

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

BALANÇO DE ÁGUA POR AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS EM CULTURA DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.)⁽¹⁾

Celso Luiz Prevedello⁽²⁾, Selma Regina Maggiotto⁽³⁾, Jocely Maria Thomazoni Loyola⁽⁴⁾, Nelson Luís Dias⁽⁵⁾ & Golmar Beppler Neto⁽⁶⁾

RESUMO

Utilizando técnica de aquisição automática de dados atmosféricos e de teor de água do solo, este trabalho quantificou o consumo diário de água em cultura do trigo em Latossolo Vermelho do município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, durante o período de agosto a dezembro de 2003, procurando dar ênfase à contribuição das chuvas e dos fluxos ascendentes de água das camadas mais profundas do solo nesse consumo. Os resultados mostraram que no período monitorado: (a) a lâmina média diária de água evapotranspirada pela cultura do trigo foi de 6,75 mm, com o fluxo ascendente de água no perfil de solo contribuindo com 62 % desse total; (b) as taxas de evapotranspiração estimadas pelo método de Penman e pela equação do balanço hídrico (pedológico) se trasladaram no tempo com simetria aproximadamente igual, mas com defasagem aproximada de sete dias, como se o solo respondesse às variações impostas pela atmosfera cerca de uma semana depois; (c) as chuvas tiveram efeito importante no armazenamento de água no solo, contribuindo para elevação das taxas evapotranspirativas; e (d) pelo fato de o potencial mátrico médio na zona das raízes ter-se apresentado próximo do limite crítico para a cultura, concluiu-se que a irrigação poderia produzir impactos potencialmente positivos para a cultura, por disponibilizar mais água no solo e garantir níveis evapotranspirativos mais altos, como é agronomicamente desejável.

Termos de indexação: evapotranspiração, irrigação, balanço hídrico.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em julho de 2005 e aprovado em dezembro de 2006.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Rua dos Funcionários 1540, CEP 80035-050 Curitiba (PR). E-mail: clpreve@ufpr.br

⁽³⁾ Pesquisadora do Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental - UEMMA-UFPR/IAPAR/SIMEPAR. E-mail: selmarm@ufpr.br

⁽⁴⁾ Professora do Departamento de Construção Civil, UFPR. E-mail: joloyola@pr.gov.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Transportes, UFPR. E-mail: nldias@ufpr.br

⁽⁶⁾ Graduando em Agronomia, UFPR. E-mail: beppler@uol.com.br

SUMMARY: THE DAILY WATER CONSUMPTION OF A WHEAT CULTURE USING ATMOSPHERIC AND SOIL DATA

The daily water consumption of a wheat culture was quantified on an Oxisoil using atmospheric and soil data measured automatically on an experimental farm in Ponta Grossa, Paraná, Brazil. The measurement period was August through December 2003. The rain contribution to soil moisture and the vertical upward movement of water within the soil were particularly emphasized. Our results show that in the evaluated period (a) wheat evapotranspiration amounted to 6.75 mm a day, to which upward water flux contributed with 62 %; (b) soil water-budget evaporation lags behind Penman evapotranspiration estimates by about 7 days, as if the soil responded to atmospheric variations with a weekly delay; (c) as expected, rain significantly affected soil storage and usually raised evapotranspiration rates, and (d) given the fact that the mean matric potential in the root zone was near the critical value for wheat, the conclusion was drawn that irrigation would have potentially beneficial impacts on wheat in this region; more water would be available and higher levels of evapotranspiration warranted, which is desirable from the agricultural viewpoint.

Index terms: evapotranspiration, irrigation, soil water budget.

INTRODUÇÃO

Para apoiar o desenvolvimento sustentável e fornecer bases que possam amparar tomadas de decisões que visem maximizar sistemas de produção e minimizar os impactos das alterações do uso do solo nos sistemas hidrológicos, bem como nas mudanças climáticas globais, é fundamental conhecer o comportamento dos processos hídricos nos diferentes ecossistemas terrestres, tanto em ambientes naturais quanto naqueles sujeitos a impactos antrópicos.

A quantificação dos processos hídricos, de forma isolada ou integrada, pode auxiliar na avaliação de diferentes cenários de desenvolvimento em sistemas produtivos, porquanto as alterações antrópicas do solo pelo uso agrícola ou florestal alteram a cobertura vegetal e as propriedades hidráulicas dos solos, com prováveis impactos sobre o ciclo hidrológico, além do fato de que a degradação física do solo em áreas de uso intensivo pode resultar em riscos de erosão e contaminação por agrotóxicos e fertilizantes, com conseqüentes perdas na produtividade.

