

Agrometeorologia e otimização do uso da água na irrigação

Reinaldo Lúcio Gomide¹
Paulo Emílio Pereira de Albuquerque²

Resumo - Como medir, avaliar e utilizar os principais parâmetros agrometeorológicos de superfície e também alguns relacionados com o contínuo solo-planta, que afetam a demanda hídrica das culturas. Para tanto, torna-se necessário o uso de plataformas automáticas de coleta de dados, de sensores, de alguns métodos para determinar a evapotranspiração de culturas (ETc) e de uma planilha eletrônica, que envolve a técnica do balanço da água no solo. Busca-se estabelecer e definir estratégias de manejo adequado de irrigação de algumas culturas anuais, ou seja, o momento correto de aplicar a água na quantidade necessária à cultura, em cada aplicação, visando à otimização do seu uso aos sistemas agrícolas, principalmente os irrigados. A nova proposta de cálculos diários de ETo, com base na equação combinada de Penman-Monteith, é mais eficiente e precisa na determinação da ETc com o uso de coeficientes de culturas (Kc) apropriados.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Plataforma automática. Coleta de dados climáticos. Balanço de energia. Razão de Bowen. Planilha eletrônica. Balanço hídrico. Produtividade de água.

INTRODUÇÃO

A influência das condições meteorológicas e climáticas sobre a produção agrícola é tratada por um dos ramos da meteorologia denominado Agrometeorologia, que enfatiza, principalmente, os parâmetros agroclimáticos de superfície. Alguns destes diretamente responsáveis pela força de demanda hídrica da atmosfera, que são importantes na determinação da necessidade hídrica ou requerimento de água ou evapotranspiração de culturas (ETc). O crescimento, o desenvolvimento e a produção das culturas são afetados pela taxa de ETc, que, por sua vez, está relacionada com a água, recurso natural que está-se tornando cada vez mais es-

casso, demandando estudos criteriosos voltados para a sua produtividade e uso mais eficiente.

Do total de água usada no mundo, cerca de 70% destinam-se à agricultura irrigada, valor esse bem superior às quantidades demandadas por outros segmentos, tais como os setores industrial (21%) e urbano (9%) (CHRISTOFIDIS, 2002). Essa demanda refere-se a, aproximadamente, 18% (275 milhões de hectares) da área total cultivada no planeta (1,5 bilhão de hectares) (SANTOS, 1998). Somente na América Latina, as áreas irrigadas totalizam cerca de 16 milhões de hectares, distribuídas principalmente no México, Argentina, Brasil, Chile e Peru. Apesar de corresponder a uma pequena parcela

do total cultivado, a área irrigada mundial contribui com 42% da produção total.

No Brasil, a área irrigada corresponde a cerca de 18% da área total cultivada, contribuindo com 42% da produção total (CHRISTOFIDIS, 2002). Em 2000, a água utilizada na produção agrícola correspondeu a um consumo médio específico de 9.436 m³/ha/ano. É importante destacar que, com a incorporação de tecnologias e processos mais eficientes de gestão do uso e manejo da água, esse consumo deverá ser reduzido ao longo dos anos, sendo que para 2025 é estimada uma queda para 8.100 m³/ha/ano. Mesmo assim, em 2025, estima-se que três bilhões de pessoas serão afetadas pela escassez de água, cuja disponibilidade deverá ser inferior a

¹Eng^o Agr^o, Pós-Doc, Pesq. Embrapa Milho e Sorgo, Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas-MG. Correio eletrônico: gomide@cnpms.embrapa.br

²Eng^o Agrícola, D.Sc., Pesq. Embrapa Milho e Sorgo, Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas-MG. Correio eletrônico: emilio@cnpms.embrapa.br

1.700 m³/ha/ano, devido, principalmente, ao aumento populacional (CHRISTOFIDIS, 2002).

Esse cenário indica que há uma tendência natural de aumento do uso da água no futuro próximo, devido tanto ao aumento populacional, o que vai demandar em maior necessidade por alimentos, como ao aumento de disponibilidade de áreas irrigadas. O grande problema é que não há uma previsão de aumento da água a curto e médio prazo na terra. Os dados indicam o contrário, os intermináveis desmatamentos e o uso inadequado do solo têm mantido um elevado escoamento superficial com uma baixa reposição contínua das fontes hídricas superficiais e subterrâneas. Assim, em termos ambientais, é crucial que seja assegurada uma sustentabilidade para a agricultura irrigada por intermédio de uma gestão e um manejo eficiente no uso da água.

Infelizmente, ainda no Brasil, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo eficiente (racional) da água na irrigação. Como os sistemas agrícolas irrigados têm uma utilização mais intensiva das áreas, com dois ou mais cultivos por ano, aumenta o risco de danos ambientais e de problemas na cultura, tais como, incidência de pragas, doenças e plantas daninhas, desnutrição de plantas, etc. A aplicação da água de irrigação em excesso pode levar à poluição de rios, lagos e lençol freático, por causa da lixiviação de elementos tóxicos e nutrientes. Por outro lado, a aplicação dessa água em quantidade insuficiente pode resultar em estresse hídrico da cultura e afetar o crescimento normal das plantas. Tudo isto pode comprometer todo o sistema de produção agrícola e o meio ambiente.

Os sistemas agrícolas irrigados têm como objetivo prevenir o estresse hídrico das plantas por meio de aplicações de quantidades adequadas de água às culturas, assegurando boas produções, tanto em quantidade como em qualidade, onde o contínuo solo-água-planta-atmosfera deve ser considerado como um sistema dinâmico, fisicamente integrado, em que

os processos de transporte ocorrem interativamente. Neste contínuo, os parâmetros climáticos de superfície determinam a força de demanda hídrica, atuando como “dreno”, os de solo controlam a fonte de água e os ligados à planta exercem influência direta sobre a transmissão de água da fonte para o dreno. Daí, torna-se evidente que para determinar a ETc, há necessidade de um sistema de monitoramento e registro, com base em medições, em tempo real, de parâmetros ligados ao contínuo solo-planta-atmosfera. Com a determinação da ETc, é possível estabelecer critérios e estratégias de manejo adequado de irrigação, visando otimizar a utilização da água e da energia na agricultura irrigada.

A quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação e o momento de aplicação dessa água são parâmetros governados pelas condições climáticas locais, pelo tipo de cultura e seu estágio de crescimento e desenvolvimento, pela profundidade efetiva do sistema radicular e pela umidade do solo. Suprir a ETc, com a aplicação de água de irrigação, faz-se necessário sempre que a água proveniente da precipitação efetiva não for suficiente para atender à demanda hídrica das plantas e a disponibilidade de água do solo for esgotada em níveis que irão provocar redução significativa de produtividade.

As redes de estações agrometeorológicas, principalmente aquelas com monitoramento e registro automático de parâmetros agroclimáticos de superfície, são ainda incipientes nas diferentes regiões do Brasil. Isto, em parte, dificulta a racionalização de uso da água na irrigação. Este quadro pode ser revertido com o uso de plataformas automáticas de coleta de dados climáticos de superfície, envolvendo técnicas de microprocessamento, emprego da microeletrônica e utilização de sensores para registrar os principais parâmetros climáticos, possibilitando o controle, a aquisição, a transferência e o armazenamento de dados digitais envolvidos nas medições em condições de campo.

O mais atrativo é que a automação é uma ferramenta de tomada de decisão da programação das irrigações, uma vez que

os sensores facilitam a aquisição de dados e os *dataloggers* o processamento automático desses dados, por meio de uso de microcomputadores portáteis e de *softwares*, desenvolvidos para o gerenciamento e controle de todo o processo. Aliado a isso, a utilização da técnica de balanço da água no solo, a partir de dados agroclimáticos diários, disponibilizada e programada em planilha eletrônica (Microsoft Office Excel), para fazer o manejo de irrigação de culturas anuais, pode contribuir na racionalização do uso da água de sistemas agrícolas irrigados. Tudo isso possibilita o controle mais preciso de aplicação de quantidades reais de água para as plantas e uma maior eficiência de seu uso, o que assegura a sustentabilidade da agricultura irrigada e a preservação do meio ambiente.

Este trabalho tem como objetivos medir e avaliar os principais parâmetros agrometeorológicos de superfície, os quais afetam a demanda hídrica das culturas. Para tanto, serão utilizados sensores e métodos para determinar a ETc e o momento correto de aplicar a água de irrigação e a quantidade necessária em cada irrigação, com base em medições de variáveis relacionadas com o contínuo solo-planta-atmosfera. Assim, é fundamental o uso de tecnologia da automação e de uma planilha eletrônica para adequar o manejo de irrigação de algumas culturas anuais, envolvendo a técnica do balanço da água no solo, a partir de dados agroclimáticos diários de entrada, para a otimização do uso da água na irrigação.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DAS CULTURAS E EFEITO DOS PRINCIPAIS FATORES AGROMETEOROLÓGICOS

A ETc é responsável pela taxa de transferência de água, na forma de vapor, de uma superfície coberta com vegetação para a atmosfera, considerando tanto a evaporação direta das superfícies do solo e das plantas (água de intercepção), como a transpiração das plantas. A taxa de evaporação direta da água do solo depende de sua estrutura e textura (tipo de solo), conteúdo de umidade, condutividade hidráulica e demanda evaporativa da atmosfera.

