

SAMUEL PETRACCONI CAIXETA

**EFEITOS DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO IRRIGÂMETRO NAS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA ZONA DA MATA MINEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

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

T

C138e
2009

Caixeta, Samuel Petraccone, 1983-

Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração
estimada pelo irrigâmetro nas condições climáticas da Zona da
Mata Mineira / Samuel Petraccone Caixeta. – Viçosa, MG, 2009.
x, 40f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

Referências bibliográficas: f. 38-40.

1. Irrigação agrícola - Equipamentos e acessórios - Avaliação.
2. Evapotranspiração - Medição. 3. Evaporação (Meteorologia).
4. Temperatura. 5. Ventos - Velocidade. 6. Radiação atmosférica
7. Umidade. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

SAMUEL PETRACONE CAIXETA

**EFEITOS DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO IRRIGÂMETRO NAS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA ZONA DA MATA MINEIRA**

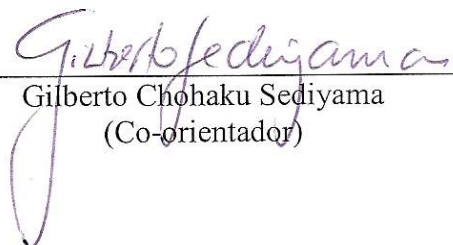
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

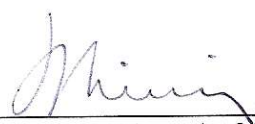
APROVADA: 13 de fevereiro de 2009.


Cristiano Tagliaferre


Edvaldo Fialho dos Reis


Mauro Aparecido Martinez


Gilberto Chohaku Sedyama
(Co-orientador)


Rubens Alves de Oliveira
(Orientador)

Aos meus pais Eliazor Campos Caixeta
e Helen Cristina do Vale Petraccone Caixeta.

OFEREÇO

À minha avó Aurelida e aos meus
irmãos Esther, Thiago, Rachel,
Izabela, Anna e Emmanuel.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo direcionamento da vida e pelas oportunidades concedidas.

Aos meus pais, pelo carinho, pela dedicação, pela confiança, pelos conselhos e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos, pela amizade, pela alegria e pelos bons momentos compartilhados.

Ao meu avô Carlos e à minha avó Aurelida, pelos ensinamentos e pela dedicação aos netos e familiares.

Aos meus avós Elisa (*in memoriam*) e Azôr, pelo carinho e pelo apoio, sobretudo no começo da minha graduação.

À minha namorada Fernanda, pelo companheirismo, pela paciência e pelo carinho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Rubens Alves de Oliveira, pela orientação, pela amizade e, sobretudo, pela confiança ao longo desses anos de convívio.

Aos professores conselheiros Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon e Márcio Mota Ramos e aos também professores Mauro Aparecido Martinez, Cosme Damião e Delly Oliveira Filho, pela atenção, pela paciência e pelos esclarecimentos.

Aos funcionários da UFV Altair, Chicão, Eduardo, Marcos, Edna, Claudenilson, Galinari, José Mauro, Renato, Graça e Maria e ao funcionário da Irrigacerto Roberto Cardoso Milagres, pela amizade, pelo apoio e pela atenção.

Aos meus amigos de Viçosa, em especial aos irmãos Júlio e Maurício, pela valiosa convivência e pela dedicação mútua que nos trouxe bons momentos e aprendizados.

Ao professor Marcos Rogério Tótola, pela amizade e por ter sido meu primeiro orientador de Iniciação Científica na UFV.

Aos meus amigos Marcelo Rossi, Cristiano Tagliaferre, Marcelo Cid, Stefeson Bezerra, Fabrício Contin, Marcos Caldeira, Gervásio Rios, Fernando França, Eugênio Teixeira, José Antônio, Ednaldo Miranda, Julio Baptestini, Caio Leite, André Tavares, Marcos Ramos, Breno Lopes, Gustavo Dantas, Francisco Vilaça, César Belém, Thalles Souza e João Zonta, pela grande amizade e pela contribuição profissional.

Aos estudantes de Iniciação Científica Caio, Luan, Éricson, Tâmara e Aline, pela colaboração nos trabalhos experimentais e, em especial, ao Enoque, pelo grande auxílio na condução dos experimentos, com seriedade e responsabilidade, e, ainda, à minha cunhada Graciele, pelo auxílio e atenção dedicados.

A todos os meus amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, por, de alguma forma, terem contribuído para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

SAMUEL PETRACCONI CAIXETA, filho de Eliazor Campos Caixeta e Helen Cristina do Vale Petraccone Caixeta, nasceu em Belo Horizonte, MG, em 14 de setembro de 1983.

Em março de 2007, formou-se em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG. Nesse mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa da dissertação em fevereiro de 2009.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5. CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS	38

RESUMO

CAIXETA, Samuel Petraccone, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2009. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nas condições climáticas da Zona da Mata mineira.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Márcio Mota Ramos e Paulo Roberto Cecon.

A quantificação do consumo de água pelas principais culturas agrícolas e o momento correto para sua aplicação são de grande valor no manejo das irrigações. Na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, foi desenvolvido um aparelho evapopluiométrico denominado Irrigâmetro, que possibilita medir a lâmina evapotranspirada e a precipitação pluvial, fornecendo diretamente o momento de irrigar e o tempo de funcionamento de um sistema de irrigação ou a sua velocidade de deslocamento. Nesta pesquisa, os objetivos foram: (a) determinar o coeficiente do Irrigâmetro (K_I) nas alturas 2, 3, 4, 5 e 6 cm do nível de água no evaporatório, para intervalos de 1, 3, 5 e 7 dias; (b) avaliar o desempenho do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração de referência nas condições da Zona da Mata mineira, nos meses em estudo; e (c) analisar os efeitos das interações dos elementos meteorológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação na evapotranspiração de referência estimada pelo Irrigâmetro operando com diferentes alturas do nível de água no evaporatório e pelo tanque Classe A. O estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro, situada na Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem, pertencente ao

Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em Viçosa, MG. O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de Irrigômetros equipados individualmente com evaporatórios operando com água nas alturas N2 = 2, N3 = 3, N4 = 4, N5 = 5 e N6 = 6 cm, tomadas a partir de um nível de referência próprio do aparelho, totalizando 15 Irrigômetros. O coeficiente K_1 foi obtido pela relação entre a estimativa de evapotranspiração da cultura obtida no Irrigômetro e a evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith FAO 56. A análise do desempenho do Irrigômetro para estimar a evapotranspiração de referência foi feita comparando-se os resultados do aparelho com os obtidos pela equação de Penman-Monteith FAO 56. A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (SEE), do coeficiente de determinação (r^2) e dos parâmetros da equação (a e b) das respectivas regressões lineares simples. A melhor alternativa foi aquela que apresentou maior r^2 , menor SEE e b próximo da unidade. A exatidão foi dada pelo índice de concordância de Willmott, representado pela letra “d”, em que os valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. Para avaliar os efeitos direto e indireto de cada componente climático sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigômetro e pelo tanque Classe A, utilizou-se a análise de trilha, em que a evapotranspiração foi a variável dependente e os elementos do clima, as variáveis independentes. O coeficiente do Irrigômetro aumentou com a elevação do nível da água dentro do evaporatório. O Irrigômetro apresentou bom desempenho na estimativa da evapotranspiração de referência nas condições climáticas da Zona da Mata mineira quando operou com os níveis de água no evaporatório 2 e 3 cm, ocorrendo a melhor estimativa no nível 2,36 cm. Pela análise de trilha, em todos os níveis de água estudados e no tanque Classe A o elemento meteorológico que apresentou maior correlação com a estimativa da evapotranspiração foi a radiação, seguida pela temperatura máxima e pela umidade relativa do ar. As menores correlações com a variável principal foram velocidade do vento e temperatura mínima, sendo ambas não significativas a 1% de probabilidade, pelo teste t. O efeito indireto da variável temperatura máxima via radiação destacou-se como o mais associado na tentativa de explicar a evapotranspiração estimada com o uso do tanque Classe A. A temperatura mínima apresentou a menor correlação com a evapotranspiração obtida no tanque Classe A, enquanto a velocidade do vento teve correlação não significativa.

ABSTRACT

CAIXETA, Samuel Petraccone, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2009. **Effects of meteorological variables in evapotranspiration estimated by the Irrigâmetro in the climate of the Zona da Mata mineira.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama, Márcio Mota Ramos and Paulo Roberto Cecon.

Quantifying the water consumption by major crops and the correct scheduling for its application are valuable issues to the irrigation management. It was developed at the Federal University of Viçosa an evapo-pluviometric equipment named Irrigâmetro, which allows measuring the evapotranspiration and the precipitation, providing the right time to irrigate, the running time for the irrigation system or its speed as well. The objectives of this research were: (a) to determine the coefficient of Irrigâmetro (K_I) to the 2, 3, 4, 5 and 6 cm water depths in the evaporator, for 1, 3, 5 and 7 days intervals; (b) evaluate the performance of the Irrigâmetro estimating the reference evapotranspiration in the Zona da Mata's climate for the months analyzed, and (c) evaluate the interactions of the meteorological elements maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, wind speed and radiation on the reference evapotranspiration estimated by the Irrigâmetro, operating with different depths of water in the evaporator and the Class A evaporation pan. The study was conducted at the Irrigâmetro Research and Development Unit, located in the Hydraulics, Irrigation and Drainage Experimental Area – Agriculture Engineering Department, Viçosa-MG. The experiment was carried out in a completely randomized design with five treatments

and three replications. The treatments consisted of Irrigâmetros equipped with evaporator operating with the following water depths: N2 = 2, N3 = 3, N4 = 4, N5 = 5 and N6 = 6 cm, taken from the own equipment reference level, totaling 15 Irrigâmetros. The K_I coefficient was obtained by the ratio between estimated crop evapotranspiration obtained by the Irrigâmetro and reference evapotranspiration obtained by the Penman-Monteith FAO 56 method. The analysis of the performance of the Irrigâmetro to estimate the reference evapotranspiration was made comparing the results with those obtained from the device to the equation Penman-Monteith FAO 56. The ranking of the evapotranspiration estimative was based on the values of the standard estimative error (SEE), coefficient of determination (r^2) and the equation parameters (a and b) of the linear regressions. The best alternative was the one that had higher r^2 , lower SEE and b near to the unit. The accuracy was amended by the WILLMOT agreement index, represented by the letter "d", where the values range from zero for no agreement to 1 for perfect agreement. To evaluate the direct and indirect effects of each climatic component on the evapotranspiration estimated by the Irrigâmetro and by Class A evaporation pan, the path analysis was used, where evapotranspiration was the dependent variable and the climatic elements were the independent variables. The coefficient of Irrigâmetro increased with the increase of water level within the evaporator, for all time intervals. The Irrigâmetro showed a good performance to estimate the reference evapotranspiration in the climatic conditions of the Zona da Mata mineira when operated with the water depths in evaporator of 2 and 3 cm, with the best estimate at 2,36 cm. For the path analysis, at all studied water depths and in the Class A pan, the weather element that showed higher correlation with the evapotranspiration estimative was the radiation, followed by maximum temperature and relative humidity. The lowest correlations with the main variable were wind speed and minimum temperature, and both were not significant with 1% of probability by the t test. The indirect effect of the variable maximum temperature through radiation stood out as the most involved in trying to explain the evapotranspiration estimated by the Class A pan. The minimum temperature was the lowest correlation with the evapotranspiration obtained from the Class A evaporation pan, while the wind speed showed no significant correlation.