Muitos cientistas têm procurado desenvolver ou substabelecer modelos matemáticos e técnicas de simulação numéricas na tentativa de descrever e melhor compreender a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera (Blanford & Gay, 1992; Stannard et al., 1994, entre outros). Nesse contexto, as propriedades dos solos de armazenar e transmitir água têm-se mostrado fundamentais na descrição quantitativa dos processos envolvidos.

Diante disso, este trabalho, utilizando técnica de aquisição automática de dados atmosféricos e de teor de água do solo, teve como objetivo quantificar o consumo diário de água em cultura do trigo num Latossolo Vermelho do município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, procurando dar ênfase à contribuição das chuvas e dos fluxos ascendentes de água das camadas mais profundas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

As avaliações foram realizadas por aquisição automática de dados de grandezas atmosféricas e de teor de água em área de pesquisa da Embrapa-Ponta Grossa, Estado do Paraná, em solo classificado como Latossolo Vermelho textura média. Essa área vem sofrendo alternância de uso com soja, milho, trigo, entre outras culturas. O início da aquisição de dados com a unidade sensora de teores de água no solo ocorreu no dia 23 de agosto e se estendeu até 10 de dezembro, devido a avarias sofridas na unidade sensora alguns dias depois. Na data de 23 de agosto a cultura do trigo se encontrava aproximadamente com 30 dias após a emergência, e a sua colheita foi realizada no final do mês de novembro e início de dezembro.

Para coleta automática da precipitação e do conteúdo de água no solo (θ) foram utilizados, respectivamente, um pluviógrafo automático e uma sonda eletrônica vertical de uma torre especial de monitoramento contínuo de fluxos, pertencentes ao SIMEPAR/INPE (Figura 1).

Essa sonda possui 1 metro de comprimento e 28 mm de diâmetro e é dotada de sensores na forma de pares de anéis de aço inoxidável, inserida num tubo de acesso. A sonda está conectada a um "dataloger", cuja função é armazenar os dados de leitura de voltagem nas circunvizinhanças dos sensores (nas diversas profundidades) de forma contínua e em intervalos de 6 s. No final de 24 h, a média aritmética desses valores é armazenada em função do tempo. Os dados de saída de cada sensor são análogos a uma leitura de voltagem de bateria de corrente contínua e que facilmente é convertida em teor de água volumétrico do solo por meio de uma curva de calibração previamente fornecida pelo fabricante, ou de curva específica para o solo de



Figura 1. Vista da torre da estação especial que utiliza a estratégia de medição contínua de fluxos de superfície.

interesse. Quando uma fonte de energia é aplicada à sonda, ela gera um sinal de 100 MHz (similar ao de ondas de rádio FM). Esse sinal é aplicado aos pares de anéis de aço inoxidável nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60 e 1,00 m, gerando um campo eletromagnético que se estende a uma distância de aproximadamente 100 mm no solo (esse campo não encontra nenhuma restrição de passagem pelo tubo de acesso). A água e o ar no solo determinam as propriedades dielétricas do meio, que é uma resposta dos meios à polarização em campos eletromagnéticos. A água tem constante dielétrica de aproximadamente 81; as partículas minerais, cerca de 4; e o ar, de 1 (Wang, 1980). Se as propriedades dielétricas do solo são diferentes da emitida, alguns sinais refletem e uma parte deles combina-se com os sinais aplicados para formarem uma onda-padrão. A voltagem dessa onda-padrão é então quantificada, constituindo-se numa sensível forma de medição do teor de água no solo.

A equação de calibração sugerida pelo fabricante da sonda PR1 da Delta-T Devices Ltd, para solos minerais, é:

$$\theta = -0,086 + 0,505 V + 7,81 V^2 - 32,46 V^3 + 47,96 V^4 \quad (1)$$

em que θ é o teor de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e V é a voltagem.

Experiências anteriores (Embrapa, 1996; Prevedello, 2003) têm evidenciado que as curvas de calibração de sensores de reflectometria no domínio do tempo não ficam isentas de discussão quando se pretende universalizá-las. Isso é particularmente verdadeiro em solos tropicais, onde os teores de Fe no solo influenciam as constantes dielétricas desses meios. Tem-se observado, entretanto, que as curvas de calibração específicas (reais) apresentam-se de modo geral paralelas às fornecidas pelos fabricantes

(Prevedello, 2003), o que tem simplificado sua correção a partir de medida experimental da umidade *in situ* e respectivo valor de leitura no instrumento. A diferença entre os valores do teor de água esperado e medido representa, assim, o coeficiente linear que deve ser adicionado à equação original para se obter a específica (real). A figura 2 mostra o resultado dessas medidas para as seis profundidades consideradas neste experimento.