A taxa de ETc é um processo físico difusivo, que envolve uma parte turbulenta e outra molecular. A parte turbulenta é o mecanismo dominante, que depende da taxa de variação da velocidade do vento com a altura, exceto na fina camada próxima à superfície evaporante. É importante salientar que a evaporação é proporcional ao déficit de saturação da pressão de vapor do ar, quando a temperatura da superfície evaporante é igual à temperatura do ar. Caso contrário (mais comum na prática, uma vez que é predominante a falta dessa igualdade), a evaporação será proporcional ao gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar da atmosfera logo acima do dossel (cerca de 1,5 m). Contudo, é impossível uma interpretação estritamente física do processo de ETc, sem o necessário envolvimento e padronização do tipo de vegetação, tendo em vista a estrutura complexa dos processos turbulentos no interior e na parte acima do dossel vegetativo, associado ao fenômeno da partição do saldo de energia radiante e a própria fisiologia das plantas. Portanto, o processo deve ser considerado biofísico para um melhor entendimento da evapotranspiração.

O efeito de fatores agrometeorológicos ambientais sobre a ETc é chamado demanda atmosférica ou demanda evaporativa. Quanto maior a demanda atmosférica, mais rápida a água pode ser evaporada de uma superfície de água livre. Os principais fatores agrometeorológicos que influenciam a demanda atmosférica são os seguintes:

- a) radiação solar (Rs): da radiação solar absorvida pelas folhas das plantas, de 1% a 5% são usados no processo de fotossíntese, e de 75% a 85% são utilizados no processo de aquecimento das folhas e do ar atmosférico logo acima do dossel da cultura (fluxo de calor sensível) e, também, no processo de evapotranspiração (fluxo de calor latente). Um aumento na Rs aumenta a demanda atmosférica e a temperatura do ar;
- b) temperatura do ar (Ta): o aumento da temperatura do ar aumenta a capacidade de retenção de umidade

do ar, o que resulta em uma maior demanda atmosférica;

- c) umidade relativa do ar (UR): quanto maior o conteúdo de umidade (vapor d'água) do ar, maior será o potencial hídrico da atmosfera. Isto significa que a demanda atmosférica diminui com o aumento da UR;
- d) vento: possui influência direta sobre a difusão de vapor d'água pelos estômatos, por meio da resistência aerodinâmica (ra). A formação de turbulência do ar é iniciada em condições de aumento de velocidade do vento, resultando em remoção de vapor d'água (umidade) bem próximo às folhas das plantas e aumento da diferença em potencial hídrico internamente e imediatamente do lado de fora das aberturas estomatais, o que acarreta em um aumento da difusão de vapor d'água.

No Brasil, geralmente os maiores valores de demanda evaporativa da atmosfera são verificados nos meses de outubro a fevereiro, período em que são registrados os maiores valores de radiação solar e temperaturas do ar.

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração (ET) pode ser determinada por meio de equações, que envolvem dados agroclimatológicos ou de medidas direta em lisímetros. As equações podem ser classificadas, com base em seus termos, em radiação, evaporação, temperatura, umidade e múltipla correlação ou combinação desses termos, podendo ter base física, empírica ou então envolvendo base física aliada a fatores ou componentes empíricos (JENSEN, 1974). A escolha do método de determinação da ETc depende de sua aplicação, precisão e principalmente da duração dos períodos envolvidos no estudo. Estimativas mensais ou até mesmo anuais de ETc são necessárias em estudos regionais de recursos hídricos. No entanto, períodos mais curtos (diários, semanais) são necessários para fins de uso e manejo de água de irrigação (TANNER, 1967).

Os elementos climáticos obtidos nas estações automáticas podem ser usados na determinação da ET a partir de métodos desenvolvidos para obtenção da ET de referência (ETo). A determinação da ET da cultura (ETc) é obtida pela multiplicação do valor da ETo por um coeficiente de cultura (Kc). Todo o processo pode ser automatizado, desde a aquisição dos dados meteorológicos até os cálculos de ETc, sendo a informação disponível aos usuários quase em tempo real (GOMIDE, 1998). Com isso, estratégias de tomada de decisão de quando e quanto irrigar podem ser estabelecidas. O problema maior é com o desenvolvimento e ajuste do Kc apropriado para cada área (região) e cultura. Mais recentemente, existem alguns esforços na tentativa de usar informação de reflectância como um substituto para o tradicional Kc. Se esta idéia obtiver êxito, é provável que haja um uso crescente de métodos agrometeorológicos para a determinação de ETc.

A equação modificada de Penman, conhecida como Penman-FAO, é usada para determinar a ETo, tendo a grama como cultura de referência. As principais modificações envolveram a função devido ao vento, o fator de ajustamento c e a hipótese de que o fluxo de calor no solo (G) é igual a zero (períodos superiores a 24 horas). A equação é da seguinte forma (DOORENBOS; PRUITT, 1977):

Equação 1

$$ET_o = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2,7 \right] (1 + 0,864 U_2)(ea - ed)$$

em que, ETo e Rn são em mm/d, Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação em KPa/°C, γ é a constante psicrométrica em KPa/°C, c é o fator de ajustamento, U2 é a velocidade média do vento em m/s e (ea - ed) é o déficit de pressão de vapor d'água em KPa. Os valores de c são encontrados em tabela (DOORENBOS; PRUITT, 1977) ou então obtidos da seguinte equação polinomial (ALLEN; PRUITT, 1991):

Equação 2

$$c = 0.68 + 0.0028 UR_{max} + 0.018 R_s - 0.068 U_d + 0.013 U_d / U_n + 0.0097 U_d (U_d / U_n) + 0.430 \times 10^{-4} UR_{max} R_s U_d / U_n$$

em que, UR_{max} é umidade relativa máxima diária em porcentagem, R_s é a radiação solar global em mm/d, U_d/U_n é a razão entre a velocidade do vento do período diurno e noturno e U_d é a velocidade do vento do período diurno (7 h às 19 h) em m/s. A Equação 1, quando usada com o fator c , resulta o método conhecido como "Penman-FAO corrigido". Para o caso do fator $c = 1$, o método é denominado apenas Penman-FAO. Conforme pode ser observado, na determinação do fator c requer também medições de dados meteorológicos.

Uma revisão sobre a tendência de superestimativa da ETo , pelo método Penman-FAO, tendo a grama como referência, é apresentada por Sedyama (1995). Resultados de trabalhos indicam superestimativas da ordem de 8% a 35%, dependendo do clima da região. Esse mesmo autor realça a complexidade do uso do fator c e salienta a importância desse método, utilizado por muitos como padrão internacional, especialmente no Brasil.

Sedyama (1995) fornece uma criteriosa análise dos conceitos e procedimentos metodológicos de cálculos da ETo , ressaltando as dificuldades de utilização dos lisímetros, dos métodos de balanço de energia e aerodinâmicos ou combinados e da equação de Penman-FAO, dando um enfoque de estabelecer um critério e uma metodologia para atender a uma nova definição de cultura de referência e a estimativa de ETo , com base nos procedimentos para revisão do Boletim FAO-24, de acordo com Smith (1991). A nova ETo é conceituada como sendo a taxa de ET de uma cultura hipotética, com uma altura uniforme de 0,12 m, resistência do dossel da cultura de 70 s/m e albedo de 0,23. Esse conceito de ETo assemelha-se, bem de perto, à ET de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição de umidade. O método

combinado de Penman-Monteith tem fornecido melhores resultados de estimativa da ETo para o caso dessa cultura hipotética de referência, atendendo tanto a definição original de ET potencial de Penman, quanto o conceito de ETo da FAO. Para fins de padronização dos procedimentos de cálculos da nova proposta da ETo , para estimativas de 24 horas, a seguinte equação foi proposta (SMITH, 1991):

Equação 3

$$ETo = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} * \frac{900}{T + 275} U_2 (ea - ed)$$

em que, ETo é a evapotranspiração de referência da cultura hipotética em mm/d, R_n é dado em MJ/m²/d, G é o fluxo de calor no solo em MJ/m²/d, T é a temperatura do ar em °C, U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura em m/s, $(ea - ed)$ é o déficit de pressão de vapor em KPa, Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação em KPa/°C, λ é o calor latente de evaporação em MJ/kg, γ^* é a constante psicrométrica modificada em KPa/°C ($=1 + 0,33 U_2$) e o número 900 é um fator de conversão para as umidades kg K/kJ.

PLATAFORMAS AUTOMÁTICAS AGROMETEOROLÓGICAS

As plataformas automáticas agrometeorológicas baseiam-se em dispositivos eletrônicos e, geralmente, são compostas de: sensores para prover sinais eletrônicos dos parâmetros agrometeorológicos de superfície, amplificadores e conversores de sinais para ampliar e converter os sinais analógicos para valores digitais e áreas de memória para armazenamento dos dados coletados localmente. Estas plataformas apresentam sistemas de aquisição de dados totalmente integrados, que envolvem *dataloggers*, sensores e computadores

portáteis (*notebooks*), e são utilizadas para medir e registrar os parâmetros climáticos, em nível de superfície, de forma precisa e acurada, em intervalo de tempo programável. Atualmente, para alimentá-las, a fonte de energia é proveniente de painéis solares e baterias.