1. INTRODUÇÃO

A água é indispensável à vida, sendo um recurso natural limitado dotado de valor econômico, estratégico e social, essencial à existência e bem-estar do homem e à manutenção dos ecossistemas do planeta. A escassez de água em quantidade e qualidade, tanto em nível nacional quanto mundial, está aumentando a competição entre os diversos usuários, como indústria, abastecimento humano e animal e a agricultura.

No Brasil, em um estudo desenvolvido pela Agência Nacional de Águas, Conejo (2005) estimou que a irrigação fosse responsável por quase 70% da água consumida no país. Na maioria das áreas irrigadas é comum observar ausência de manejo racional da água, geralmente resultando em aplicação excessiva, com desperdício de água e energia, além da ocorrência de problemas ambientais, ou de deficiência hídrica nas plantas, proporcionando baixa produtividade e prejuízos econômicos ao produtor. Práticas adequadas de irrigação contribuem para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos produtos agrícolas, otimizando o uso de água e energia e preservando os recursos hídricos.

O manejo da irrigação tem por finalidade, entre outras, determinar o momento de irrigar e o tempo de funcionamento do equipamento de irrigação, no caso de sistemas de irrigação por aspersão e localizada, ou a velocidade de deslocamento, em sistemas tipos pivô central e linear, com a finalidade de aplicar, sem desperdício, a quantidade de água necessária ao pleno desenvolvimento da cultura, otimizando sua produtividade.

A determinação do consumo de água das culturas é fundamental no manejo da irrigação, podendo ser obtido a partir de medidas efetuadas no solo, na planta e na

atmosfera. Os métodos baseados em medidas no solo se fundamentam na determinação do seu teor de água; os que utilizam medidas na planta consideram o monitoramento do seu potencial hídrico nas folhas, resistência estomática e temperatura da folha, entre outros; já os métodos baseados no clima consideram, desde simples medições da evaporação da água num tanque, como o Classe A, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração, como a equação de Penman-Monteith FAO 56 (ROCHA et al., 2003). A estimativa da evapotranspiração tem sido mais usada por causa da sua maior praticidade na determinação da necessidade hídrica das culturas, sobretudo devido à menor exigência de mão-de-obra e maior rapidez do processo de tomada de decisão quanto ao manejo da irrigação quando comparada com os métodos baseados no solo e na planta.

Vários métodos são utilizados com o intuito de estimar o consumo de água pelas culturas, sendo o tanque Classe A o tensiômetro e a estação meteorológica automática, as tecnologias mais usadas para fins de manejo da água de irrigação. Na prática, tem-se verificado grande resistência à adoção dessas tecnologias por parte da maioria dos produtores que trabalham com agricultura irrigada. A resistência é justificada pelas dificuldades de natureza econômica, considerando-se o custo elevado dos equipamentos e a baixa capitalização dos produtores, principalmente dos pequenos irrigantes, e de natureza técnica, visto que as tecnologias existentes exigem certo conhecimento técnico por parte do produtor, sobretudo na etapa de entrada e interpretação de dados, bem como a realização dos cálculos necessários ou a contratação de pessoal especializado.

Esses três aspectos, custo, necessidade de cálculo e conhecimento técnico, têm sido sério empecilho para o uso dessas tecnologias entre os diversos usuários de sistemas de irrigação.

No caso do uso de tensiômetros, geralmente há a necessidade de aquisição de grande quantidade de unidades para atender às diversas parcelas irrigadas, onerando a implementação do processo de manejo da irrigação, além de dificuldades técnicas para o produtor saber o tempo de irrigação. No caso de uso de estação meteorológica automática, a evapotranspiração é calculada com o uso de equações baseadas em elementos meteorológicos, como radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ar e precipitação, cujos valores são medidos e registrados por sensores. O uso dessa técnica está associado a elevados custos para o produtor, envolvendo a aquisição da estação, de computador e de programa computacional para processamento

dos dados, manutenção periódica e assistência técnica especializada, além de certo conhecimento técnico do irrigante. Nesse contexto, o uso das técnicas de manejo da água de irrigação, incluindo o tanque Classe A e, principalmente, a estação meteorológica automática, tem-se difundido apenas entre os grandes produtores que trabalham com agricultura irrigada.

O resultado final é um grande número de pequenos e médios irrigantes que não adotam manejo adequado da irrigação, gerando desperdício de água e energia e baixas produtividades das culturas, com redução da renda e aumento dos problemas sociais e ambientais advindos do uso inadequado dos recursos hídricos.

A escolha do método mais adequado depende da disponibilidade de dados meteorológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade, de manejo da irrigação ou pesquisa e do custo de aquisição de equipamentos. Esses fatores têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos para determinação da evapotranspiração para fins práticos de manejo da água de irrigação, objetivando baixo custo, fácil manuseio e confiabilidade. Nesse contexto, pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (UFV) desenvolveram e patentearam um aparelho denominado Irrigâmetro, para uso no manejo da água de irrigação.

O Irrigâmetro é um aparelho evapopluiométrico que engloba os princípios relacionados ao manejo da irrigação no que se refere às características da cultura, do solo, do clima e do sistema de irrigação, visando otimizar o uso da água na agricultura irrigada. O aparelho estima a evapotranspiração e mede a lâmina precipitada, fornecendo diretamente o momento de irrigar e o tempo de funcionamento de um sistema de irrigação ou a sua velocidade de deslocamento, no caso de pivô central ou linear, sem a necessidade de cálculos.

Tendo em vista o exposto anteriormente, objetivou-se neste trabalho: (a) Determinar o coeficiente do Irrigâmetro (K_I) nas alturas 2, 3, 4, 5 e 6 cm do nível de água no evaporatório, com base na estimativa de evapotranspiração da cultura obtida no Irrigâmetro e na evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos de 1, 3, 5 e 7 dias; (b) Avaliar o desempenho do Irrigâmetro para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0), nas condições da Zona da Mata mineira, nos meses em estudo; e (c) Analisar os efeitos das interações dos elementos meteorológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação na evapotranspiração de referência estimada

pelo Irrigâmetro operando com diferentes alturas do nível de água no evaporatório e pelo tanque Classe A.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A evaporação é um processo físico dependente das condições do ambiente, principalmente da energia, sendo dependente dos elementos do clima, como radiação, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa, entre outros. O uso de tanques para medição da evaporação da água, para fins de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0), deve considerar as suas condições de instalação e os fatores intrínsecos ao próprio tanque.

Valero e Mañas (1993) citaram que o albedo e a rugosidade da superfície da água livre, a cor do tanque, a sua forma e o nível da lâmina livre de água no seu interior constituem grandes fontes de erros, podendo atingir 15% do valor medido em tanque Classe A, quando a superfície da água fica 10 cm abaixo do nível-padrão que é aquele compreendido entre 5 e 7,5 cm da borda do tanque.

Ainda assim, o tanque Classe A é um dos equipamentos mais utilizados para estimativa da ET_0 no manejo da água de irrigação. Segundo Sedyama (1996), o maior uso desse equipamento se deve à sua praticidade e aos baixos custos de instalação e manutenção. De acordo com Smith (1991), quando bem conduzido, esse método oferece resultados confiáveis na determinação da evapotranspiração de referência.

Utilizando tanque Classe A na determinação da evaporação e evapotranspiração, Amorim (1998) não obteve resultados satisfatórios para valores diários; porém, com o uso de médias de cinco dias, esse equipamento apresentou resultados equivalentes ao método Penman-Monteith FAO 56. Jensen et al. (1990) recomendaram o uso do tanque Classe A nos intervalos de tempo superiores a sete dias.

O método se baseia na medição da evaporação da água num tanque padronizado, cujo valor é convertido em estimativa da evapotranspiração de referência, por meio de coeficientes específicos dependentes do clima, do tipo de tanque e da bordadura circundante (DOORENBOS; PRUITT, 1977), de acordo com a expressão:

$$ET_0 = K_t E_v \quad (1)$$

em que ET_0 = estimativa da evapotranspiração de referência, mm; K_t = coeficiente do tanque; e E_v = evaporação medida no tanque, mm.

A determinação da evapotranspiração de referência constitui-se num fator básico para quantificar o total de água necessário por uma cultura durante o seu ciclo. As plantas, nos seus diferentes estádios de desenvolvimento, apresentam diferentes necessidades de água, podendo ser quantificada por:

$$ET_c = K_c K_t E_v \quad (2)$$

em que ET_c = estimativa da evapotranspiração da cultura, mm; e K_c = coeficiente da cultura.

O coeficiente da cultura (K_c) varia com o tipo de cultura e a sua fase de desenvolvimento, com as condições climáticas e com os tratos culturais, uma vez que as variáveis citadas influenciam a perda de água pela planta.

Diversos autores relataram a metodologia usada para estimar a evapotranspiração de referência a partir da evaporação medida no tanque Classe A. No entanto, são escassas as informações sobre a influência da variação do nível da água dentro do tanque no processo da evaporação, assim como o efeito da bordadura na parede do tanque, evitando-se a incidência direta da radiação solar sobre ela e, com isso, reduzindo a transferência de calor da parede para a massa de água.

Pereira et al. (1997) citaram os experimentos de Sleight (1917), que trabalhou com tanques evaporímetros de várias dimensões e enterrados, com borda a 0,08 m acima do nível do solo e profundidade da água igual a 0,83 m, mostrando que a taxa de evaporação diminui exponencialmente com o aumento da área do tanque, provavelmente devido à maior massa de água. No tanque de 0,305 m de diâmetro, a água evaporou cerca de 55% mais do que no tanque de 3,66 m. Esse autor verificou

também que, ao se manter a área fixa, com diâmetro igual a 0,61 m e a altura do nível de água variando entre 0,08 e 1,75 m, não houve diferença significativa na evaporação.

Tagliaferre (2007), avaliando dois minievaporímetros UFV-1 operando sem bordadura e UFV-2 operando com bordadura preenchida com água, observou que o aumento no diâmetro dos evaporatórios, de 97 para 244 mm, reduziu a evaporação de 6,15 para 4,2 mm d⁻¹ e de 4,92 para 4,50 mm d⁻¹, respectivamente, e concluiu que, à medida que aumentou o diâmetro do evaporatório dos dois tipos de minievaporímetros, a evaporação diminuiu exponencialmente.

Atualmente, existem várias metodologias para determinar os parâmetros técnicos para o manejo da irrigação, porém dá-se maior destaque aos sistemas que, com simplicidade e funcionalidade, estimam o consumo de água pelas culturas, ou seja, a evapotranspiração.