Para a profundidade de 0,20 m, por exemplo, os valores medidos de voltagem e teor de água foram, respectivamente, de 0,255 V e $0,294 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Pela curva de calibração do fabricante, o valor de umidade deveria ser de $0,215176 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, restando uma diferença de $0,078824 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, que deverá ser adicionada à equação de fábrica para ajustar-se à situação real. Com isso, a equação específica de conversão de voltagem para teor de água, nessa profundidade, fica:

$$\theta_{0,20 \text{ m}} = -0,007176 + 0,505 V + 7,81 V^2 - 32,46 V^3 + 47,96 V^4 \quad (2)$$

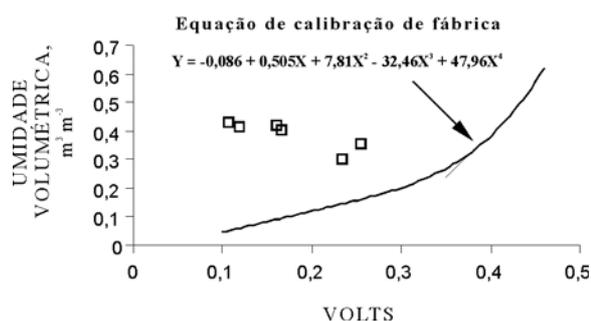


Figura 2. Curva de calibração fornecida pelo fabricante da sonda sensora de umidade e respectivos pontos de medida para definição dos coeficientes lineares das equações de calibração específicas por profundidade. Os pontos, da esquerda para a direita, referem-se aos valores medidos nas profundidades de 0,60; 0,40; 1,00; 0,30; 0,10 e 0,20 m.

Parametrização das funções hidráulicas do solo

As funções hidráulicas de meios porosos que expressam as dependências entre a condutividade hidráulica considerando o teor de água, $K(\theta)$, e a do teor de água considerando o potencial mátrico, $\theta(\psi)$, podem ser avaliadas por métodos indiretos, segundo diferentes métodos (Prevedello, 1996). Nesse aspecto, uma das mais conhecidas e aceitas é a de Mualem (1976). Para isso, a curva experimental da retenção de água no solo necessita ser descrita matematicamente. O modelo proposto por van Genuchten (1980) para expressar analiticamente a curva de retenção tem-se mostrado bastante eficiente e seu uso já é bastante difundido (van Genuchten et al., 1991). A equação proposta por van Genuchten (1980) é:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left\{1 + [\alpha \cdot |\psi|^n]\right\}^m} \quad (3)$$

onde θ é o teor de água volumétrico (variável dependente); ψ , o potencial mátrico da água no solo (variável independente); θ_s , o teor de água de saturação; θ_r , o teor de água residual, e α , n , m (sendo $m = 1 - 1/n$) são parâmetros independentes (de ajuste). Esses parâmetros normalmente são avaliados mediante técnica de regressão não-linear, como sugerida por Boratto (1984), por exemplo.

Os parâmetros de ajuste θ_s , θ_r , e m , juntamente com os valores experimentais de K_s , foram então substituídos na seguinte equação para expressar a dependência da condutividade hidráulica considerando o teor de água volumétrico, $K(\theta)$, segundo van Genuchten (1980):

$$K(\theta) = K_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left\{ 1 - \left[1 - \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

Para conhecer todos os parâmetros de cálculo do balanço hídrico, no que se refere aos fluxos e armazenamentos de água dentro do solo, é necessário dispor da curva de retenção de água para a conversão dos valores de teor de água em potencial mátrico. Para obtenção dessa curva, optou-se por um procedimento de pedotransferência, utilizando-se o método SPLINTEX (Prevedello & Loyola, 2002), que estima os parâmetros hidráulicos do solo a partir da geometria e composição granulométrica. Além disso, como não se verificou nesse solo nenhum gradiente textural importante entre as profundidades monitoradas pela sonda de umidade, adotou-se a opção de uma única curva de retenção para representar todas as profundidades. Essa curva é mostrada na figura 3, juntamente com alguns pontos experimentais. Os pontos em retângulo referem-se aos valores de teor de água correspondentes ao potencial mátrico de -1.642,5 kPa (com amostras deformadas), e cada ponto representa uma das seis profundidades amostradas (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60 e 1,0 m). Os dois pontos em losango referem-se ao potencial mátrico de -10,2 kPa, obtidos com amostras não-deformadas da profundidade de 0,10 m. Como se observa, a curva teórica se ajustou bem aos pontos experimentais, sugerindo boa aproximação, pelo menos para propósitos práticos. Os parâmetros de ajuste fornecidos pelo método SPLINTEX e que definem analiticamente a curva de retenção estão apresentados na equação a seguir:

$$\theta = 0,0808 + \frac{(0,5754 - 0,0808)}{\left\{1 + [0,0025 \cdot |\psi|^{1,2785}]\right\}^{0,2179}} \quad (5)$$

sendo θ em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e ψ em cmH_2O .

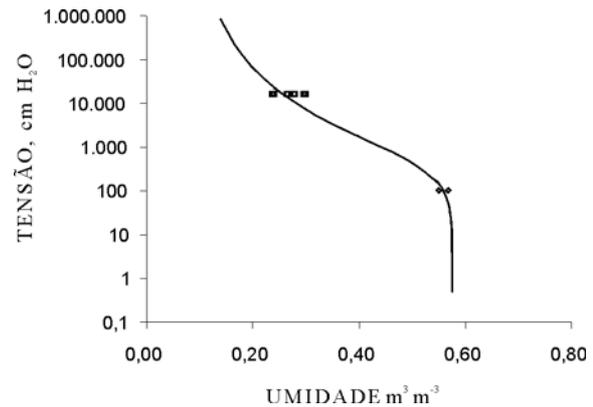


Figura 3. Curva de retenção de água no solo obtida mediante pedotransferência (método SPLINTEX, segundo Prevedello & Loyola, 2002). Os pontos retangulares foram obtidos para o potencial mátrico de -1.642,5 kPa em cada profundidade monitorada pela sonda de umidade, e os pontos em losango, para o potencial mátrico de -10,2 kPa, com amostras não-deformadas, da profundidade de 0,10 m.

Com isso, a relação funcional entre a condutividade hidráulica e a umidade, na forma da equação (4), é:

$$K(\theta) = 15,94 \sqrt{\frac{\theta - 0,0808}{0,5754 - 0,0808}} \left\{ 1 - \left[1 - \left[\frac{\theta - 0,0808}{0,5754 - 0,0808} \right]^{\frac{1}{0,2179}} \right]^{0,2179} \right\}^2 \quad (6)$$

em que o valor 15,94 (mm h^{-1}) refere-se à condutividade hidráulica na profundidade de 0,60 m; o valor 0,2179, ao expoente m do modelo de van Genuchten (1980); e os valores 0,5754 e 0,0808 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, aos valores de teor de água no solo saturado e residual, respectivamente.

Balanço hídrico

O balanço hídrico num ambiente vegetado é a contabilização das entradas e saídas de água num dado volume de solo, durante certo período de tempo. O volume de solo considerado depende da vegetação em estudo, pois ele deve englobar seu sistema radicular. Assim, considera-se como limite superior desse volume a superfície do solo e como limite inferior a profundidade do sistema radicular da vegetação de interesse.

A equação do balanço, na sua forma mais simples, é:

$$ET = P + I \pm D - R - \Delta A \quad (7)$$

Na equação (7), D representa a lâmina de drenagem profunda ($D = \int_{z_1}^{z_2} q dt$), isto é, a perda de água para fora da zona radicular através do limite inferior

do volume de solo considerado no balanço. Algumas vezes, entretanto, dependendo das condições, ao invés de sair, a água pode entrar através desse limite, ocorrendo daí uma drenagem positiva (+D).

Neste trabalho, a evapotranspiração ET foi quantitativamente avaliada por meio da equação (7). A precipitação P foi medida por pluviômetro eletrônico; o termo I foi desprezado, por não ter ocorrido irrigação; o termo ΔA foi avaliado a partir dos perfis de teor de água obtidos diariamente por meio de leituras da sonda eletrônica de teor de água em cada uma das seis profundidades, até 1,0 m; e a drenagem D foi quantificada a partir da equação de Buckingham-Darcy, ou seja:

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (8)$$

em que q é a densidade de fluxo na profundidade-limite estabelecida para o balanço; $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica considerando o teor de água no solo, avaliada pela equação (6); e $\Delta h/\Delta z$, o gradiente de potencial total da água no solo, o qual foi avaliado por meio da conversão dos valores de teor de água obtidos pela sonda de umidade nas posições imediatamente acima e abaixo da profundidade-limite do balanço, em valores de potencial total da água no solo, obedecendo à seguinte equação:

$$h = \psi + z \quad (9)$$

sendo ψ o potencial mátrico (considerando o teor de água no solo) e z o potencial gravitacional. A conversão dos valores de teor de água para ψ foi feita analiticamente por meio da equação (5).