Quando em funcionamento, as plataformas automáticas são programadas para fazer leituras nos sensores a intervalos de 1 segundo a 1 minuto e calcular as médias dos parâmetros registrados para armazenamento nas áreas de memória a cada intervalo de 0,5 a 1 hora. Apenas as médias dos dados são armazenadas no *datalogger*, para futura transferência, na forma de arquivo de dados por meio de interface direta com *notebooks* ou transmissão a distância com sistemas de telemetria, fazendo uso de ondas de frequência de rádio. Os intervalos de varredura dos sensores e os cálculos de médias dos parâmetros climáticos podem ser alterados nos *dataloggers*, por meio de programação adequada, de acordo com a necessidade dos usuários.

Para fins de uso e manejo da água na irrigação, a configuração típica das plataformas automáticas agrometeorológicas envolve medições dos seguintes parâmetros climáticos de superfície: temperatura e umidade relativa do ar, irradiância solar global (mais comum) e saldo de radiação, velocidade e direção do vento, precipitação, evaporação da água do tanque Classe A, albedo e temperatura do solo (Fig. 1).

Instruções e detalhes de características de operação, funcionamento, resolução, precisão, sensibilidade, estabilidade, tipo de sinal gerado e endereços de distribuidores e fabricantes de vários sensores usados nas plataformas automáticas podem ser encontrados em Tanner (1990).

A temperatura (°C) e a umidade relativa do ar (%) devem ser registradas a uma altura de 1,5 a 2,0 m. Esses sensores devem ser instalados dentro de abrigo meteorológico



Figura 1 - Configuração típica de uma plataforma automática agrometeorológica com os sensores mais utilizados para fins de uso e manejo da água na irrigação

para evitar a incidência direta de radiação solar durante o dia e serem protegidos do resfriamento decorrente das ondas longas durante a noite. Um elemento sensor muito usado para medir a temperatura do ar é o termômetro de resistência de platina (TRP, 1000 Ω), encapsulado em cerâmica, com características de estabilidade, confiabilidade e resposta extremamente rápida, assegurando uma transdução precisa da magnitude da temperatura do ar. Para a umidade relativa do ar, é comum a utilização de um sensor capacitivo. Ambos condicionam sinais de saída de 0 a 1.000 mV e são montados em uma única sonda (Vaisala, HMP 35C) (Fig. 1). Além desses, também são utilizados para medir a temperatura do ar os termistores e termopares (TP), que mudam as suas resistências com a temperatura e já vêm calibrados de fábrica. A umidade relativa do ar é uma das variáveis mais difíceis de ser medida com precisão (GOMIDE, 1998).

A Rs global é registrada, geralmente, em W/m^2 , a uma altura de 1,5 a 2 m do solo, com um sensor que mede a radiação global incidente por meio de um detector fotovoltaico de silício, acondicionado em uma peça maciça (LICOR) (Fig. 1). O sen-

sor possui uma base nivelável de alumínio, com aparato mecânico complementar em aço inoxidável para sua instalação. O sinal de saída desse sensor é de $0,2 \text{ kW/m}^2/mV$ (GOMIDE, 1998). O saldo de radiação (R_n) é medido por meio de um sensor formado por 60 junções de termopilhas, com baixa resistência elétrica (4 Ω). Esse sensor, instalado a 1,5 m do solo, registra a soma algébrica do balanço de todas as ondas de radiação que chegam e saem da superfície, isto é, os componentes referentes às ondas curtas e longas (GOMIDE, 1998). O sensor integra todas essas radiações e o sinal enviado para o *datalogger* já é a R_n disponível em nível de superfície (geralmente em W/m^2).

Os sensores de velocidade e direção do vento são construídos em alumínio para ter baixo peso e alta resistência à corrosão. Ambos devem ser instalados a 2,0 m de altura do solo. A velocidade do vento, em m/s, é medida com um anemômetro de três conchas, que produz um sinal, cuja frequência é detectada por meio de um interruptor de luz *light chopper*. A direção do vento é medida em graus, tendo como referência o norte verdadeiro e contado no sentido horário, com um leme e contrapeso

conectados a um potenciômetro de precisão (Climatronics CS800-L) (Fig. 1).

A precipitação é monitorada geralmente com um pluviômetro de caçamba oscilante, em mm/h, que deve ser instalado a uma altura de 1,5 m (TE525) (Fig. 1). A unidade é construída em alumínio anodizado e é composta de um funil, base e caçamba. A seção de captação do pluviômetro apresenta um diâmetro de 158,8 mm. O sensor é calibrado para registrar a precipitação com uma resolução de 0,25 mm por meio da geração de um pulso magnético (GOMIDE, 1998). A temperatura do solo pode ser registrada por termistores e termopares em profundidades que variam de 0,02 a 0,15 m.

Manuais de instruções acompanham os sensores que constituem as plataformas automáticas, onde se tem orientações detalhadas de instalação, operação, manutenção, conexão de fios e configuração da aquisição dos dados. A maioria das plataformas já vem acompanhada com *software*, sendo que algumas para rodar em ambiente *Windows*, que permite ao técnico especialista editar o programa de coleta de dados, monitorar os dados das estações remotas em tempo real, descarregar os bancos de dados armazenados e executar o pré-processamento dos dados para posterior exportação aos diversos *softwares* de análise de dados (Microsoft Excel, etc.).

Alguns resultados de variação do microclima, no período de dezembro de 2005 a maio de 2006, com base em dados registrados na plataforma automática agrometeorológica, localizada na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, são apresentados a seguir. O Gráfico 1 mostra a variação diária da temperatura do ar mínima (T_{min}), média (T_{med}) e máxima (T_{max}), em $^{\circ}C$. Verifica-se que a amplitude térmica no período (diferença entre T_{max} e T_{min}) variou de $5^{\circ}C$ a $14^{\circ}C$. Os valores registrados de temperatura do ar mínima, média e máxima variaram de, aproximadamente, $11^{\circ}C$ a $21^{\circ}C$; $19^{\circ}C$ a $26^{\circ}C$ e $22^{\circ}C$ a $34^{\circ}C$, respectivamente. Os dias 22 de abril

e 5 de maio de 2006 apresentaram as mais baixas temperaturas do ar, 11,5°C e 13°C, respectivamente. As maiores temperaturas máximas estão na faixa de 30°C a 34°C e ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro (verão).

O Gráfico 2 mostra a variação diária da R_s , em MJ/m²/dia, e T_{med} , em °C. Pode-se constatar a existência de uma relação praticamente direta de variação desses dois parâmetros microclimáticos. A radiação solar diária varia desde um mínimo de 8,5 até um máximo de 30,5 MJ/m²/dia. As oscilações abruptas dos valores diários de R_s podem ser explicadas principalmente pela ocorrência de nuvens (tempo nublado), que afetam diretamente a incidência direta e difusa dos raios solares.

A variação diária da umidade relativa do ar mínima (UR_{min}), média (UR_{med}) e máxima (UR_{max}), em %, é apresentada no Gráfico 3. Observa-se a ocorrência de dias mais secos com valores de UR_{min} do ar abaixo de 35%. Isso, associado às elevadas temperaturas do ar, propicia condições de alta demanda evaporativa da atmosfera. Os valores de UR_{med} do ar variaram em 68% a 100%, sendo o último valor decorrente de um dia com chuva.

O Gráfico 4 mostra a variação diária da precipitação (P), em mm. A estação chuvosa (dezembro de 2005 e janeiro a março de 2006) compreende período dos dados em que foram registrados os maiores valores diários de P (de 50 a 118 mm). A precipitação acumulada mensal foi de 396, 126, 108, e 414 mm para os meses de dezembro de 2005 e janeiro a março de 2006, respectivamente. As variações diárias da E_{To} , em mm/dia, determinada pelo método de Penman-Monteith, e velocidade média do vento (VV_{med}), em m/s, encontram-se no Gráfico 5. Os maiores valores diários de E_{To} (demanda hídrica da cultura) foram na faixa de 4,8 a 6,6 mm/dia e os menores valores diários foram da ordem de 1,2 a 2,8 mm/dia. A variação diária da velocidade média do vento (VV_{med}), em m/s, ficou na faixa de 0,6 a 2,4 m/s.

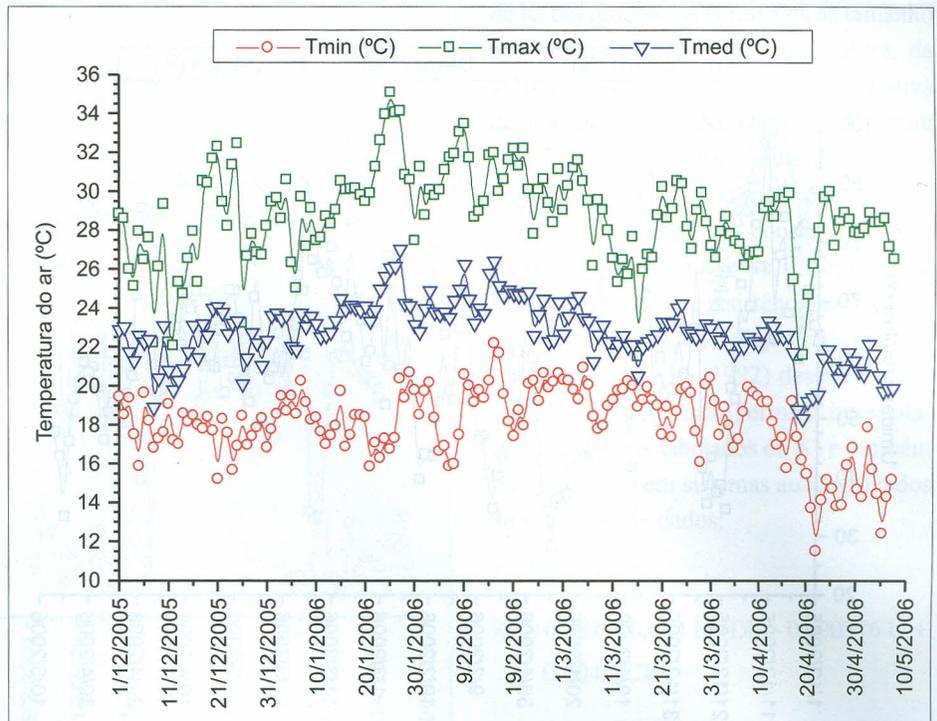


Gráfico 1 - Variação diária da temperatura do ar mínima (T_{min}), média (T_{med}) e máxima (T_{max}), em °C

FONTE: Gomide et al. (2006).