O modelo proposto por Monteith (1965), denominado método de Penman-Monteith FAO 56, é uma alternativa para estimar a evapotranspiração de uma cultura agrícola, por ser estruturado dentro dos conceitos da termodinâmica atmosférica associada aos parâmetros de resistência que os vegetais apresentam às adversidades do local e do clima, que são as resistências aerodinâmica e estomática. Esse modelo foi padronizado pela FAO para cálculo da evapotranspiração de referência, e vários pesquisadores comprovaram a sua eficácia na estimativa da ET₀.

De acordo com Allen (1986) e Allen et al. (1989), o modelo de Penman-Monteith apresenta estimativas confiáveis e consistentes de ET₀, sendo considerado aquele de melhor desempenho entre os métodos combinados. A evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith para médias de dados horários representa melhor o consumo de água pelas culturas, comparativamente ao mesmo método quando empregado para médias diárias das variáveis meteorológicas, visto que a estimativa a partir de dados horários tende a expressar as condições climáticas em dimensões mais próximas da realidade. O cálculo da ET₀ horária, pelo referido método, é realizado utilizando-se a Equação 3.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (3)$$

em que ET_0 = evapotranspiração de referência, mm h^{-1} ; R_n = saldo de radiação à superfície, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; G = densidade do fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; T_{hr} = temperatura média horária do ar, $^{\circ}\text{C}$; Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor à temperatura T_{hr} , $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ = coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; $e^{\circ}(T_{hr})$ = pressão de saturação de vapor à temperatura T_{hr} , kPa ; e_a = pressão parcial de vapor, média horária, kPa ; e u_2 = velocidade média horária do vento, m s^{-1} .

O método de Penman é classificado como um método combinado, de acordo com Jensen et al. (1990), pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração.

A equação 3 é uma representação matemática dos fatores físicos que governam o processo de evapotranspiração e define a evapotranspiração de referência (ET_0) com base em uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, assemelhando-se à evaporação de uma extensa superfície de grama verde, com altura uniforme, de crescimento ativo e adequado teor de água no solo.

Em condições de manejo da irrigação com uso do Irrigâmetro, o produtor não precisa ter conhecimento técnico sobre irrigação, pois o aparelho é calibrado previamente, sendo necessário apenas o correto manuseio sem ter que adquirir computador, programa computacional ou efetuar cálculos, os quais são complexos para a quase totalidade dos irrigantes brasileiros.

De acordo com os resultados obtidos por Tagliaferre (2007), o Irrigâmetro pode ser usado para estimar a evapotranspiração de qualquer cultura, em qualquer estágio de desenvolvimento, para um valor de coeficiente de cultura (K_c).

O aparelho é de fácil operação, a qual consiste simplesmente em abertura e fechamento de válvulas nele existentes, obedecendo-se uma sequência predefinida. O Irrigâmetro é um aparelho de grande versatilidade, podendo ser ajustado para fornecer diretamente a evapotranspiração de referência ou a evapotranspiração da cultura, em qualquer estágio de seu desenvolvimento. Isso é possível, mudando-se a altura do evaporatório, o que implica variação da evaporação e, conseqüentemente, da estimativa da evapotranspiração pelo Irrigâmetro (OLIVEIRA; RAMOS, 2008).

O Irrigâmetro tem-se mostrado capaz de estimar a evapotranspiração com boa precisão (OLIVEIRA et al., 2008), e esse processo depende diretamente dos elementos meteorológicos e suas inter-relações associados ao correto ajuste do aparelho.

Em condições de campo, os elementos climáticos são frequentemente interdependentes, o que dificulta o entendimento do efeito de um ou outro elemento isoladamente sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro ou pelo tanque Classe A.

As investigações físicas evidenciam que a água perdida no processo de evapotranspiração em superfície vegetada e nos equipamentos que medem a evaporação e evapotranspiração depende de três componentes do clima:

- O primeiro descreve o processo energético, incluindo os processos de radiação, fluxo de calor do solo e temperatura do ar.
- O segundo descreve a aceitabilidade da atmosfera para o vapor de água, incluindo os parâmetros de umidade do ar ou o déficit de saturação.
- O terceiro representa o transporte do vapor de água ou a reposição da umidade pela massa de ar seco. Nesse sistema são incluídos a velocidade do vento, o efeito dos turbilhões e as difusividades.

Esses componentes não atuam separadamente na natureza, mas aparecem em várias combinações e efeitos recíprocos, interagindo e influenciando, de forma significativa, o processo da evapotranspiração nas diferentes condições climáticas.

Para entender melhor as associações entre diferentes variáveis, Wright (1921) propôs um método de desdobramento dos coeficientes de correlação. Esse método é denominado análise de trilha ou análise de caminamento. A análise de trilha consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de variáveis explicativas sobre uma variável básica, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, constituindo-se numa expansão da regressão múltipla, em que as variáveis são previamente padronizadas.

A importância da correlação entre variáveis reside no fato de se poder avaliar quanto da alteração de uma variável pode afetar as demais, porém podem também ocorrer alguns equívocos quando da quantificação da magnitude das correlações entre as variáveis. A alta correlação entre duas variáveis pode ser o resultado de uma terceira sobre elas, ou de um grupo de variáveis (CRUZ; REGAZZI, 1997). Assim, apesar da utilidade dessas estimativas no entendimento de uma variável complexa como a evapotranspiração, elas não determinam a importância relativa das influências diretas e indiretas das diversas variáveis explicativas que compõem a variável principal.

O sucesso da análise de trilha reside basicamente na formulação do relacionamento causa-efeito entre as variáveis; além disso, o desdobramento de

correlações é dependente do conjunto de caracteres estudados, que normalmente é estabelecido pelo conhecimento prévio do pesquisador de sua importância e de possíveis inter-relações expressas em diagramas de trilha (CRUZ; REGAZZI, 1994).

Os coeficientes de trilha (efeito direto) podem ser comparados entre si e com o efeito da variável residual, que é utilizado como referencial para a importância do efeito direto da variável explicativa sobre a variável principal. Quando o coeficiente de trilha (efeito direto) de uma variável explicativa for, em módulo, menor que o coeficiente da variável residual, mas o coeficiente de determinação (efeito total) for maior que o efeito da variável residual, isso significa que essa variável explicativa influencia a variável principal apenas indiretamente, sendo sua importância só em conjunto. Se o coeficiente de trilha for, em módulo, maior que o coeficiente da variável residual, ele indica que existe efeito direto da variável explicativa sobre a principal.

Quando as variáveis estão correlacionadas entre si, diz-se que há inter-relação ou multicolinearidade. De modo geral, as análises de trilha não têm considerado os efeitos adversos da multicolinearidade sobre os estimadores de quadrados mínimos, adotados para resolução dos sistemas de equação. Dessa forma, os resultados podem não ser confiáveis (CARVALHO, 1995).

A multicolinearidade ocorre quando uma matriz quadrada possui determinante nulo, conhecida como matriz singular. Isso acontece quando, na matriz de correlação, há presença de relação linear entre todos os elementos de uma linha ou coluna. A matriz singular não possui matriz inversa, sendo esta essencial para o desdobramento da correlação de Pearson em efeitos diretos e indiretos.

Os problemas causados pela multicolinearidade não são devidos simplesmente à sua presença, mas sim ao grau que se manifesta. Existindo multicolinearidade, em níveis considerados moderados a severos, entre um conjunto de variáveis explicativas, torna-se difícil avaliar a influência destas sobre a resposta na variável principal, e ignorar seus efeitos pode provocar resultados danosos ou absurdos.

Diagnósticos de multicolinearidade devem, dessa forma, ser feitos de maneira a viabilizar certos estudos. Carvalho (1995) ressaltou a importância desse estudo quando se tem o objetivo de realizar análise de regressões, de trilha e de correlações parciais, entre outras.

A análise de trilha, nos casos em que se considera um único modelo causal, é simplesmente uma análise de regressão parcial padronizada, sendo útil no desdobramento dos coeficientes de correlação em efeitos direto e indireto.

A obtenção de informações relativas à influência de elementos meteorológicos no processo da evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro é importante para o entendimento das relações físicas e dos aspectos micrometeorológicos das diferentes regiões e ambientes do planeta e possibilita um estudo mais seguro para estimar a evapotranspiração das culturas, permitindo aos irrigantes ser mais criteriosos no momento de manejar a irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro, situada na Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em Viçosa, MG. Localizada a 20°45' de latitude Sul e 42°51' de longitude Oeste, numa altitude de 651 m, a região apresenta o clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo Cwb, caracterizado por clima tropical de altitude com verão chuvoso e temperaturas amenas.

A coleta de dados ocorreu no período de março a outubro de 2008. Diariamente, foram feitas leituras nos Irrigômetros e no tanque Classe A, às nove horas da manhã.

Foram instalados dois tanques Classe A em aço inoxidável e micrômetro de gancho com precisão de medida do nível da água de 0,02 mm, assentado sobre estrado de madeira, ficando a aproximadamente 15 cm da superfície do solo gramado. O nível de água variou entre 5 e 7 cm da borda do tanque de leitura, sendo reabastecido, com a água do tanque adjacente, sempre que o nível se aproximava de 7 cm da borda.

Foi instalado um conjunto de 15 Irrigômetros dispostos lado a lado, espaçados de 2,5 por 1,5 m, com o braço do evaporatório voltado para o norte, de maneira que não houvesse sombreamento de nenhum evaporatório.

Os dados horários de radiação, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura do ar foram coletados numa estação meteorológica automática modelo Vantage Pro II, instalada no local do experimento.

Na Figura 1, pode-se ver o croqui de instalação dos equipamentos na área experimental.

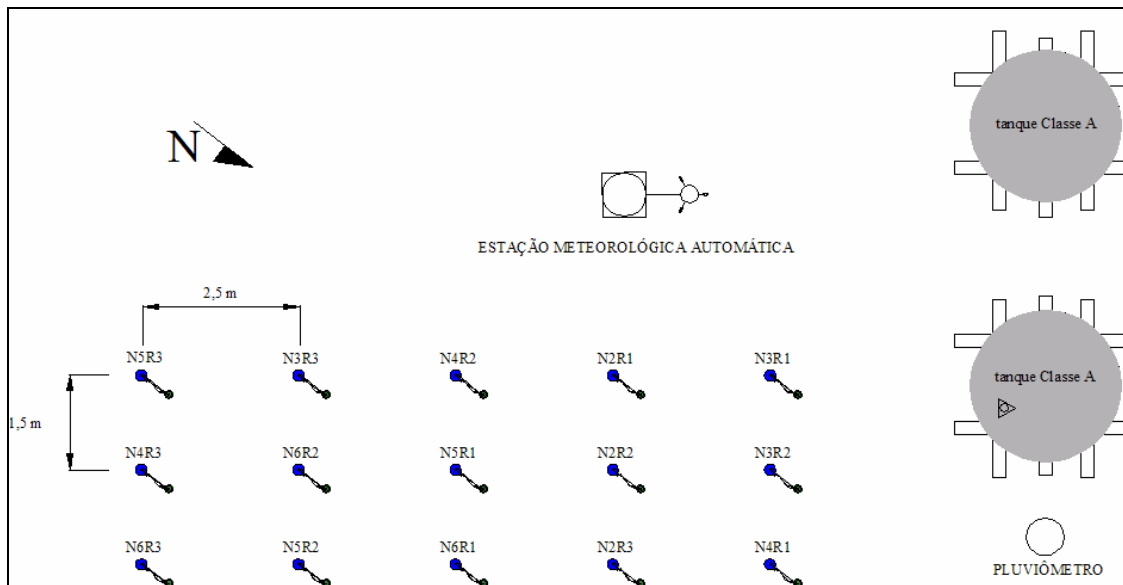


Figura 1 – Croqui da área do experimento.