A componente *runoff* R da equação (7) toma importância toda vez que a intensidade de precipitação ultrapassa a capacidade de infiltração da água no solo. Por isso, ela pode ser indiretamente estimada pela diferença da lâmina de chuva precipitada pela lâmina de água infiltrada no solo. A capacidade de infiltração foi estimada por modelagem numérica (Prevedello, 1996), a partir das propriedades hidráulicas de cada uma das camadas de solo dentro da profundidade estabelecida para o balanço, propriedades essas estimadas por função de pedotransferência, a partir das curvas granulométricas de cada camada de solo, segundo Prevedello & Loyola (2002). O teor de água de cada camada de solo antecedente a cada chuva foi obtido a partir das leituras da unidade sensora de umidade. O intervalo de tempo estabelecido para a estimativa da componente R durante os eventos de chuva foi de 10 min, isto é, o mesmo utilizado na aquisição de dados do pluviômetro. A equação utilizada foi:

$$R = \int_{t_1}^{t_2} r dt = \int_{t_1}^{t_2} p dt - \int_{t_1}^{t_2} inf dt \quad (10)$$

em que inf é a taxa de infiltração instantânea da água no solo (mm h^{-1}).

A evapotranspiração foi quantificada, diariamente, durante o período de 23 de agosto (início da aquisição de dados) a 10 de dezembro de 2003 (cerca de uma semana antes da avaria sofrida na sonda sensora de umidade no campo).

Os valores de voltagem registrados no *datalogger* foram todos convertidos em teores volumétricos de água pela equação de calibração da unidade sensora, corrigida para levar em conta os coeficientes lineares específicos de cada profundidade, tal como se procedeu na obtenção da equação (2) para $z = 0,20$ m. Com isso, todos os valores médios de teor de água diários foram respectivamente convertidos em unidades de potencial mátrico, com auxílio da equação (5), e posteriormente em potencial total, por meio da equação (9).

Os valores de potencial total nas profundidades de 0,40 e 1,0 m foram utilizados para gerar os gradientes de potencial hidráulico na profundidade de 0,60 m, e as densidades diárias de fluxo nessa profundidade foram obtidas multiplicando-se esses gradientes pelos respectivos valores de condutividade hidráulica, que por sua vez foram estimados utilizando-se a equação (6) para valores específicos de teores médios diários de água no solo.

A lâmina de drenagem interna na profundidade de 0,60 m foi obtida pela equação $D = \int_{t_1}^{t_2} q dt$, sendo q a densidade de fluxo e t o tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor total de chuvas ocorridas no período de 23 de agosto a 10 de dezembro de 2003 foi de 510 mm, significando uma contribuição média de 4,7 mm d^{-1} , o que pode ser considerado satisfatório para as necessidades da cultura, a julgar pelo valor da demanda ideal de água usualmente adotada pelos técnicos irrigantes da região, que é de 5,0 mm d^{-1} .

Os valores médios de potencial mátrico verificados durante agosto e dezembro nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60 e 1,0 m foram, respectivamente, de -106; -170; -118; -223; -223 e -67 kPa.

Na figura 4 são apresentados os resultados da evapotranspiração (equação 7), das chuvas e de drenagem ascendente, desde 23 de agosto até 10 de dezembro de 2003. Nota-se que o fluxo ascendente de água teve contribuição apreciável na evapotranspiração durante todo o período. A evapotranspiração média de todo o período foi de 6,75 mm d^{-1} , e a taxa diária média de fluxo ascendente no perfil de solo em $z = 0,60$ m, de 4,18 mm d^{-1} , o que equivale a dizer que a ascensão de água no perfil de solo contribuiu com quase 62 % da água evapotranspirada.

A evapotranspiração da cultura (ETc) é uma das variáveis mais importantes em projetos e manejo de

água na agricultura irrigada, pois ela determina a quantidade de água a ser repostada, de forma a manter a produtividade em níveis ótimos. Por ser a ET_c função da evapotranspiração de referência (ET_o), a determinação desta passa a ser fundamental em projetos, no planejamento e no manejo de irrigação.