NOTA: Plataforma automática agrometeorológica da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG - dezembro de 2005 a maio de 2006.

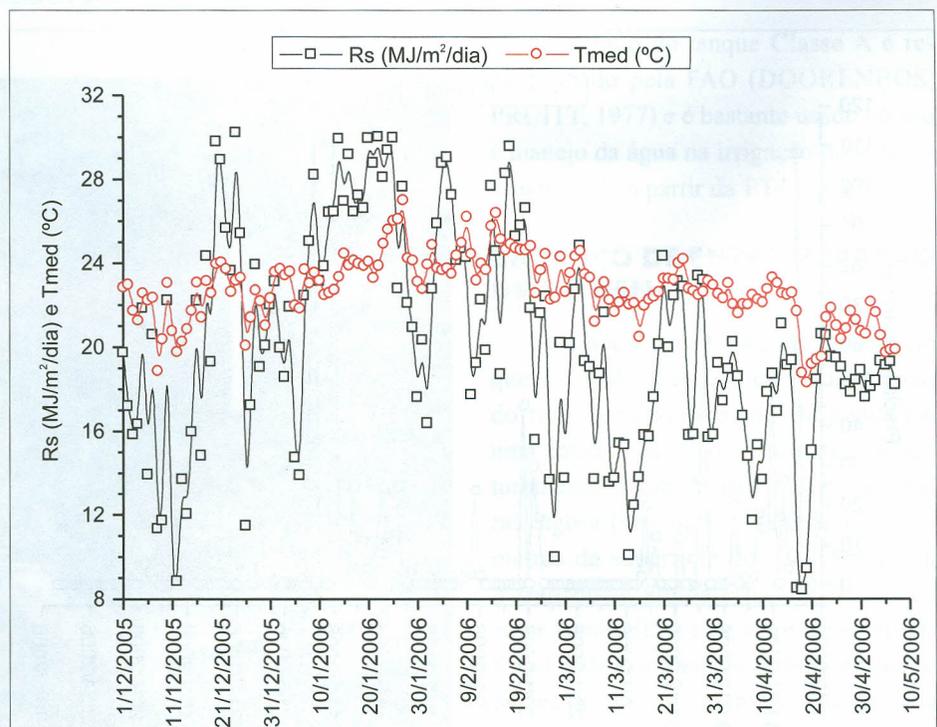


Gráfico 2 - Variação diária da radiação solar (R_s), em MJ/m²/dia, e temperatura do ar média (T_{med}), em °C

FONTE: Gomide et al. (2006).

NOTA: Plataforma automática agrometeorológica da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG - dezembro de 2005 a maio de 2006.

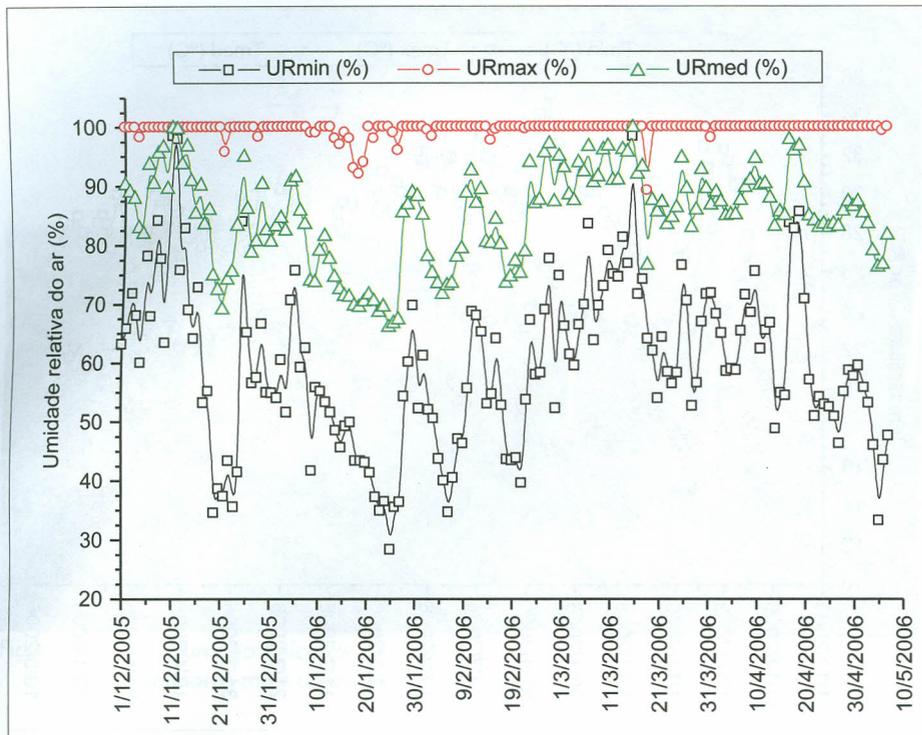


Gráfico 3 - Variação diária da umidade relativa do ar mínima (URmin), média (URmed) e máxima (URmax), em %

FONTE: Gomide et al. (2006).

NOTA: Plataforma automática agrometeorológica da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG - dezembro de 2005 a maio de 2006.

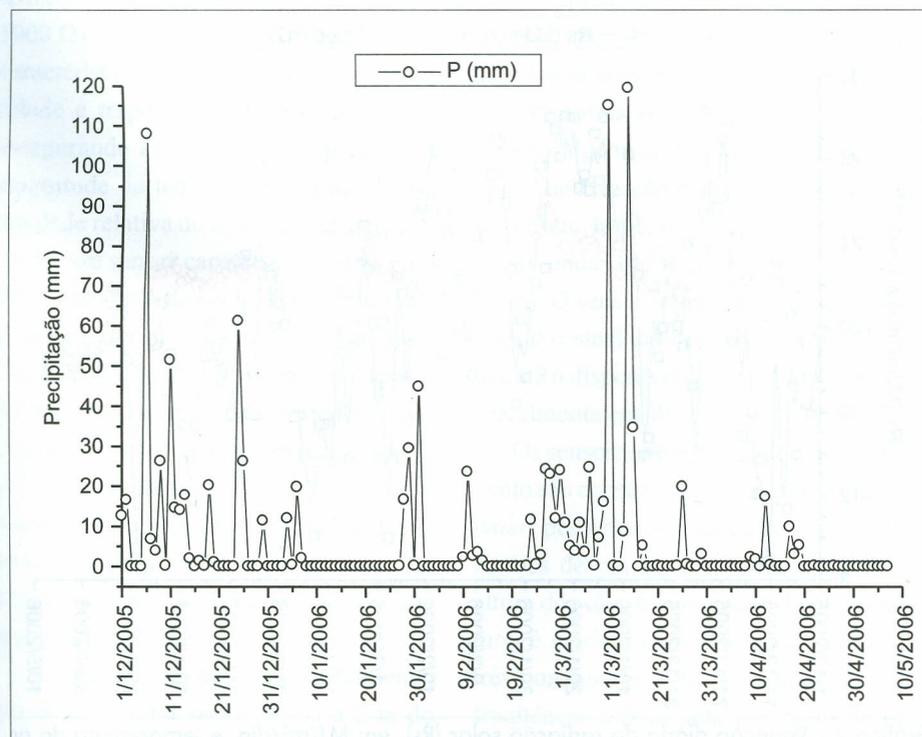


Gráfico 4 - Variação diária da precipitação (P), em mm

FONTE: Gomide et al. (2006).

NOTA: Plataforma automática agrometeorológica da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG - dezembro de 2005 a maio de 2006.

TANQUE CLASSE A

O tanque Classe A é um reservatório cilíndrico de 0,254 m de profundidade e 1,206 m de diâmetro, construído com uma chapa de metal não corrosiva e instalado sobre um estrado de madeira de 0,15 m de altura. O nível da água no interior do tanque deve ser mantido dentro da faixa de 0,174 a 0,204 m de profundidade (Fig. 2).