Os valores médios horários de umidade relativa e temperatura do ar foram calculados aplicando-se as seguintes equações:

$$UR \text{ med} = \left[\frac{(U.R.\text{inst.h-1} + U.R.\text{inst.h.})}{2} \right] \quad (4)$$

$$T \text{ med} = \left[\frac{(T.\text{inst.h-1} + T.\text{inst.h.})}{2} \right] \quad (5)$$

em que U.R. inst. h-1 = Umidade relativa instantânea da hora anterior, %; U.R. inst. h = Umidade relativa instantânea da hora avaliada, %; T. inst.h-1 = Temperatura instantânea da hora anterior, °C; e T. inst.h = Temperatura instantânea da hora avaliada, °C.

Os valores horários de temperatura e umidade relativa instantânea equivalem à média de seis valores observados do elemento meteorológico, obtidos a cada 10 segundos no último minuto de cada hora.

A umidade relativa e temperatura horária foram obtidas pela média entre os valores instantâneos da hora avaliada e da hora anterior, uma vez que representa melhor a contribuição dos elementos meteorológicos no processo de evapotranspiração.

A evapotranspiração de referência diária obtida pelo método de Penman-Monteith FAO 56 resultou da soma da ET_0 horária, obtida com o auxílio do aplicativo computacional REF-ET (ALLEN, 2000) e de planilhas eletrônicas.

Na análise dos resultados foram excluídos os dias com ocorrência de precipitação pluvial, pois a chuva afeta a leitura da lâmina evaporada ou evapotranspirada e, conseqüentemente, a qualidade dos dados. Diariamente, foi observado se houve condensação de água nas paredes do evaporatório do Irrigâmetro para que, com o auxílio de uma seringa, fosse feita a retirada do orvalho.

Inicialmente, fez-se a leitura no Irrigâmetro, e logo após retirou-se a água condensada no evaporatório, e fez-se uma nova leitura, de forma que não foi necessário quantificar o orvalho.

A estimativa da evapotranspiração pelo Irrigâmetro foi obtida com o uso de 15 Irrigâmetros (Figura 1) operando com diferentes alturas do nível de água no evaporatório, e a ET_0 diária, pelo método Penman-Monteith FAO 56, foi adotada como padrão, conforme proposto por Smith (1991) e Allen et al. (1998), obtida pelo somatório das ET_0 horárias.

Para determinar o coeficiente do Irrigâmetro para cada altura de nível de água no evaporatório, bem como a influência dos elementos meteorológicos associados a essas alturas, o experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos e três repetições, totalizando 15 Irrigâmetros. Os tratamentos consistiram de Irrigâmetros equipados individualmente com evaporatórios operando com água nas seguintes alturas: N2 = 2 cm, N3 = 3 cm, N4 = 4 cm, N5 = 5 cm e N6 = 6 cm, tomadas a partir de um nível de referência próprio do aparelho, sendo que, ao contrário do tanque Classe A em que o nível da água é tomado em relação à borda do tanque, no Irrigâmetro o valor referente ao nível dentro do evaporatório é marcado em ordem crescente do fundo para a borda.



Figura 2 – Irrigômetros utilizados no experimento.

Em cada tratamento foi determinado um coeficiente médio para o Irrigômetro, denominado K_I , calculado pela relação entre a evapotranspiração estimada no Irrigômetro (ET_I) e a evapotranspiração de referência (ET_0), de acordo com a equação 6.

$$K_I = \frac{ET_I}{ET_0} \quad (6)$$

Os valores de K_I , obtidos nas respectivas alturas do nível de água no evaporatório, foram utilizados na obtenção da equação de regressão, que possibilitou encontrar a altura correspondente ao K_I igual a 1.

Foram obtidas as equações de regressão linear simples e os respectivos valores do coeficiente de determinação da evapotranspiração estimada pelo Irrigômetro operando em diferentes níveis de água no evaporatório, comparativamente com o método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos diários e médias de 3, 5 e 7 dias.

A análise do desempenho do Irrigômetro para estimar a evapotranspiração de referência foi feita comparando-se os resultados obtidos no aparelho com os da equação

de Penman-Monteith FAO 56. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi aquela proposta por Allen et al. (1989), a qual se fundamenta no erro-padrão da estimativa (SEE), calculado pela equação:

$$SEE = \left(\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

em que SEE = erro-padrão da estimativa, mm d⁻¹; y = evapotranspiração de referência estimada por Penman-Monteith, mm d⁻¹; \hat{y} = evapotranspiração de referência estimada pelo Irrigâmetro, mm d⁻¹; e n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (SEE), do coeficiente de determinação (r²) e do coeficiente angular (b) das respectivas regressões lineares simples. A melhor alternativa foi aquela que apresentou maior r², menor SEE e b próximo da unidade.

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação, a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A exatidão está relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (8)$$

em que d = índice de concordância ou ajuste; P_i = evapotranspiração de referência obtida pelo Irrigâmetro, mm d⁻¹; O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹; \bar{O} = média dos valores obtidos pelo método-padrão, mm d⁻¹; e n = número de observações.

Para obter a evapotranspiração com o uso do tanque Classe A, multiplicou-se o valor diário de evaporação pelo coeficiente do tanque K_t, cujos valores diários foram obtidos com o auxílio de planilha eletrônica.

As estimativas diárias da ET_0 pelo método do tanque Classe A foram obtidas a partir do valor do coeficiente do tanque (Kt) proposto por Doorembos e Pruitt (1977), para solo gramado em torno do tanque, adotando-se bordadura fixa de 5 m, conforme a Equação 9.

$$Kt = 0,108 - 0,000331 U_2 + 0,0422 \ln(\text{bordadura}) + 0,1434 \ln(UR_{\text{média}}) - 0,000631 [\ln(\text{bordadura})]^2 [\ln(UR_{\text{média}})] \quad (9)$$

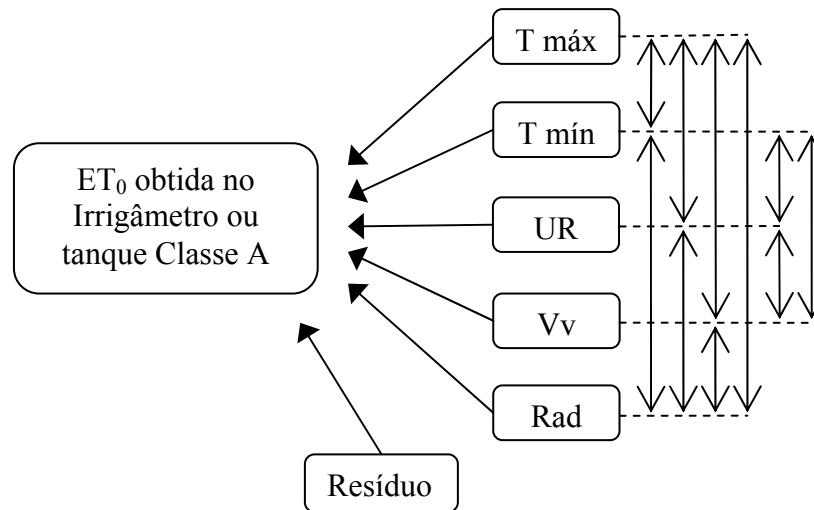
em que $UR_{\text{média}}$ = umidade relativa média, %; U_2 = velocidade do vento a 2 m, $m s^{-1}$; e bordadura = área gramada circundando o tanque, igual a 5 m.

Foram realizadas avaliações dos efeitos dos elementos meteorológicos na estimativa da evapotranspiração obtida no Irrigâmetro, operando com diferentes níveis de água no evaporatório e no tanque Classe A.

O modelo adotado neste estudo foi a análise de trilha (*path analysis*), pois possibilita realçar os efeitos diretos e indiretos de um conjunto de variáveis climáticas sobre uma variável principal e verificar a importância de um ou mais elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro e pelo tanque Classe A.

As variáveis explicativas foram previamente escolhidas, e fez-se, inicialmente, a análise de correlação linear simples (correlação de Pearson), utilizando o programa estatístico GENES 2007.0.0 (Análise de Métodos Biométricos Aplicados à Genética Quantitativa e Estatística Experimental), para obter as matrizes de correlação e suas significâncias pelo teste “t”, em níveis de 1 e 5% de probabilidades. Posteriormente, foi feita a análise de trilha, com os objetivos de estimar correlações e analisar a relação entre as variáveis explicativas temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação pelos seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos sobre a variável básica determinada como a evapotranspiração obtida nos Irrigâmetros equipados com evaporatórios operando com água nas alturas N2, N3, N4, N5 e N6, correspondentes aos níveis 2, 3, 4, 5 e 6 cm, respectivamente, e, ainda, a evapotranspiração estimada com o uso do tanque Classe A.

Na Figura 3, mostra-se o diagrama utilizado para a melhor interpretação dos resultados da análise de trilha, que desdobra os coeficientes de Pearson em efeitos diretos e indiretos.



Obs.: As setas unidirecionais indicam o efeito direto de uma variável explicativa sobre a principal, enquanto as setas bidirecionais representam a interdependência de duas variáveis explicativas e determinam a trilha representativa do efeito indireto sobre a variável básica.

Figura 3 - Diagrama causal indicando o inter-relacionamento das variáveis explicativas T_{máx} = temperatura máxima; T_{mín} = temperatura mínima; Ur = umidade relativa; V_v = velocidade do vento; e Rad = radiação sobre a variável principal, evapotranspiração obtida no Irrigâmetro ou no tanque classe "A".

Foi realizada a avaliação de multicolinearidade, de acordo com o sugerido por Cruz e Regazzi (1997), em que foi detectada multicolinearidade severa da variável temperatura média em todos os tratamentos. Essa variável foi eliminada, e procedeu-se novamente à análise, sendo obtido, depois da exclusão, apenas multicolinearidade fraca.

Uma vez resolvido o problema de multicolinearidade, foi feita outra vez a análise de trilha, sendo os resultados dispostos em tabelas para facilitar a interpretação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4, 5 e 6, encontram-se os valores médios diários dos elementos meteorológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência, obtidos durante o período estudado.