A partir de registros atmosféricos monitorados pela torre especial de medição contínua de fluxos do SIMEPAR/INPE, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pela equação de Penman (Figura 5), juntamente com os valores da evapotranspiração atual (ET_c). Esses valores foram estimados a partir de 26 de setembro de 2003, porque foi a partir desta data que todos os sensores das grandezas atmosféricas encontravam-se operantes.

Observa-se que, com poucas exceções, a ET_o manteve-se em níveis mais elevados do que a ET_c , sem haver, contudo, coincidência na ocorrência dos picos. A maior ET estimada pela equação de Penman (ET_o) ocorreu no dia 12 de novembro (17 mm d^{-1}). Entre os fatores que podem ter contribuído para essa taxa citam-se a velocidade do vento, que se apresentou relativamente alta ($> 7 \text{ m s}^{-1}$), a alta temperatura do ar ($> 25 \text{ }^\circ\text{C}$) e a umidade relativa inferior a 60 %.

O maior valor da ET_c , por outro lado, estimada pela equação (7), alcançou $14,7 \text{ mm d}^{-1}$, mesmo assim, seis dias depois, isto é, no dia 18 de novembro. De fato, a ET_o estimada pela equação de Penman tem como referência a grama-batatais em fase de crescimento ativo e sem restrição de água no solo. Por isso, a ET_o normalmente resulta superior aos valores de ET_c . A ET_o relaciona-se com a ET_c por meio do coeficiente de cultura, K_c , ou seja, $ET_c = K_c \cdot ET_o$. O coeficiente K_c , por sua vez, depende de uma série de fatores, como espécie vegetal, época de plantio, estádios de desenvolvimento, preparo do solo, condições climáticas, etc.

Prevedello (1987) sugeriu os seguintes coeficientes de cultura para o trigo no Estado do Paraná: 0,48, na fase da sementeira e crescimento do trigo; 0,87, na

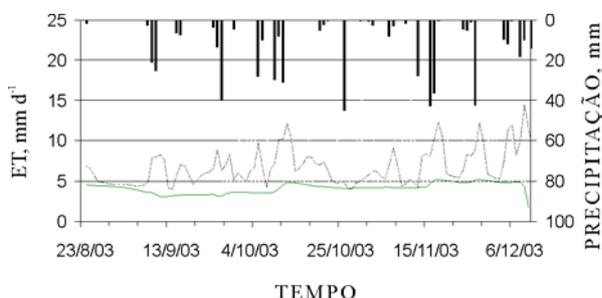


Figura 4. Evapotranspiração atual da cultura do trigo estimada pela equação (7) (linha tracejada), fluxo ascendente de água no solo (linha cheia) e chuvas (barras) entre agosto e dezembro de 2003 sobre Latossolo Vermelho textura média, na Estação Experimental da Embrapa.

fase de crescimento que antecede o espigamento; 1,0, na fase do espigamento (15 dias antes e 15 depois); 0,76, na fase da maturação e colheita; e 0,25, na fase do final da colheita ao preparo do solo para a soja. A média desses valores resulta no valor aproximado de 0,67. Na figura 6 são apresentados os valores estimados de evapotranspiração pela equação (7) e pela equação de Penman corrigida pelo coeficiente $K_c = 0,67$. Apesar de as duas estimativas apresentarem praticamente a mesma amplitude de variação, não há, de modo geral, coincidência nos picos de evapotranspiração pelos dois métodos, como se os dois perfis se transladassem no tempo governados por mecanismos independentes.

De fato, não parece necessário que os padrões comportamentais dos perfis evapotranspirativos pelos dois métodos devam ser coincidentes no tempo, porque, embora a evapotranspiração seja predominantemente governada por fatores meteorológicos (Denmead &

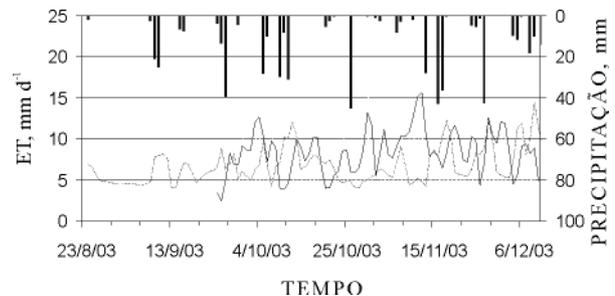


Figura 5. Evapotranspiração atual (ET_c) da cultura do trigo (linha tracejada), obtida a partir da equação (7), chuvas (barras) e evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pela equação de Penman (linha cheia) entre agosto e dezembro de 2003, sobre Latossolo Vermelho textura média, na Estação Experimental da Embrapa.