A variação de nível da água do tanque Classe A pode ser medida com um elemento sensor que fornece um sinal elétrico proporcional ao nível da água do tanque. A unidade é constituída de um flutuador, um contrapeso, uma corrente e uma roda dentada presa a um potenciômetro de precisão de 1 k Ω (NOVALYNX SYSTEMS, 1997). O conjunto fica instalado no interior de uma coluna de 20,3 cm de diâmetro e 66,0 cm de altura, com base nivelável, que funciona como poço tranquilizador para o flutuador, a fim de evitar rápidas flutuações de nível da água durante as medições. Essa coluna é conectada, lateralmente, ao tanque por um tubo de PVC de 12,7 mm de diâmetro e 2 m de comprimento, formando um sistema de vasos comunicantes (Fig. 1 e 2). Dessa forma, uma mudança no nível da água no interior do tanque corresponderá a uma mesma mudança de nível no interior da coluna. Como a corrente está presa nas extremidades pelo flutuador e contrapeso e encaixada na roda dentada, a oscilação de nível é detectada pelo flutuador e transmitida ao potenciômetro que registra a variação de resistência (GOMIDE, 1998). O sistema é calibrado para fornecer a leitura do nível da água do tanque em mm. O registro pode ser obtido a intervalos que variam de 0,5 a 1 hora.

As medições da evaporação da água do tanque Classe A (E_t) são usadas para determinar a E_{To} por meio da seguinte equação:

Equação 4

$$E_{To} = K_t E_t$$

em que, K_t é um coeficiente de correção da E_t . Uma tabela que descreve a variação

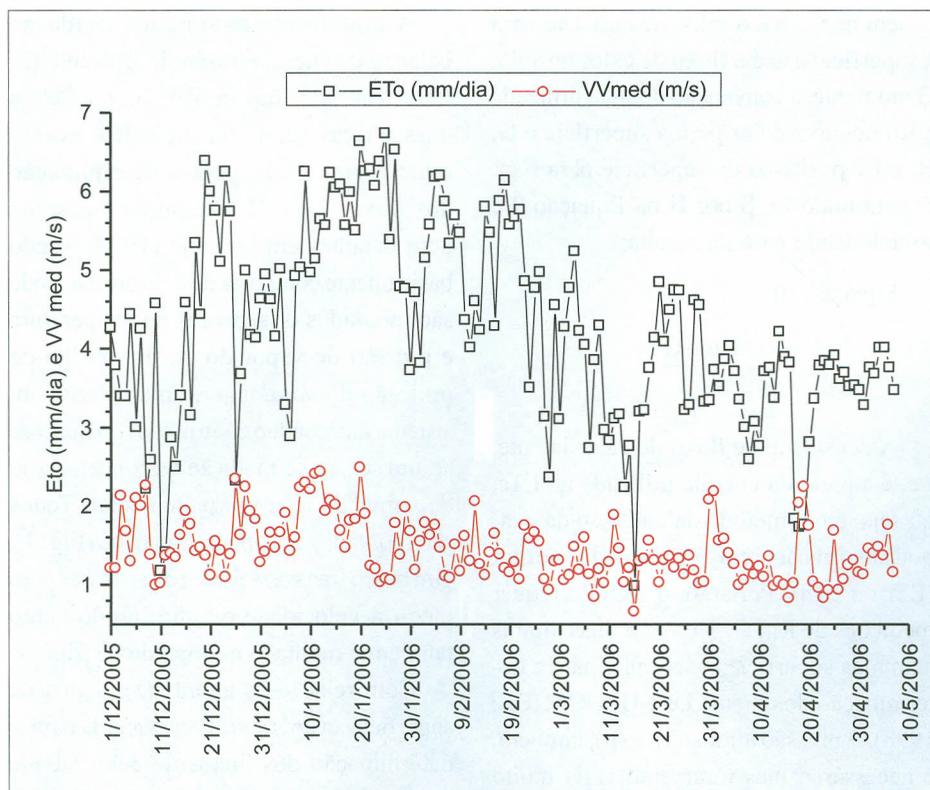


Gráfico 5 - Variação diária da evapotranspiração de referência (ETo), em mm/dia, e velocidade média do vento (VV med), em m/s

FONTE: Gomide et al. (2006).

NOTA: Plataforma automática agrometeorológica da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG - dezembro de 2005 a maio de 2006.



Figura 2 - Tanque Classe A para medição automática da evaporação da água

de Kt em função das condições de tamanho e da natureza da área de bordadura, da velocidade do vento e da umidade relativa do ar é apresentada por Doorenbos e Pruitt (1977). Essa tabela foi obtida de dados experimentais de diversas regiões do mundo, portanto, sob diferentes condições climáticas, considerando-se as diferenças de albedo, rugosidade e resistência estomática das superfícies água e vegetação (grama). Mais tarde, Snyder (1992) desenvolveu a seguinte equação para permitir interpolação dos valores tabelados de Kt e também facilitar o uso em sistemas automatizados de obtenção de dados:

Equação 5

$$Kt = 0,482 + 0,024 \ln(Db) - 0,000376 U + 0,0045 UR$$

em que Db é a distância (tamanho) da área de bordadura, em m, U é a velocidade do vento em km/d e UR é a umidade relativa média do dia em %. Snyder (1992) salienta que essa equação só deve ser usada dentro dos limites de Db, U e UR da tabela original.

O método do tanque Classe A é recomendado pela FAO (DOORENBOS; PRUITT, 1977) e é bastante usado no uso e manejo da água na irrigação para determinar a ETc a partir da ETo e dos Kc.

BALANÇO DE ENERGIA/RAZÃO DE BOWEN

O balanço de energia é um método em que são realizadas medições automáticas do transporte vertical de entidades em uma camada de escoamento atmosférico turbulento acima de uma superfície natural rugosa (vegetação), situada a poucos metros da superfície do solo. Em geral, o transporte atmosférico de fluxos de calor latente (Le) e de calor sensível (H) é realizado por meio de turbilhões que se deslocam aleatoriamente acima de uma superfície natural rugosa, numa tendência de homogeneização de Le e H com a altura (z). Daí faz sentido supor que tanto Le como H sejam igualmente transportados pelo mesmo turbilhão. Nessa condição es-

pecífica de mesmo escoamento atmosférico turbulento, os coeficientes K_v e K_h podem ser considerados iguais (GOMIDE, 1998). Na prática, gradientes finitos são medidos e um coeficiente efetivo de transporte turbulento (*eddy diffusivity*) é considerado na determinação do gradiente vertical:

Equação 6

$$Le = \frac{\lambda \rho \varepsilon K_v (e_1 - e_2)}{p (z_1 - z_2)}$$

Equação 7

$$H = \rho c_p \cdot K_h \frac{(T_1 - T_2)}{(z_1 - z_2)}$$

em que, e_1 e e_2 são medidas da pressão de vapor atual do ar nas posições z_1 e z_2 , respectivamente; T_1 e T_2 são medidas da temperatura do ar nas posições z_1 e z_2 , respectivamente; z_1 e z_2 são as alturas verticais de tomadas das medidas “e” e “T”; K_v e K_h são os coeficientes de transporte turbulento (*eddy diffusivities*) de calor latente e de calor sensível, respectivamente; ρ é a densidade do ar seco; c_p é o calor específico do ar seco; λ é o calor latente de vaporização da água; p é a pressão atmosférica e ε é a razão do peso molecular da água para o peso molecular do ar seco.

A razão de H para Le pode ser usada na partição da energia disponível na superfície em fluxo de calor sensível e latente, a partir das Equações 6 e 7, e é conhecida como razão de Bowen (β) (BOWEN, 1926):

Equação 8

$$\beta = \frac{H}{Le} = \frac{\rho c_p (T_1 - T_2)}{\lambda \varepsilon (e_1 - e_2)}$$

em que, $\frac{\rho c_p}{\lambda \varepsilon}$ é a constante psicométrica (γ).

O balanço de energia da superfície é dado pela seguinte equação:

Equação 9

$$R_n = G + H + Le$$

em que, R_n é o saldo de radiação para a superfície e G é o fluxo de calor no solo. Geralmente, a convenção de sinal utilizada é R_n positiva do ar para a superfície e G , H , e Le positivos da superfície para o ar. Substituindo Le por H na Equação 9 e solucionando para Le resulta:

Equação 10

$$Le = \frac{R_n - G}{1 + \beta}$$

A densidade de fluxo de calor latente, Le , é a parte da energia utilizada na ETc, ou seja, é um método de medição da evapotranspiração real ou atual da cultura (ETr ou ETa). Portanto, o método requer medições de R_n , G , T e “e” a duas alturas acima da superfície evaporante para a determinação dos fluxos Le e H (GOMIDE, 1998). A pressão atmosférica (p), também, é necessária, mas raramente varia muito e deve ser calculada de acordo com a elevação local, assumindo uma atmosfera padrão.

A sensibilidade de β é diretamente relacionada com os gradientes de temperatura e de pressão de vapor medidos (Equação 8). Isso significa que um erro de 1% nas medições resulta em 1% de erro em β . Os fluxos (H e Le) calculados aproximam do valor infinito, quando o valor de β aproxima de -1. Essa situação geralmente ocorre somente à noite, quando há pouca energia disponível ($R_n - G$). Na prática, quando o valor de β está muito próximo de -1 ($-1,25 < \beta < -0,75$), os valores de H e Le são considerados negligíveis e não são calculados.

As condições hídricas da superfície evaporante é que vão definir os valores de β . Após uma aplicação de água, irrigação ou chuva, essa superfície vai estar bem umedecida e uma maior parte de R_n vai ser usada em Le , resultando em valores baixos de β . Caso contrário, em uma condição de estresse hídrico, essa superfície vai apresentar restrição hídrica e uma maior parte de R_n vai ser utilizada no aquecimento do ar (H), fornecendo valores elevados de β (GOMIDE, 1998).