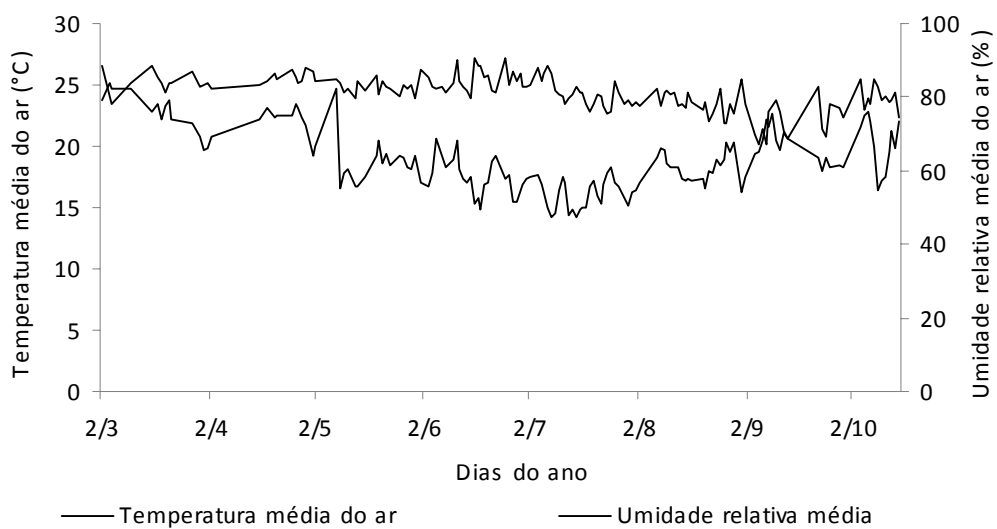


Figura 4 – Valores diários da temperatura e da umidade relativa média do ar durante o período experimental.

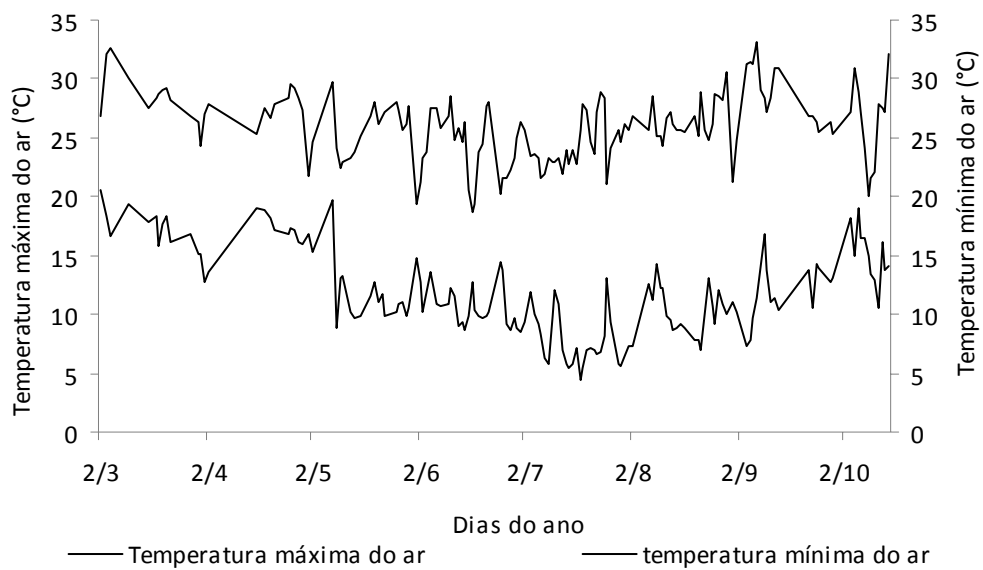


Figura 5 – Valores diários da temperatura máxima e da temperatura mínima do ar durante o período experimental.

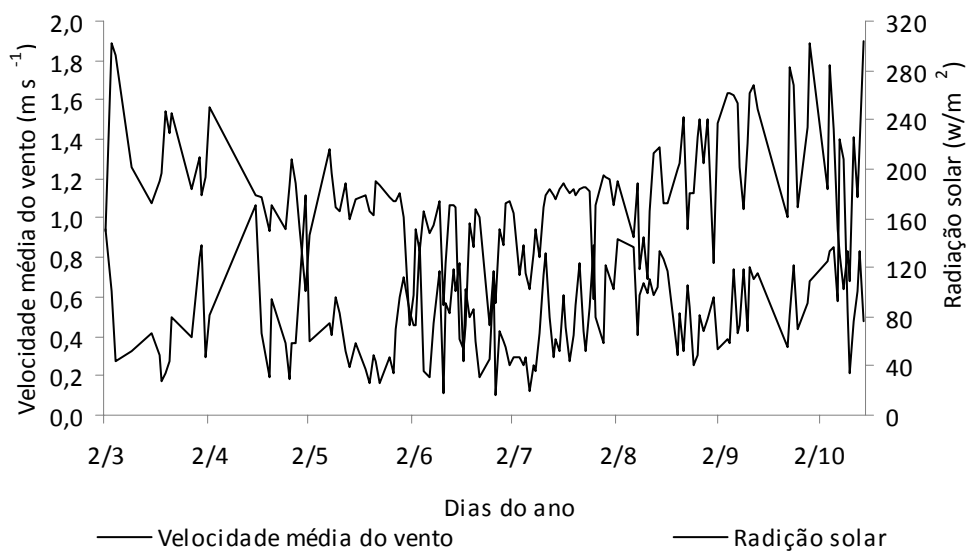


Figura 6 – Valores diários da velocidade média do vento e da radiação solar ao longo do período experimental.

A evaporação da água é dependente do suprimento de calor (radiação), da temperatura do ar, do déficit de pressão parcial de vapor sobre a superfície evaporante e da velocidade do vento. Durante o período experimental, observou-se que os valores de umidade relativa do ar variaram pouco. Na Figura 4, a umidade relativa média diária foi, na maioria das vezes, superior a 70%, classificada como alta, com a ocorrência de poucos valores extremos, sendo 67,3% e 90,9% os valores mínimo e máximo no período avaliado, e a temperatura média do ar foi de 18,8 °C. Na Figura 5, as médias das temperaturas máxima e mínima foram de 26 °C e 11,7 °C, respectivamente. Na Figura 6, a velocidade média do vento foi inferior a 2 ms⁻¹, considerada leve, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977). A radiação média do período em estudo foi de 178,4 Wm⁻², equivalente a 15,4 MJ m⁻²d⁻¹.

Na Tabela 1, encontra-se o resumo da análise de variância dos dados de evapotranspiração obtidos no Irrigâmetro para os diferentes níveis de água dentro do evaporatório.

Tabela 1 – Resumo da análise de variância para os níveis de água dentro do evaporatório

Fonte de Variação	GL	QM
Níveis da água	4	1,9211*
Resíduo	10	0,047489
Coefficiente de variação (%)		5,87

* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

A evapotranspiração obtida no Irrigâmetro foi significativamente afetada pelo aumento do nível de água dentro do evaporatório.

Na Figura 7, apresentam-se os valores do coeficiente do Irrigâmetro em função dos diferentes níveis de água no evaporatório.

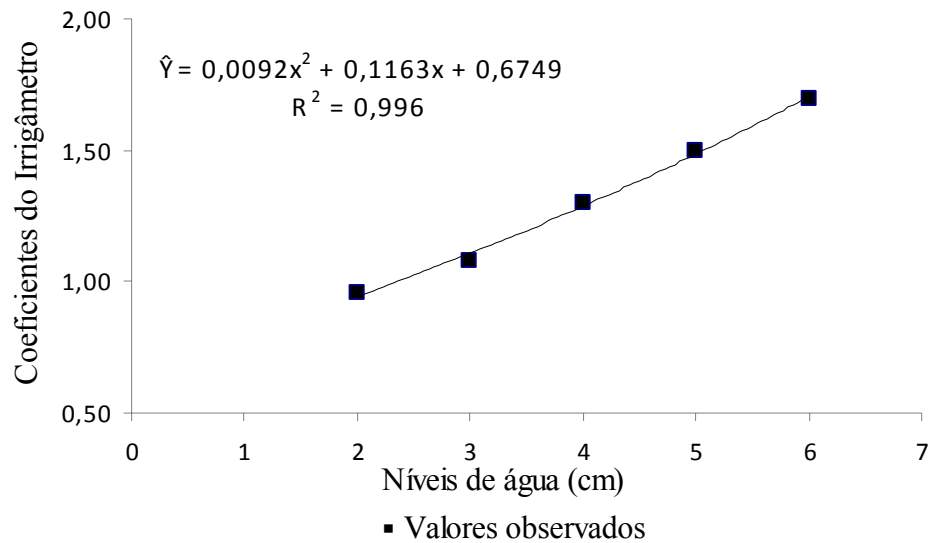


Figura 7 – Coeficientes do Irrigâmetro em função dos níveis de água no evaporatório.

Observa-se na Figura 7 que os valores dos coeficientes do Irrigâmetro aumentaram com o nível da água dentro do evaporatório. O bom ajuste desse modelo aos dados obtidos indica que a equação de regressão pode ser utilizada para determinar os níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro para obter diretamente a evapotranspiração de referência. Para conseguir a estimativa da evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro na região da zona da mata mineira, deve-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório correspondente ao K_I igual a 1, ou seja, próximo a 2,36 cm, de acordo com a equação de regressão, nas condições climáticas da Zona da Mata mineira reinantes durante o período experimental.

Na Tabela 2, encontram-se os coeficientes do Irrigâmetro (K_I), erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (r^2) e coeficiente angular (b), obtidos dos valores de ET estimados no Irrigâmetro para cada nível de água no evaporatório.

Tabela 2 – Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro (K_I), erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (r^2), parâmetros da equação de regressão (a e b) e valores de ET, em intervalos diários

	K_I	SEE	d	r^2	a	b	ET ₀ (mm d ⁻¹)
PM - FAO 56							2,85
Nível 2 cm	0,96	0,62	0,93	0,58	0,414	0,81	2,72
Nível 3 cm	1,08	0,61	0,93	0,65	0,478	0,91	3,07
Nível 4 cm	1,30	1,06	0,84	0,67	0,669	1,06	3,69
Nível 5 cm	1,50	1,64	0,72	0,71	0,385	1,37	4,27
Nível 6 cm	1,69	2,18	0,62	0,72	0,512	1,51	4,82

Na Tabela 2, observa-se que a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro aumentou com a elevação do nível de água dentro do evaporatório. À medida que aumentou o nível de água dentro do evaporatório, houve ampliação da área exposta à atmosfera e, conseqüentemente, maior interceptação da radiação solar, variável que exerce grande influência no processo da evaporação (CHANG, 1971), ao mesmo tempo em que favorece a ação do vento, atuando na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante, acarretando em maiores valores de evaporação. No entanto, quando o nível da água permaneceu mais distante da borda do evaporatório ocorreram diminuição da área exposta à atmosfera e maior sombreamento da água no seu interior, provavelmente diminuindo o efeito da radiação e da velocidade do vento. Resultados como esses foram encontrados por Tagliaferre (2006) em estudos envolvendo os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado.

No período avaliado, o Irrigâmetro operando com os níveis de água no evaporatório nos níveis N2 e N3 apresentou o menor erro-padrão da estimativa e o maior índice de concordância, sendo, entre os dois, o nível N3 aquele que teve maior r^2 e b mais próximo da unidade e, portanto, obteve melhor desempenho para estimativa da ET₀. Assim, os Irrigâmetros operando com o evaporatório nos níveis N2 e N3 apresentaram resultados confiáveis para a estimativa da ET₀ em intervalos diários que, associados ao baixo custo e à alta praticidade, tornam esses aparelhos indicados para fins de manejo da água de irrigação.