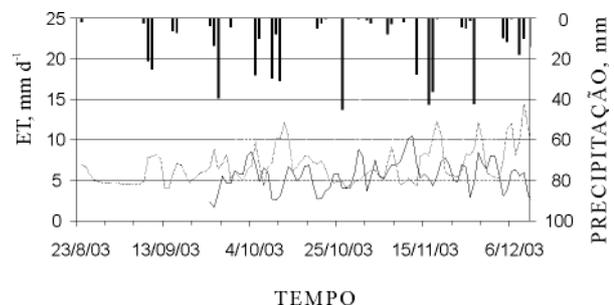


Figura 6. Evapotranspiração atual (ET_c) da cultura do trigo estimada pela equação (7) (linha tracejada), chuvas ocorridas (barras) e evapotranspiração atual estimada pela equação de Penman, com coeficiente de cultura médio de 0,67 (linha cheia), entre agosto e dezembro de 2003, sobre Latossolo Vermelho textura média, na Estação Experimental da Embrapa.

Shaw, 1962), as variações impostas na atmosfera não têm efeito de resposta imediata nos processos dinâmicos da água dentro do solo ou da planta. Isso, de certa forma, está confirmado na figura 7. Esta figura repete os resultados apresentados na figura 6, mas avançando em sete dias os valores da evapotranspiração estimados pelo método de Penman. Como se observa, há agora maior concordância na forma entre os dois perfis, como se o solo estivesse respondendo às variações impostas pela atmosfera cerca de uma semana depois.

Na figura 8 são apresentados valores de chuva e armazenamento de água no solo desde a superfície até 0,60 m de profundidade, entre agosto e dezembro de 2003. Nesse período, o solo armazenou, em média, aproximadamente 250 mm de água. O menor

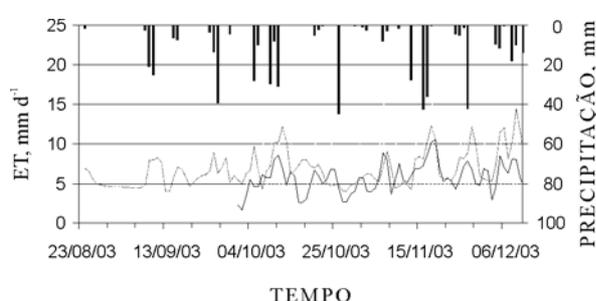


Figura 7. Evapotranspiração atual (ET_c) da cultura do trigo estimada pela equação (7) (linha tracejada), chuvas ocorridas (barras) e evapotranspiração atual estimada pela equação de Penman, com coeficiente de cultura médio de 0,67 (linha cheia), sendo este último perfil avançado, com relação à figura 6, em sete dias, visando identificar semelhanças nos padrões de comportamento entre os dois métodos de estimativas. O período monitorado foi de agosto a dezembro de 2003, sobre Latossolo Vermelho textura média, na Estação Experimental da Embrapa.

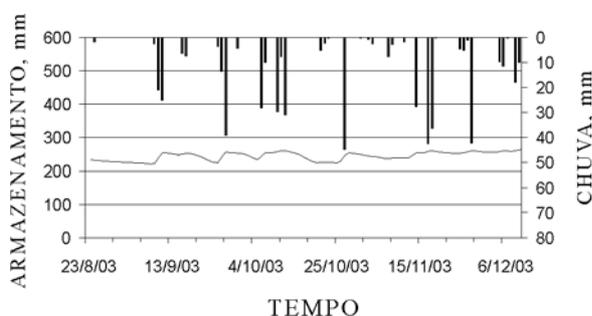


Figura 8. Armazenamento de água na profundidade de 0,60 m (linha) e chuvas ocorridas (barras) entre agosto e dezembro de 2003 sobre Latossolo Vermelho textura média, na Estação Experimental da Embrapa.

armazenamento (cerca de 220 mm) ocorreu em 8/9/2003, em decorrência de uma estiagem de 16 dias, e o maior armazenamento (cerca de 275 mm) se deu em 14/12/2003, após quase uma semana seguida de chuvas, em que o total precipitado ultrapassou 100 mm.

As taxas mais elevadas de evapotranspiração, isto é, acima de 10 mm d^{-1} , sempre estiveram associadas à ocorrência de chuvas, ou seja, com o aumento no armazenamento de água no solo (Figura 7). De fato, a demanda ideal de água por uma cultura (evapotranspiração máxima) é relativa a um intervalo de teor de água no solo dentro do qual as plantas não têm restrição de água ($ET_{\text{atual}} = ET_{\text{máxima}}$). Do ponto de vista agrônomo, é desejável que as plantas se desenvolvam dentro desse intervalo de teor de água, porque é nessa condição que a evapotranspiração é maximizada, o que assegura o máximo de abertura dos estômatos, garantindo maior assimilação de CO_2 e, com isso, maior produção fotossintética.