A plataforma automática usada no balanço de energia/ razão de Bowen (BE/RB), nas medições de R_n , G , T e “e”, a duas alturas acima da superfície evaporante (vegetação), para a determinação dos fluxos Le e H , encontra-se descrita com detalhes em Gomide (1998), sendo basicamente composta de dois braços, onde são montados os sensores de temperatura e pressão de vapor do ar, um abrigo de proteção do *datalogger*, uma bateria, um sistema automático controlador do fluxo de ar, um sensor de medição da concentração de vapor do ar e um painel solar. Todos são montados em apenas um tripé (Fig. 3). Um braço transversal com os sensores para medir a velocidade e a direção do vento também é montado no topo desse tripé.

Com relação às alturas (z), acima da superfície evaporante (vegetação), para a determinação dos fluxos de calor latente (Le) e sensível (H), é comum realizar as medições, uma posição logo acima do dossel da cultura (em torno de 0,1 m) e outra distanciada verticalmente de cerca de 1,0 a 1,5 m da primeira (Fig. 3). Um *datalogger* é usado para armazenar os dados de todos os sensores e controlar a abertura e o fechamento das chaves eletrônicas das válvulas reguladoras de fluxo de ar por meio do *cooled mirror*.

O Gráfico 6 ilustra a variação diurna de alguns termos do balanço de energia: os fluxos de saldo radiação (R_n), calor latente ($Le = ETcRB$) e calor sensível (H), da evapotranspiração da cultura determinada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), da velocidade do vento e da razão das resistências climática e aerodinâmica (r_i/r_a) obtidos aos 41 dias após a semeadura com a cultura do feijoeiro (KOBAYASHI et al., 2002). Os resultados relativos à ETc mostram que os valores calculados pela equação de Penman-Monteith (ETcPM) foram subestimados, quando comparados com os valores medidos de ETc pela razão de Bowen (ETcRB). Verifica-se também que, em vários horários de medição, o fluxo de calor latente medido pelo sistema RB ($Le = ETcRB$) ultrapassou o valor do saldo



Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 3 - Plataforma automática usada no balanço de energia/razão de Bowen nas medições de saldo radiação (R_n), fluxo de calor do solo (G), temperatura do ar (T), pressão de vapor do ar (e), a duas alturas (z) acima da superfície evaporante (vegetação), para a determinação dos fluxos de calor latente (Le) e sensível (H), instalada na cultura de milho

de radiação, indicando a possibilidade de ter ocorrido efeito de advecção. Pelo fato de a contribuição da energia advectiva não ter sido medida diretamente, foi utilizada a razão entre a resistência climática (r_i) e a resistência aerodinâmica, para indicar o efeito de contribuição de energia advectiva de áreas adjacentes à área experimental, conforme proposto por Thom (1975 apud TODD et al., 2000), que salienta que essa razão aumenta caso aumente a contribuição de fluxo de ar seco de áreas adjacentes sobre a vegetação da área monitorada, denominado efeito oásis. Observa-se que o fluxo de calor sensível (H) apresenta valores negativos no período da tarde, os quais se tornaram mais evidentes com o aumento de r_i/r_a , reforçando a hipótese de contribuição de energia de áreas adjacentes (KOBAYASHI et al., 2002).

PROGRAMAÇÃO DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO

Para fins de uso e manejo da água de irrigação, o conceito do processo de ET_c é considerado unidimensional, particular-

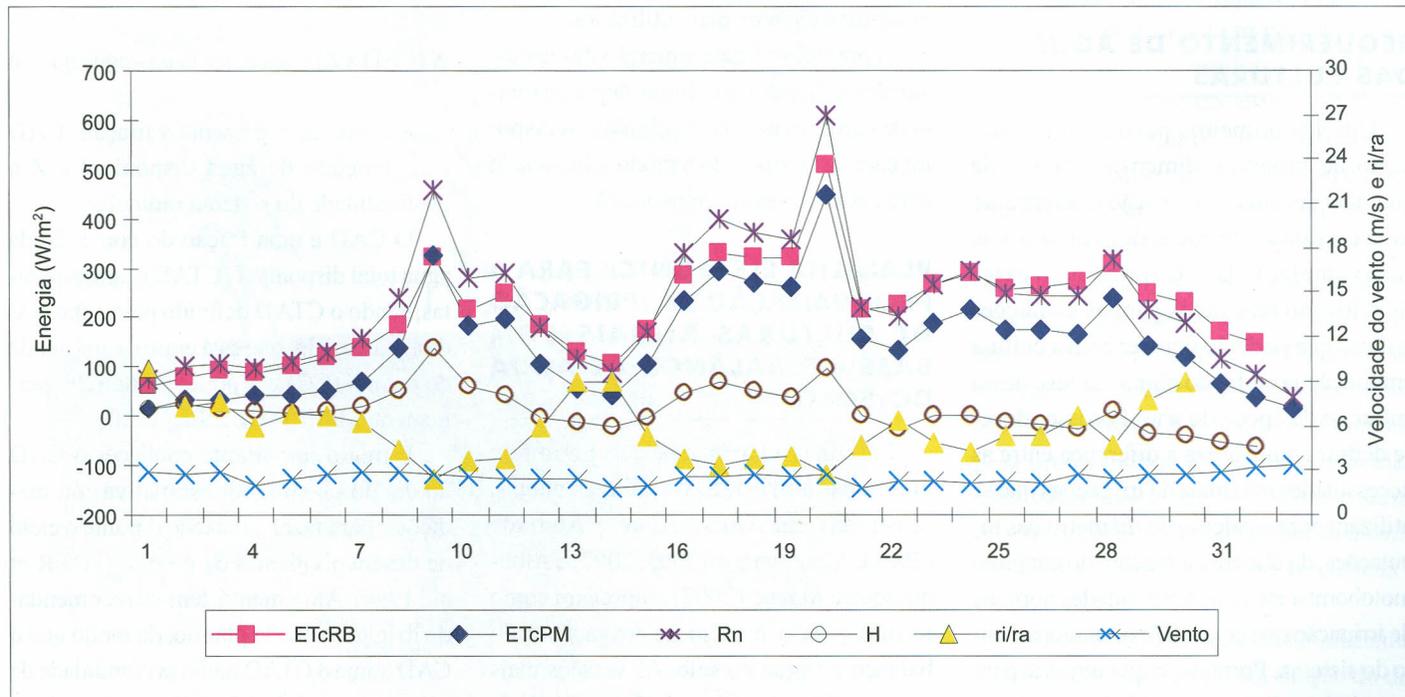


Gráfico 6 - Variação diurna de alguns termos do balanço de energia [fluxos de saldo radiação (R_n), calor latente ($Le = ET_{cRB}$) e calor sensível (H)], da evapotranspiração da cultura determinada pela equação de Penman-Monteith (ET_{cPM}) e da razão das resistências climática e aerodinâmica (r_i/r_a), obtidos aos 41 dias após a semeadura com a cultura do feijoeiro

FONTE: Kobayashi et al. (2002).

mente em relação aos processos da evaporação e de trocas de energia, significando que todos os fluxos de vapor d'água são uniformes e verticais ao longo da superfície horizontal coberta com a vegetação, que deve ser representativa de plantio de grande escala para evitar o efeito de bordadura de energia advectiva de áreas adjacentes ou efeito oásis.

O uso e o manejo racional da água de irrigação, na agricultura irrigada, envolvem tanto a sua reposição no perfil do solo (irrigação), quanto a remoção de seu excesso (drenagem). Sua reposição pode ocorrer artificialmente por meio de um sistema de irrigação (aspersão convencional, pivô central, barra lateral com difusores móveis, gotejamento, etc.) ou, naturalmente, pela distribuição de precipitações pluviométricas. Na programação da irrigação, tanto na fase de elaboração do projeto como na operação e manejo do sistema, a água disponível no solo para as plantas, é usualmente calculada com base no balanço hídrico da região. Este tem na ETo e precipitação efetiva seus principais componentes (RITCHIE, 1985; HEERMANN, 1985; MIZYED et al., 1991).

REQUERIMENTO DE ÁGUA DAS CULTURAS

Um dos primeiros passos para elaboração do projeto e dimensionamento de qualquer sistema de irrigação é determinar as necessidades hídricas das culturas que serão implantadas. Geralmente, esses cálculos são realizados para as condições críticas que poderão ocorrer com a cultura em função do solo, do clima, da fase dessa cultura e da época do ano. Por isso, deve-se definir com clareza a diferença entre as necessidades máximas de irrigações que se utilizam para o cálculo do diâmetro das tubulações, do dimensionamento do conjunto motobomba etc., e as necessidades normais de irrigação que controlam o funcionamento do sistema. Portanto, o que importa para o projetista são as necessidades máximas, que permitem calcular a hidráulica das instalações. As necessidades normais, que são do interesse do irrigante durante a

condução do dia-a-dia da sua cultura, são obtidas pelo manejo de irrigação, que é o ajustamento da duração e/ou frequência de irrigação em função da lâmina d'água requerida para determinada fase ou período do ciclo da cultura (VERMEIREN; JOBLIN, 1997).

De modo geral, a água necessária a uma determinada cultura é equivalente à evapotranspiração (evaporação de água do solo + transpiração das plantas) de uma cultura livre de doenças que se desenvolve em um local em condições ótimas de solo e clima. A condição ótima de solo consiste em nível de fertilidade e umidade suficientes para a cultura alcançar a sua produção potencial no meio considerado. Daí, a necessidade hídrica de uma cultura baseia-se em sua evapotranspiração (ETc) e é expressa, normalmente, em milímetros por dia (mm/dia).