Na Figura 8, encontram-se os dados diários de evapotranspiração estimados pelo Irrigâmetro operando em diferentes níveis de água no evaporatório, comparativamente ao método de Penman-Monteith FAO 56, as equações de regressão e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2).

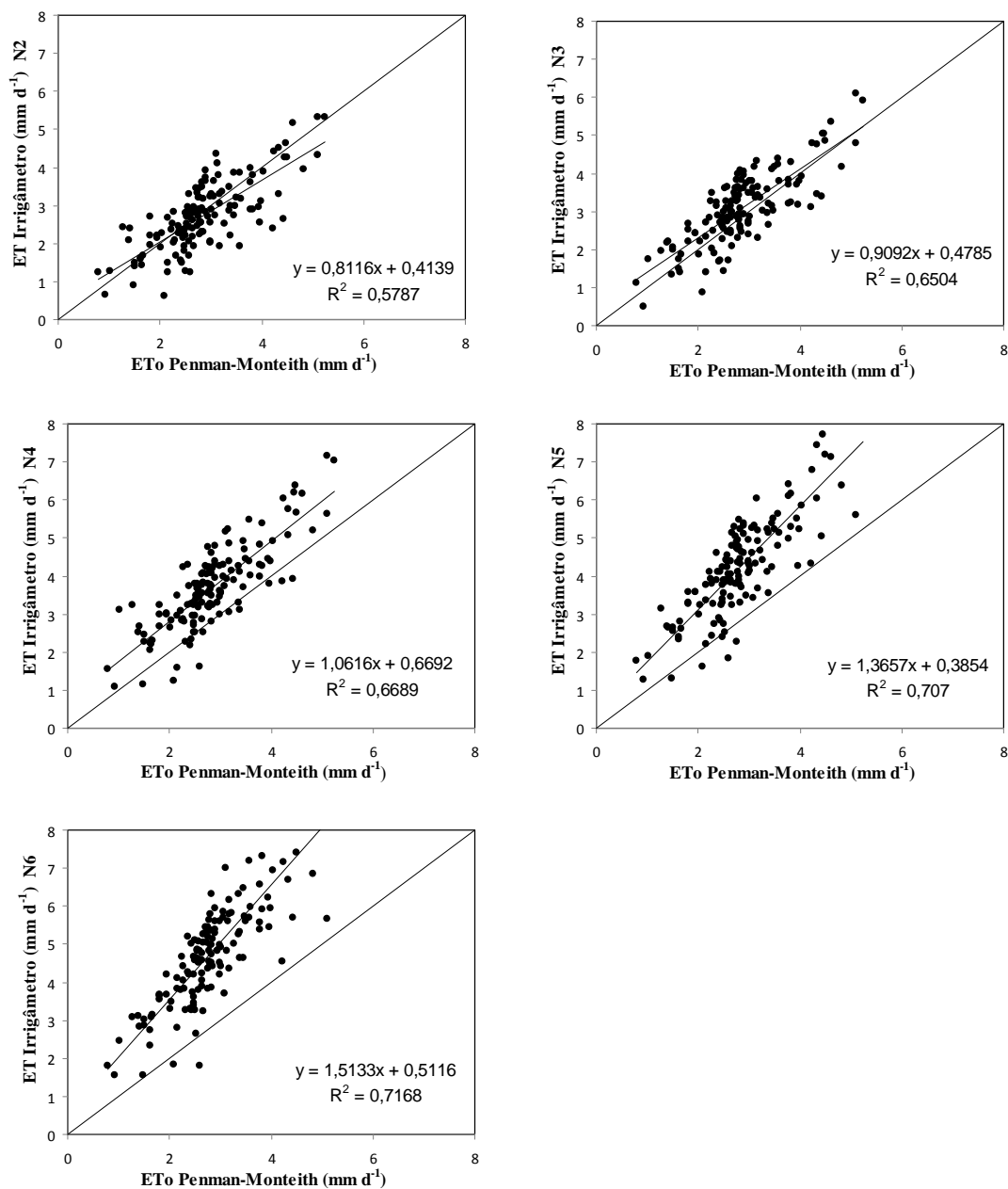


Figura 8 – Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro para diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET_0 obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos diários.

Na Figura 8, observa-se que o Irrigâmetro operando com água no nível N2 superestimou a evapotranspiração para valores menores que 2,2 mm d⁻¹ e subestimou para valores maiores. Em relação às alturas N3, N4, N5 e N6, o Irrigâmetro superestimou a ET₀ obtida pelo método Penman-Monteith; contudo, no nível N3 a linha de tendência para o Irrigâmetro praticamente acompanha a linha de valores 1:1, considerando-se o método de Penman-Monteith – FAO 56 como padrão.

As comparações dos níveis de água no evaporatório nos períodos de três, cinco e sete dias seguiram a mesma metodologia estatística aplicada na escala diária, sendo apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro (K_I), erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (r²), parâmetros da equação de regressão (a e b) e valores de ET, em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente

	K _I	SEE	d	r ²	a	b	ET ₀ (mm d ⁻¹)
Intervalo de 3 dias							
PM - FAO 56							2,82
Nível 2 cm	0,96	0,25	0,89	0,65	0,374	0,83	2,72
Nível 3 cm	1,08	0,27	0,89	0,70	0,415	0,93	3,05
Nível 4 cm	1,30	0,56	0,69	0,68	0,674	1,06	3,67
Nível 5 cm	1,51	0,90	0,55	0,74	0,293	1,40	4,26
Nível 6 cm	1,70	1,21	0,44	0,73	0,497	1,53	4,81
Intervalo de 5 dias							
PM - FAO 56							2,85
Nível 2 cm	0,96	0,18	0,89	0,65	0,480	0,79	2,72
Nível 3 cm	1,08	0,17	0,90	0,76	0,588	0,87	3,07
Nível 4 cm	1,30	0,42	0,66	0,69	0,863	0,99	3,69
Nível 5 cm	1,50	0,68	0,52	0,76	0,508	1,32	4,27
Nível 6 cm	1,69	0,93	0,42	0,73	0,711	1,44	4,82
Intervalo de 7 dias							
PM - FAO 56							2,85
Nível 2 cm	0,96	0,14	0,89	0,66	0,536	0,77	2,72
Nível 3 cm	1,08	0,14	0,90	0,74	0,658	0,85	3,07
Nível 4 cm	1,30	0,35	0,66	0,68	0,992	0,95	3,69
Nível 5 cm	1,50	0,57	0,51	0,73	0,681	1,26	4,27
Nível 6 cm	1,69	0,78	0,42	0,71	0,858	1,39	4,82

Na Tabela 3, observa-se que o agrupamento da evapotranspiração em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente, resultou em pequeno aumento do coeficiente de determinação, em uma leve redução do índice de concordância e uma grande redução do erro-padrão da estimativa, com valores mais próximos de zero, na maioria das profundidades estudadas, comparativamente ao intervalo de tempo diário.

Nos agrupamentos de três, cinco e sete dias, o Irrigâmetro operando com os níveis de água no evaporatório 2 e 3 cm apresentou menor erro-padrão da estimativa e maior índice de concordância, indicando melhor desempenho para a estimativa da ET_0 , diante dos demais níveis estudados.

Nas Figuras 9, 10 e 11, apresentam-se os dados de evapotranspiração estimados pelo Irrigâmetro operando em diferentes níveis de água no evaporatório comparativamente ao método de Penman-Monteith FAO 56, as equações de regressão e os valores do coeficiente de determinação, em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente.

A análise das Figuras 9, 10 e 11 indicou que o agrupamento dos valores de ET_0 em períodos maiores tende a melhorar a estimativa da ET_0 . Contudo, observou-se que o Irrigâmetro operando com água no nível N4, N5 e N6, assim como em intervalos diários, superestima a evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith.

Nos intervalos de tempo analisados, o Irrigâmetro operando nos níveis de água nos evaporatórios N2 e N3 apresentou valores médios de evapotranspiração de referência bem próximos aos valores calculados pelo método de Penman-Monteith.

Tanto a subestimativa ($K_I < 1$) quanto a superestimativa ($K_I > 1$) da ET_0 pelo Irrigâmetro, têm sido usadas para estimar diretamente a evapotranspiração de determinada cultura pelo aparelho, com correspondência para valores de K_c menores e maiores que a unidade, respectivamente.

A influência isolada dos elementos meteorológicos na evaporação de superfícies de água-livre, como nos tanques evaporímetros, é difícil de ser quantificada. Segundo Medeiros (2002), os principais elementos climáticos que proporcionam energia para evaporação e remoção de vapor de água a partir de superfícies evaporantes são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor. Desses, a radiação solar é o elemento de maior importância na demanda evaporativa da atmosfera.

Hounam (1973) citou que a evaporação da água em tanques não é função apenas das condições climáticas durante determinado período, mas também das características do reservatório e do calor advectivo provenientes de áreas secas adjacentes. Essas características se inter-relacionam com as condições climáticas, dificultando a medição da sua influência na evaporação.