As maiores concentrações de chuva tiveram efeito importante no aumento do armazenamento de água no solo (Figura 8) e, por conseguinte, nas maiores quantidades de água evapotranspirada (Figura 7). Disso depreende-se que, embora o fluxo ascendente de água no perfil de solo tenha contribuído com 62 % na quantidade de água evapotranspirada, as maiores taxas estiveram condicionadas à contribuição das chuvas.

Outro fato importante a ser observado é o valor da sucção mátrica média entre agosto e dezembro de 2003, até 0,60 m de profundidade, que resultou no valor de -168 kPa. Esse valor apresenta-se praticamente no limite superior do potencial de sucção de água no solo para o qual a irrigação é recomendada para a máxima produtividade do trigo, que, segundo Millar (1984), varia entre -83 e -155 kPa. Isso, de um lado, sugere que a cultura do trigo esteve relativamente bem suprida de água durante o período. Contudo, a julgar pelo impacto que as chuvas tiveram no aumento das taxas evapotranspirativas, é de se admitir que a adoção da irrigação seria uma recomendação tecnicamente favorável ao melhor rendimento da cultura, em razão do aumento na disponibilidade de água no solo e da garantia de níveis evapotranspirativos frequentemente mais altos, tal como é agronomicamente desejável.

CONCLUSÕES

1. No período monitorado (agosto e dezembro de 2003), a lâmina média diária de água evapotranspirada pela cultura do trigo foi de 6,75 mm, e o fluxo ascendente de água no perfil de solo contribuiu com 62 % desse total.

2. As taxas de evapotranspiração estimadas com a utilização do método de Penman e pela equação (7) se transladaram no tempo com simetria aproximadamente

igual, mas com defasagem aproximada de sete dias, como se o solo respondesse às variações impostas pela atmosfera cerca de uma semana depois.

3. As chuvas tiveram efeito importante no armazenamento de água no solo, contribuindo para a elevação das taxas evapotranspirativas.

4. Pelo fato de o potencial mátrico médio na zona das raízes ter-se apresentado próximo do limite crítico para a cultura do trigo, a adoção da irrigação como forma de aumentar a disponibilidade de água no solo e garantir níveis evapotranspirativos mais altos para a cultura é agronomicamente recomendável.

LITERATURA CITADA

- BLANFORD, J.H. & GAY, L.W. Tests of a robust eddy correlation system for sensible heat flux. *Theor. Appl. Climatol.*, 46:53-60, 1992.
- BORATO, F. BASIC para engenheiros e cientistas. 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1984. 120p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Instrumentação Agropecuária. São Carlos, 1996. 291p.
- DENMEAD, O.T. & SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.*, 54: 385-390, 1962.
- MILLAR, A.A. Manejo racional da irrigação: Uso de informações básicas sobre diferentes cultivos. Brasília, IICA, 1984. 57p.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.*, 12:513-522, 1976.
- PREVEDELLO, C.L. Indicação das culturas mais favoráveis e suas aplicações com a adequação climática. In: Alternativas para assentamento de agricultores e de incremento do uso do solo paranaense. Curitiba, Federação da Agricultura do Estado do Paraná, 1987.140p.
- PREVEDELLO, C.L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba, Salesward-Discovery, 1996. 446 p.
- PREVEDELLO, C.L. & LOYOLA, J.M.T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABMS, 2002. p.467-472.
- PREVEDELLO, C.L. Calibração de TDR em ambientes tropicais. Curitiba, 2003. 13p. (Ciclo de Palestras Internas do SIMEPAR)
- STANNARD, D.I.; BLANFORD, J.H.; KUSTAS, W.P.; NICHOLS, W.D.; AMER, S.A.; SCHMUGGE, T.J. & WELTZ, M.A. Interpretation of surfaces flux measurements in heterogeneous terrain during the Monsoon'90 experiment. *Water Res. Res.*, 30:1227-1239, 1994.
- van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- van GENUCHTEN, M.Th.; LEIJ, F.J. & YATES, S.R. The RETEC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. LOCAL, ADA, US Environmental Protection Agency, 1991. Não paginado.
- WANG, J.R. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies. *Radio Sci.*, 15: 977-985, 1980.