Podem ser obtidos os dados necessários à demanda hídrica da cultura por meio de medições realizadas diretamente no campo. Entretanto, os procedimentos de medidas diretas são demorados e trabalhosos, sendo esses mais utilizados em condições de pesquisa. Dessa forma, os métodos estimativos são os mais utilizados.

A precisão na determinação das necessidades hídricas das culturas depende muito da natureza dos dados climáticos disponíveis e da precisão do método selecionado para estimar a evapotranspiração.

PLANILHA ELETRÔNICA PARA A PROGRAMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO DE CULTURAS ANUAIS COM BASE NO BALANÇO DE ÁGUA DO SOLO

Planilhas eletrônicas que permitem programar a irrigação de culturas anuais, mostradas em Albuquerque e Andrade (2001), Albuquerque (2003, 2007) e Albuquerque e Maeno (2007) empregam como técnica para o manejo da irrigação a do balanço de água no solo. As versões mais recentes têm a vantagem da flexibilidade da tomada de decisão, de modo que, apesar de ser indicada uma data para irrigar, o usuário tem a liberdade de irrigar em qualquer

data escolhida, dentro de sua capacidade operacional. Porém, o adiamento do dia de irrigar implica um aumento do fator de risco à cultura, porque esta pode ser submetida a déficit hídrico. Dependendo do grau de exatidão que se deseja, estimativas, medições ou inclusões de variáveis poderão ser efetuadas. Assim, utiliza-se a planilha para fazer a programação da irrigação, as características físico-hídricas do solo, a ETo (por qualquer método, inclusive pelo do tanque de evaporação Classe A) e a precipitação pluvial.

O balanço de água no solo é um método usado para prever a variação do conteúdo de água no volume de solo que engloba o sistema radicular da cultura. Esse método considera uma condição de água no solo que não causa déficit ou excesso ao sistema radicular da planta, contribuindo, portanto, para que ela obtenha o mais alto rendimento técnico. Por isso, o turno e as lâminas de irrigação assim obtidos podem variar continuamente ao longo do ciclo da cultura.

Desse modo, o balanço baseia-se na equação de conservação de massa:

Equação 11

$$\Delta' (\text{CAD} \times Z) = \text{água que entra} - \text{água que sai}$$

em que, Δ' representa variação, CAD é o conteúdo de água disponível e Z a profundidade do sistema radicular.

O CAD é uma fração do conteúdo da água total disponível (CTAD) para as plantas, sendo o CTAD definido pelo conteúdo de água no solo, que está entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) (HILLEL, 1980).

É muito importante conhecer o CAD no dia do plantio, por estimativas ou medições, para fazer o balanço durante o ciclo de desenvolvimento da cultura (ITIER et al., 1996). Atualmente, tem-se recomendado irrigar no dia do plantio, de modo que o CAD atinja o CTAD numa profundidade de pelo menos o dobro daquela de semeadura, ou seja, se a semeadura foi feita a 5 cm de profundidade, o valor de Z para efeito de irrigação fica sendo de 10 cm pelo menos.

No presente caso, o Z considerado para a irrigação do plantio foi o seu valor máximo (Zmax), além de que o perfil do solo pode ser dividido em até cinco camadas para obtenção do CTAD por camada.

Na superfície do solo, as variáveis que entram (+) e que saem (-) do balanço podem ser a chuva (+P), a irrigação (+I), o escoamento superficial (\pm ES) e a evapotranspiração real (-ETc). Abaixo da superfície do solo, têm-se a ascensão capilar (+AC) e a drenagem profunda (-D). A Figura 4 ilustra, de modo geral, como se processa o ciclo da água no sistema solo-água-plantas-atmosfera, evidenciando a interferência desse ciclo no balanço da água no solo.

Na condição mais comum da ocorrência de um lençol freático mais profundo, o termo AC é desprezado, pois não há a sua contribuição para aumentar o conteúdo de água para a zona radicular.

A lâmina de irrigação (I), calculada sem excesso e aplicada a uma taxa dentro da velocidade de infiltração básica (VIB) do solo, não causa drenagem profunda nem escoamento superficial; portanto, tanto D quanto ES também podem ser desprezados. Entretanto, na ocorrência de P com valores mais elevados, haverá a ocorrência de D, assim como pode haver também ES, dependendo da intensidade de P. Para desprezar D e ES, deve-se estimar a precipitação efetiva (Pef), ou seja, aquela que realmente

contribui para suprir a cultura.

Para que não haja efeito sobre o desenvolvimento normal da cultura, a ETc não pode sofrer redução em virtude da diminuição da umidade do solo a tal ponto que possa dificultar a extração de água pelas raízes (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Uma irrigação que não prevê déficit hídrico para a cultura deve levar em conta um fator de depleção (f) da água no solo. O f define a água facilmente disponível (CAFD), que é a fração da CTAD ($0 < f \leq 1$) que não causará efeito negativo sobre o desenvolvimento da cultura. Desse modo, CAFD = f x CTAD. O termo f é também chamado coeficiente de disponibilidade. O valor de f depende, basicamente, da cultura, do seu estágio de desenvolvimento e das condições do clima.

Levando em conta diversos aspectos, considera-se a seguinte equação para o balanço de água no solo:

Equação 12

$$\Delta' (CTAD \times f \times Z) = I + P_{ef} - ET_c$$

em que, Δ' representa variação; CTAD é o conteúdo de água total disponível no solo (em mm de água/cm de solo); f é o coeficiente de disponibilidade ($0 < f \leq 1$); Z é a profundidade do sistema radicular (em cm); I é a lâmina de irrigação (em mm); Pef a precipitação efetiva (em mm) e ETc a evapotranspiração da cultura (em mm).

O lado esquerdo da Equação 12 [$\Delta' (CTAD \times f \times Z)$] representa o armazenamento de água que o solo comporta, até um valor mínimo admissível (f) dentro do volume de controle considerado, que, nesse caso, é o volume de solo que está limitado pela profundidade do sistema radicular. Essa expressão é que vai definir o turno ou a frequência de irrigação, isto é, quanto menor o seu valor maior é a frequência e vice-versa.

O lado direito da Equação 12 vai definir a lâmina de irrigação (I) em função do dia determinado para irrigar. Desse modo, ao observar a capacidade do solo em armazenar água, a lâmina líquida de irrigação (I) no dia determinado é dada por:

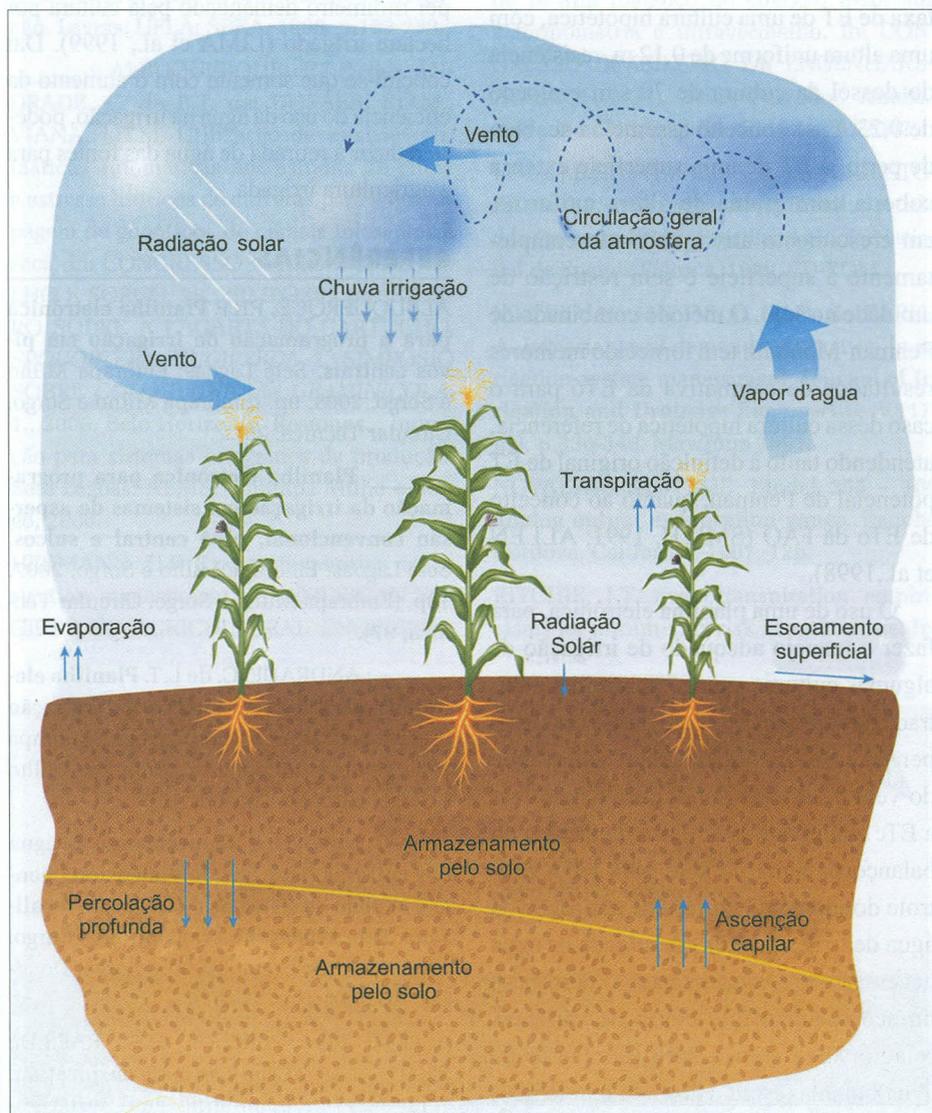


Figura 4 - O ciclo da água no sistema solo-água-plantas-atmosfera, enfocando também o balanço da água no solo com as suas variáveis

Equação 13

$$I = ETc - Pef$$

Para a estimativa da P_{ef} é considerada na planilha, que toda precipitação pluvial é infiltrada no solo e que o excesso de água, que ultrapassa a sua capacidade de retenção, a partir da umidade real do solo no dia em questão, é drenado além da zona radicular. Então, P_{ef} é estimada apenas pela lâmina que efetivamente pode contribuir para o consumo de água da cultura.