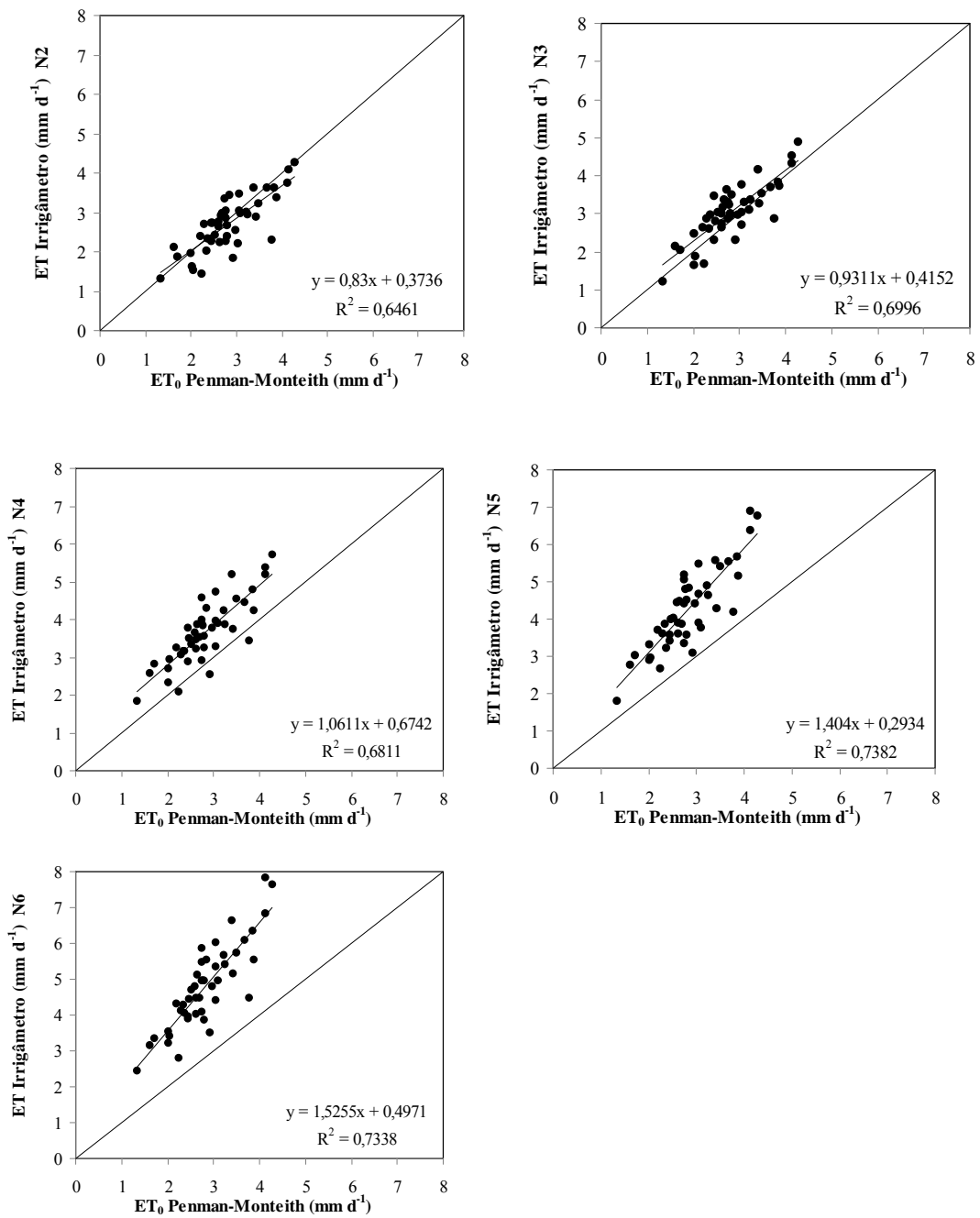


Figura 9 – Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro nos diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET₀ obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos de três dias.

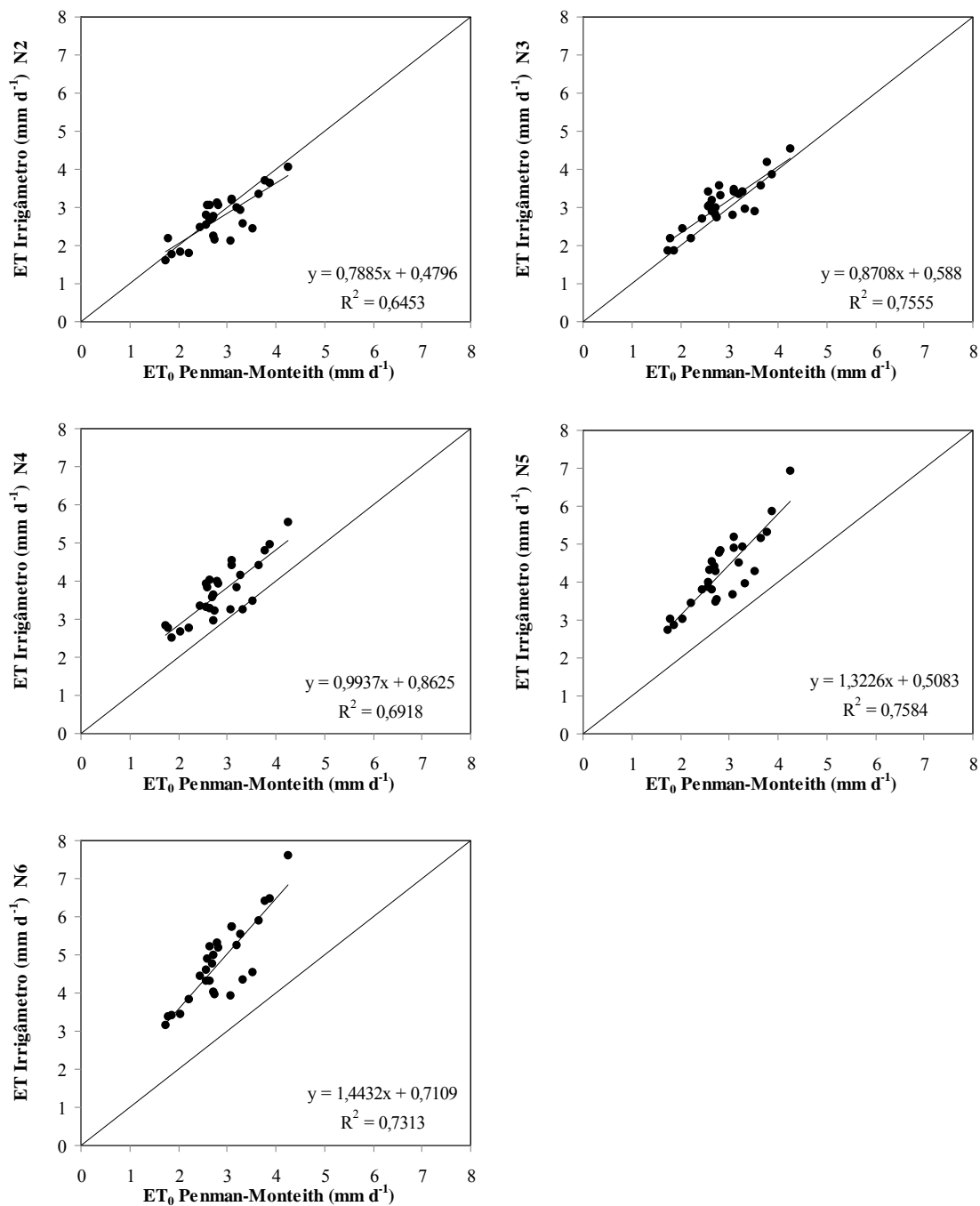


Figura 10 – Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro nos diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET₀ obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos de cinco dias.

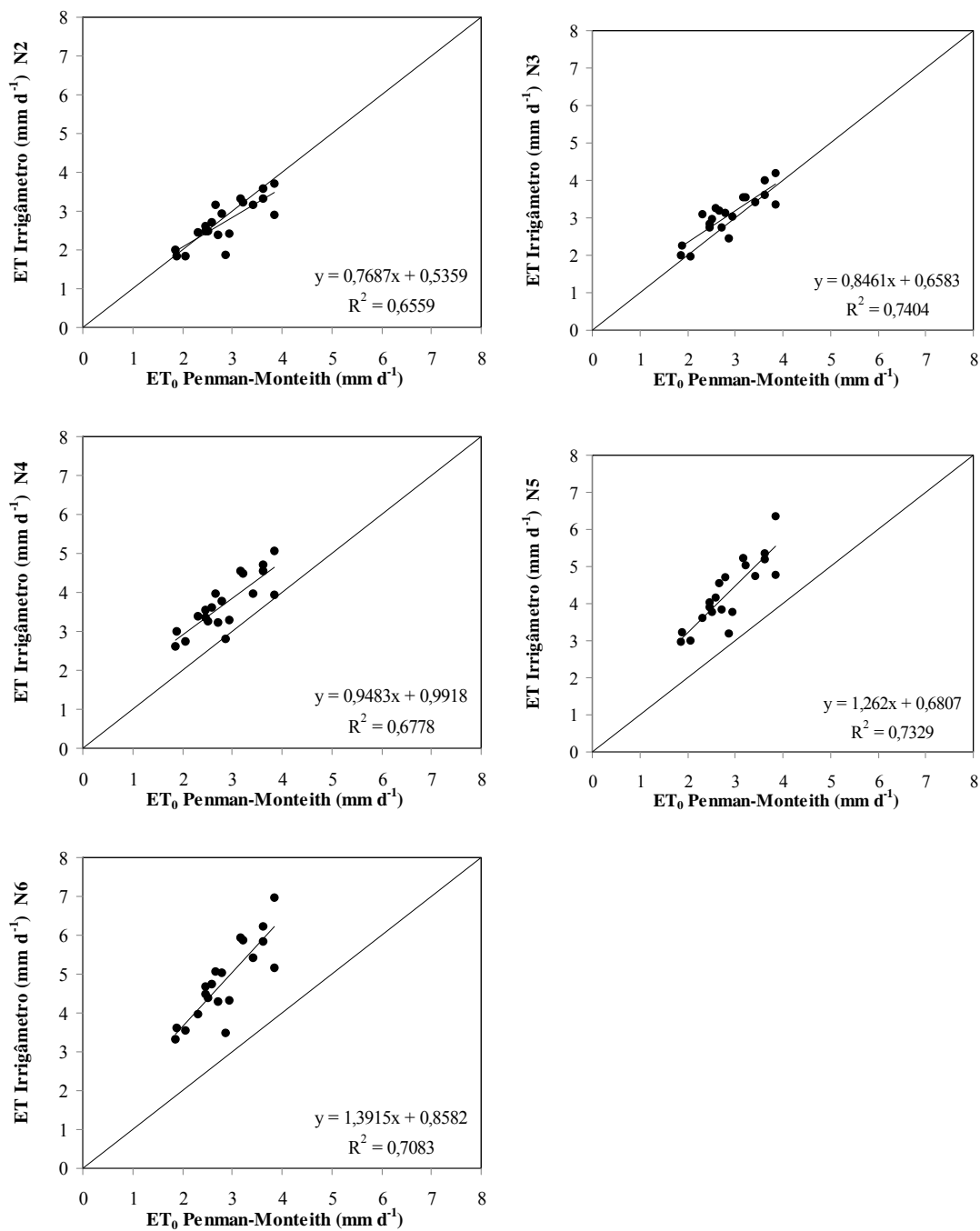


Figura 11 – Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro nos diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET₀ obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos de sete dias.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro. Posteriormente, os coeficientes de correlação foram desdobrados em efeitos diretos e indiretos para avaliar o efeito das variáveis explicativas sobre a variável principal.

Tabela 4 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro

	T mín	UR	Vv	Rad
T Máx	0,2071*	-0,4537**	-0,1265 ns	0,7516**
T mín		0,4185**	0,185*	0,0375 ns
UR			-0,0033 ns	-0,6543**
Vv				0,0226 ns

^{ns} Não significativo pelo teste t.

* Significativo a 5%, pelo teste t.

** Significativo a 1%, pelo teste t.

Os elementos meteorológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação apresentaram correlação significativa entre si, com exceção da variável velocidade do vento, com as variáveis temperatura máxima, umidade relativa e radiação, bem como entre as variáveis radiação e temperatura mínima, cujos coeficientes de correlação não foram significativos pelo teste t.

Os resultados da análise de trilha encontram-se na Tabela 5, em que são descritos os efeitos diretos e indiretos das variáveis sobre a evapotranspiração correspondente a cada nível de água no evaporatório.

