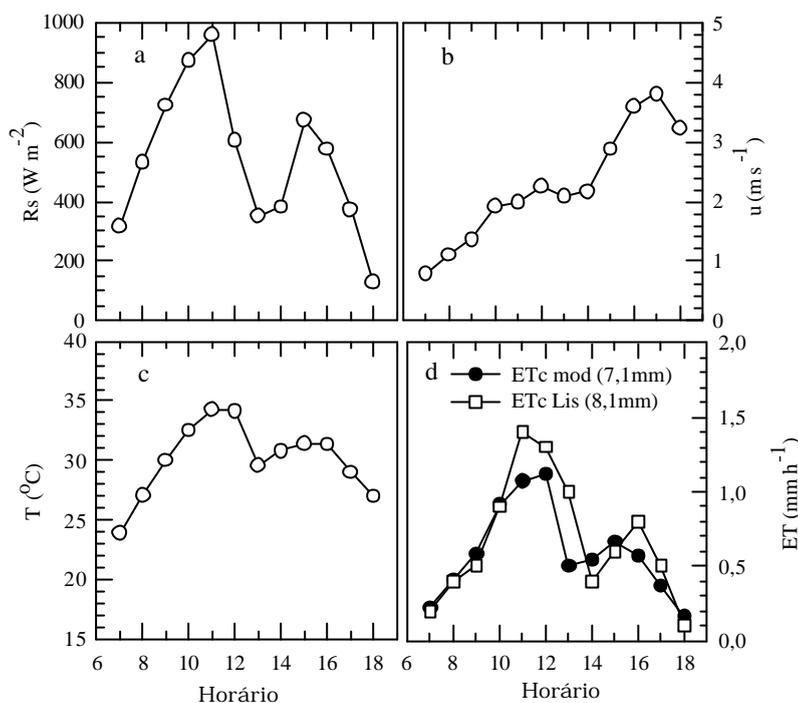


Figura 3 Radiação solar global (R_s) (a), velocidade do vento (u) (b), temperatura do ar (T) (c), evapotranspiração do milho medida em lisímetro (ETc Lis) e estimada pelo modelo (ETc mod) (d), aos 52 dias após a emergência (27/12/96). EEA / UFRGS, Eldorado do Sul - RS.

minui, mas ainda existindo energia para transpiração ao final do período diurno.

Conclusões

A evapotranspiração estimada pelo modelo de PENMAN-MONTEITH modificado apresenta concordância com dados de lisímetro somente quando a cultura está com IAF elevado, ou seja, cobrindo completamente o solo, em praticamente todas as condições meteorológicas. No início do ciclo, quando o IAF é pequeno, a estimativa realizada pelo modelo subestima a evapotranspiração.

Referências bibliográficas

BERGAMASCHI, H., GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da estação agrônômica da UFRGS**. Porto Alegre : Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS, 1990. 91 p.

BERGAMASCHI, H., ROSA, L.M.G., SANTOS, A.O. et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba, SP. Anais..., Piracicaba : Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ESALQ, 1997. p.222-224.

CAMPBELL, G.S. **An introduction to environmental biophysics**. New York : Springer Verlag, 1977. 159 p.

FRANÇA, S. **Modelagem do crescimento de milho em função da radiação solar e da temperatura do ar, com e sem irrigação**. Porto Alegre : UFRGS, 1997. 75 p. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

FUCHS, M., ASRAR, C., KANEMASU, E.T. et al. Leaf area estimates from measurements of photosynthetically active radiation in wheat canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 32, p. 12-22, 1984.

FUCHS, M., COHEN, Y., MORESHET, S. Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 8, p. 91-99, 1987.

GARRAT, J.R., HICKS, B.B. Momentum, heat and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, London, v. 99, p. 680-689, 1973.

GOUDRIAAN, J. **Crop Micrometeorology: a simulation study**. Wageningen : Wageningen Center for Agricultural Publishing and Documentation. 1977. 349 p.