Na planilha, os valores do coeficiente de cultura (K_c) podem ser gerados automaticamente, segundo quatro classes de demanda evaporativa (que é função da ETo), a saber:

- a) 1 - baixa: $ETo \leq 2,5$ mm/dia;
- b) 2 - moderada: $2,5 < ETo \leq 5,0$ mm/dia;
- c) 3 - alta: $5,0 < ETo \leq 7,5$ mm/dia;
- d) 4 - muito alta: $ETo > 7,5$ mm/dia.

Com o valor de 1 a 4 selecionado, de acordo com a demanda predominante e a teoria descrita em Allen et al. (1998), para estimar os valores de K_c , geram-se os valores de K_{c1} (ou K_c inicial), K_{c3} (ou K_c na fase intermediária) e K_{c4} (ou K_c na fase final). Entretanto, cada um desses valores de K_c pode ser previamente conhecido e prioritariamente utilizado no lugar daqueles estimados em função da demanda evaporativa.

OBTENÇÃO DE PLANILHAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO

Planilhas para o manejo de irrigação podem ser obtidas no portal da Embrapa Milho e Sorgo (www.cnpms.embrapa.br) na seção de "Publicações online", como a Circular Técnica nº 97 (ALBUQUERQUE, 2007) e Documentos nº 65 (ALBUQUERQUE; MAENO, 2007).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A automação de medições dos principais fatores agrometeorológicos, em tempo real, facilita a obtenção da ETc e,

conseqüentemente, permite estabelecer estratégias de manejo de irrigação e otimizar o uso da água necessário aos sistemas agrícolas, principalmente os irrigados, além de possibilitar melhor dimensionamento de projetos de irrigação em perímetros irrigados (sistemas de irrigação, bombeamento, distribuição e armazenamento de água, etc.).

A nova proposta de cálculos diários de ETo , com base na equação combinada de Penman-Monteith, padronizada de acordo com os procedimentos de Smith (1991) e ALLEN et al. (1998), é mais eficiente e precisa na determinação da ETc com o uso de coeficientes de culturas (K_c) apropriados.

O novo conceito de ETo baseia-se na taxa de ET de uma cultura hipotética, com uma altura uniforme de 0,12 m, resistência do dossel da cultura de 70 s/m e albedo de 0,23. Esse conceito assemelha-se, bem de perto, à ET de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo completamente a superfície e sem restrição de umidade no solo. O método combinado de Penman-Monteith tem fornecido melhores resultados de estimativa da ETo para o caso dessa cultura hipotética de referência, atendendo tanto à definição original de ET potencial de Penman, quanto ao conceito de ETo da FAO (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

O uso de uma planilha eletrônica, para fazer o manejo adequado de irrigação de algumas culturas anuais, possibilita a entrada de dados diários agroclimáticos (temperatura do ar, precipitação, velocidade do vento, radiação solar) para determinar a ETc e também fazer o uso da técnica do balanço da água no solo para ter o controle do momento correto de aplicação da água de irrigação e da quantidade de água necessária em cada irrigação, com base no acompanhamento diário de variáveis relacionadas com o solo (conteúdo de água), planta (estádio do ciclo fenológico) e atmosfera (dados climáticos), permitindo a otimização do uso da água na irrigação.

No Brasil, a eficiência média do uso da água dos sistemas de irrigação está estimada em 60%, significando que, para cada 10 mil litros de água necessários às plantas por hectare (1 mm), são precisos 16.667 litros de água (LIMA et al., 1999). É importante destacar que desse volume total, as plantas transpiram 97%; portanto, um retorno de mais de 9.700 litros para a atmosfera, na forma de vapor d'água, ou seja, água pura. Os outros 6.667 litros tendem a evaporar da superfície do solo ou percolar e preencher os lençóis subterrâneos, que podem retornar ou não ao mesmo curso d'água de onde foi retirada. Vale ressaltar que a elevação dessa eficiência em apenas 5% representaria um volume de 1.282 litros que deixariam de ser retirados da fonte d'água por milímetro demandado pela cultura por hectare irrigado (LIMA et al., 1999). Já conclui-se que somente com o aumento da eficiência do uso da água na irrigação, pode-se reduzir a retirada de água das fontes para a agricultura irrigada.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P.E.P. **Planilha eletrônica para a programação de irrigação em pivôs centrais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 9p. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica, 25).

_____. **Planilha eletrônica para programação da irrigação em sistemas de aspersão convencional, pivô central e sulcos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 18p. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica, 97).

_____; ANDRADE, C. de L.T. **Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 14p. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica, 10).

_____; MAENO, P. **Requerimento de água das culturas para fins de dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação localizada**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 76p. (Embrapa Milho e Sorgo, Documentos, 65).

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56).

- ALLEN, R.G.; PRUIT, W.O. FAO – 24 referência evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.117, n.5, p.758-772, Sept./Oct. 1991.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v.27, p.779-787, 1926.
- CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n.54, p.46-55, 2002.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- GOMIDE, R.L. Monitoramento para manejo de irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA: SBEA, 1998. p.133-238.
- _____; ALBUQUERQUE, P.E.P. de; ANDRADE, C. de L.T. de; DURAES, F.O.M.; VIANA, J.H.M. Utilização de estações climáticas automáticas nos estudos de clima e estresse hídricos de culturas para a fenotipagem de genótipos de cereais tolerantes à seca. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 26.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA-DO-CARTUCHO, *SPODOPTERA FRUGIPERDA*, 2.; SIMPÓSIO SOBRE *COLLETOTRICUM GRAMINICOLA*, 1., 2006, Belo Horizonte. **Resumos...** Inovação para sistemas integrados de produção. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo, 2006.
- HERMANN, D.F. Evapotranspiration in irrigation management. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Advances in evapotranspiration**. Chicago, 1985. p.323-333.
- HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 385p.
- ITIER, B.; MARAUX, F.; RUELLE, P.; DEUMIER, J.M. Applicability and limitations of irrigation methods and techniques. In: SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; BERENGENA, J.; ITIER, B.; GOUSSARD, J.; RAGAB, R.; TOLLEFSON, L.; HOFWEGEN, P. van (Ed.). **Irrigation scheduling: from theory to practice**. Rome: ICID: FAO, 1996. p.19-32.
- JENSEN, M.E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: ASAE, 1974. 215p.
- KOBAYASHI, M.K.; GOMIDE R.L.; SEDIYAMA G.C.; MAGALHÃES P.C. Parametrização da resistência do dossel da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizando razão de Bowen (balanço de energia) associada à termometria a infravermelho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA: UFBA: EMBRAPA, 2002.
- LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. **Uso da irrigação no Brasil: o estado das águas no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 1999. CD-ROM.
- MIZYED, N.; LOFTIS, J.; OAD, R.; EARLY, A. Importance of demande estimation in irrigation-system management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.117, n.3, p.336-349, May/June 1991.
- NOVALYNS SYSTEMS. **Model 255 – 100 analog output evaporation gauge**. Rancho Cordova, California, 1997. 12p.
- RITCHIE, J.T. Evapotranspiration empiricisms for minimizing risk in agriculture. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Advances in evapotranspiration**. Chicago, 1985. p.139-150.
- SANTOS, J.R.M. dos. Irrigar é preciso. **Agro-analysis**, Rio de Janeiro, v.18, n.3, p.29-34, mar. 1998.
- SEDIYAMA, G.C. A versão/proposta para o conceito de evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais...** Adversidades climáticas e a produção agrícola. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.
- SNYDER, R.L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, p.977-980, 1992.
- TANNER, B. D. Automated weather stations. **Remote sensing reviews**, v.5, n.1, p. 73-98, 1990.
- TANNER, C.B. Measurement of evapotranspiration. In: HAGAN, R.M.; HAISE, H.R.; EDMINSTER, T.W. (Ed.). **Irrigation of Agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.320-329.
- TODD, R.W.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A. The Bowen ratio-energy balance for estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, n.4, p.335-348, July 2000.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Campina Grande: UFPB, 1997. 184p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).

MUDAS DE OLIVEIRA

Garantia de procedência, mudas padronizadas,
qualidade comprovada e variedade identificada



Pedidos e informações:

EPAMIG - Fazenda Experimental de Maria da Fé

CEP: 37517-000 - Maria da Fé - MG

e-mail: femf@epamig.br - Tel: (35) 3662-1227