GATES, D.M. **Biophysical ecology**. New York : Springer-Verlag, 609 p. 1980.

JONES, H.G. **Plants and microclimate: an approach to environmental plant physiology**. Cambridge : Cambridge University Press. 1992. 428 p.

LEMEUR, R. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, jerusalen +artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 229-247, 1973.

MATZENAUER, R., BERGAMASCHI, H., BERLATO, M.A. et al. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 85-92, 1995.

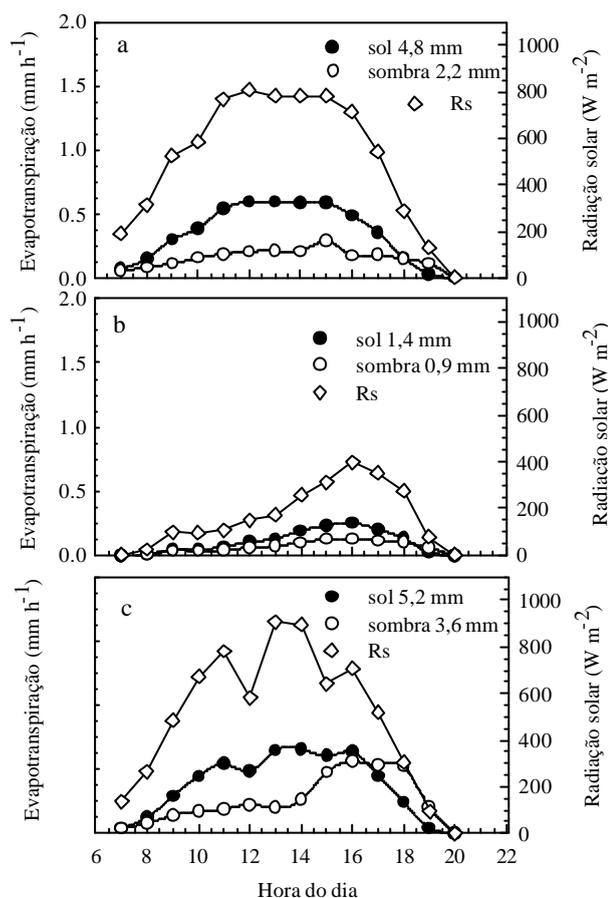


Figura 4 Evolução das curvas de evapotranspiração estimada para a parte ensolarada e sombreada de um dossel de milho [a- 72 dias após a emergência (DAE); b - 75 DAE; c - 76 DAE]. EEA/UFRGS, 1996/97. Eldorado do Sul/RS.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environmental. In: The state and movement of water in living organisms, **Atas and Abstrat...** Cambridge, v. 19, p. 205-234, 1965.

MONTEITH, J.L. **Principles of environmental physics.** London : Edward Arnold Publishers, 1975. 215 p.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society of London**, London, v. 193, p. 120-145, 1948.

PETERSEN, K.L, MORESHET, S., FUCHS, M. Stomatal response of field-grown cotton to radiation and soil moisture. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 1059-1065, 1991.

SANTOS, A.O. **Simulação da perda de água dos estratos ensolarado e sombreado de um dossel de milho, submetido a diferentes suprimentos hídricos.** Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 146 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

SANTOS, A.O., BERGAMASCHI, H., FUCHS, M. et al. Sunlit and shaded maize canopy water loss under varied water stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 261-267, 1999.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** Santa Maria, v. 4. n. 1. p. i-xii. 1996.

THOM, A.S. Momentum, Mass and Heat Exchange of Plant Communities. In: MONTEITH, J. L. (Ed.). **Vegetation and the Atmosphere.** London : Academic Press, 1975. v. 1, p. 57-109.

ZEIGER, E., FIELD, C. Photocontrol of the functional coupling between photosynthesis and stomatal conductance in the intact leaf. **Plant Physiology**, Rockville, v. 70, p. 370-375, 1982.