Tabela 5 – Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação

Temperatura máxima	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Nível 6
Direto sobre ET	0,2948	0,3486	0,3251	0,3339	0,3587
Indireto via T mín	-0,0432	-0,0371	-0,0461	-0,0421	-0,0466
Indireto via Ur	-0,0199	-0,0539	-0,0016	0,0369	0,0102
Indireto via Vv	-0,0020	-0,0024	-0,0030	-0,0025	-0,0042
Indireto via Rad	0,3615	0,3923	0,3949	0,3681	0,3923
Total (cor. Pearson)	0,5911**	0,6475**	0,6693**	0,6944**	0,7103**
Temperatura mínima					
Direto sobre ET	-0,2089	-0,1792	-0,2226	-0,2032	-0,2251
Indireto via T Max	0,0610	0,0721	0,0673	0,0691	0,0742
Indireto via Ur	0,0184	0,0497	0,0015	-0,0341	-0,0094
Indireto via Vv	0,0030	0,0034	0,0044	0,0037	0,0062
Indireto via Rad	0,0180	0,0195	0,0197	0,0183	0,0196
Total (cor. Pearson)	-0,1084 ns	-0,0342 ns	-0,1296 ns	-0,1461 ns	-0,1344 ns
Umidade relativa					
Direto sobre ET	0,0440	0,1189	0,0036	-0,0814	-0,0224
Indireto via T Max	-0,1337	-0,1582	-0,1475	-0,1515	-0,1627
Indireto via T mín	-0,0874	-0,0750	-0,0931	-0,0850	-0,0942
Indireto via Vv	-0,0000	-0,0000	-0,0000	-0,0000	-0,0001
Indireto via Rad	-0,3147	-0,3415	-0,3438	-0,3204	-0,3415
Total (cor. Pearson)	-0,4920**	-0,4558**	-0,5809**	-0,6385**	-0,6210**
Velocidade do vento					
Direto sobre ET	0,0162	0,0189	0,0240	0,0202	0,0337
Indireto via T Max	-0,0372	-0,0441	-0,0411	-0,0422	-0,0453
Indireto via T mín	-0,0386	-0,0331	-0,0412	-0,0376	-0,0416
Indireto via Ur	-0,0001	-0,0004	-0,0000	0,0002	0,0000
Indireto via Rad	0,0108	0,0118	0,0119	0,0111	0,0118
Total (cor. Pearson)	-0,0489 ns	-0,0469 ns	-0,0464 ns	-0,0483 ns	-0,0414 ns
Radiação					
Direto sobre ET	0,4809	0,5219	0,5254	0,4897	0,5220
Indireto via T Max	0,2216	0,2620	0,2443	0,2510	0,2695
Indireto via T mín	-0,0078	-0,0067	-0,0083	-0,0076	-0,0084
Indireto via Ur	-0,0287	-0,0778	-0,0024	0,0533	0,0147
Indireto via Vv	0,0003	0,0004	0,0005	0,0004	0,0007
Total (cor. Pearson)	0,6663**	0,6998**	0,7596**	0,7869**	0,7986**
Coef. determinação (R ²)	0,495	0,542	0,642	0,698	0,714
Efeito variável residual	0,71	0,67	0,60	0,55	0,53

^{ns} Não significativo pelo teste t.

** Significativo a 1%, pelo teste t.

À medida que se elevou o nível de água no evaporatório, melhor foi o ajuste dos dados para explicar a influência dos elementos meteorológicos sobre a estimativa da evapotranspiração pelo Irrigâmetro. O nível N6 apresentou maior coeficiente de determinação (R^2) entre os demais níveis avaliados, sendo 0,71 para os valores diários. O coeficiente de determinação diminuiu gradativamente com a redução do nível da água no evaporatório.

Em todos os níveis de água no evaporatório, os elementos meteorológicos que apresentaram maior correlação com a estimativa da evapotranspiração obtida no Irrigâmetro foram radiação e temperatura máxima. No entanto, em todas as análises as menores correlações com a variável principal foram velocidade do vento e temperatura mínima.

O efeito indireto da variável temperatura máxima via radiação destacou-se como o mais associado na tentativa de explicar a evapotranspiração em todos os níveis de água no evaporatório. O coeficiente de correlação do efeito direto da temperatura máxima apresentou sinal positivo e igual ao da correlação total para a mesma variável, indicando que há relação direta entre a variável dependente evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro e a variável explicativa temperatura máxima, porém os efeitos totais nos níveis N2 e N3 não superaram o efeito residual. O efeito indireto da temperatura máxima via radiação foi elevado tanto quanto o efeito direto da temperatura máxima, uma vez que essas variáveis são significativamente correlacionadas e possuem coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,7516 (Tabela 4).

As estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinal igual aos dos coeficientes de correlação total, em todos os níveis de água no evaporatório, indicaram que as variáveis temperatura máxima e radiação são as principais determinantes na composição da variável principal, contudo somente a radiação apresenta relação nítida de causa e efeito. Isso evidencia que a variação na radiação implica mudanças diretas na ET estimada pelo Irrigâmetro, sendo, assim, a radiação o principal elemento meteorológico na tentativa de explicar a variável dependente (ET).

A umidade relativa, em decorrência de seus efeitos indiretos, apresentou alta correlação total com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, entretanto seu efeito direto é baixo, não evidenciando relação de causa e efeito entre essas variáveis.

As variáveis temperatura mínima e velocidade do vento apresentaram efeito direto de magnitude pequena e geralmente positivo, porém os coeficientes de correlação do efeito total foram não significativos.

Amorim (1998), estudando as ligações da evapotranspiração com os elementos climáticos no Município de Governador Dix-Sept Rosado, situado na região agrícola de Mossoró, RN, observou que a insolação foi o elemento meteorológico de maior influência no processo de evapotranspiração e a temperatura média compensada, o elemento que apresentou menor efeito nesse processo.

Avaliaram-se as correlações entre as variáveis meteorológicas, e, posteriormente, os coeficientes de correlação foram desdobrados em efeitos diretos e indiretos sobre a evapotranspiração estimada pelo tanque Classe A, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Estimativa dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas da evapotranspiração estimada pelo tanque Classe A

	T mín	UR	Vv	Rad
T Máx	0,2669**	-0,4704**	-0,1444 ns	0,7463**
T mín		0,2997**	0,1669*	0,0488 ns
UR			-0,1462 ns	-0,6895**
Vv				0,0107 ns

^{ns} Não significativo pelo teste t.

* Significativo a 5%, pelo teste t.

** Significativo a 1%, pelo teste t.

Nessa mesma tabela, observa-se que os elementos meteorológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação apresentaram, entre si, significativos valores de correlação, à exceção das correlações da variável velocidade do vento com as variáveis temperatura máxima, umidade relativa e radiação, bem como entre as variáveis radiação e temperatura mínima que apresentaram menores coeficientes de correlação e não significativos pelo teste t.

Os resultados da análise de trilha encontram-se na Tabela 7, com apresentação dos efeitos diretos e indiretos das variáveis sobre a evapotranspiração estimada com o uso do tanque Classe A.

Tabela 7 – Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação entre a variável evapotranspiração de referência estimada com o uso do tanque Classe A e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e velocidade do vento e radiação

Efeitos	Efeito Direto	Efeito Indireto	Coef. de Correlação
Temperatura máxima			
Direto sobre ET_0	0,1079	-	-
Indireto via T mín	-	0,0467	-
Indireto via Ur	-	0,0224	-
Indireto via Vv	-	-0,0080	-
Indireto via Rad	-	0,3399	-
Total (cor. Pearson)	-	-	0,5089**
Temperatura mínima			
Direto sobre ET_0	0,1750	-	-
Indireto via T máx	-	0,0288	-
Indireto via Ur	-	-0,0143	-
Indireto via Vv	-	0,0093	-
Indireto via Rad	-	0,0220	-
Total (cor. Pearson)	-	-	0,2211**
Umidade relativa			
Direto sobre ET_0	-0,0476	-	-
Indireto via T máx	-	-0,0507	-
Indireto via T mín	-	0,0524	-
Indireto via Vv	-	-0,0081	-
Indireto via Rad	-	-0,3140	-
Total (cor. Pearson)	-	-	-0,3682**
Velocidade do vento			
Direto sobre ET_0	0,0557	-	-
Indireto via T máx	-	-0,0156	-
Indireto via T mín	-	0,0292	-
Indireto via Ur	-	0,0069	-
Indireto via Rad	-	0,0048	-
Total (cor. Pearson)	-	-	0,0812 ns
Radiação			
Direto sobre ET_0	0,4555	-	-
Indireto via T máx	-	0,0805	-
Indireto via T mín	-	0,0085	-
Indireto via Ur	-	0,0328	-
Indireto via Vv	-	0,0006	-
Total (cor. Pearson)	-	-	0,5780**
Coef. determinação (R^2)	0,38	-	-
Efeito variável residual	0,79	-	-

^{ns} Não significativo pelo teste t.

** Significativo a 1%, pelo teste t.

Os elementos meteorológicos que apresentaram maior correlação com a estimativa da evapotranspiração obtida no tanque Classe A foram radiação e temperatura máxima, seguidas pela umidade relativa. A menor correlação com a variável principal foi a temperatura mínima, enquanto a velocidade do vento apresentou correlação não significativa.

O efeito indireto da variável temperatura máxima via radiação destacou-se como o mais associado na tentativa de explicar a evapotranspiração. O coeficiente de correlação total da umidade relativa apresentou sinal negativo, indicando relação inversa entre a variável dependente, evapotranspiração estimada pelo tanque Classe A e a variável explicativa umidade relativa.

As estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinal igual aos dos coeficientes de correlação total indicaram que as variáveis temperatura máxima e radiação foram as principais determinantes na composição da variável principal, entretanto somente a radiação apresentou relação nítida de causa e efeito, o que evidencia que a radiação foi o principal elemento meteorológico na tentativa de explicar a evapotranspiração obtida no tanque Classe A.

A temperatura mínima apresentou relação de causa e efeito, uma vez que seu efeito direto é o principal componente do efeito total, contudo a correlação total entre as variáveis foi de pequena magnitude (0,2211**).

A umidade relativa, em razão de seus efeitos indiretos, apresentou correlação total significativa com a evapotranspiração obtida no tanque Classe A, entretanto seu efeito direto foi baixo, não evidenciando relação de causa e efeito entre essas variáveis.

Sidnéia (2002), analisando os componentes principais na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração no Estado do Ceará, encontrou que, entre os elementos climatológicos estudados, os com maior peso no processo da evapotranspiração foram insolação e umidade relativa do ar. Na região Centro-Sul do Estado do Ceará, Andrade et al. (2003) constataram que as variáveis climatológicas investigadas com maior representatividade no processo da evapotranspiração foram insolação e velocidade do vento, enquanto as temperaturas máxima e mínima do ar apresentaram menor influência.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados desta pesquisa, chegou-se às seguintes conclusões:

1. O coeficiente do Irrigâmetro aumentou com a elevação do nível da água dentro do evaporatório.
2. O Irrigâmetro apresentou bom desempenho na estimativa da evapotranspiração de referência nas condições climáticas da Zona da Mata mineira quando operou com os níveis de água no evaporatório de 2 e 3 cm, ocorrendo a melhor estimativa no nível de 2,36 cm.
3. Na evapotranspiração estimada com o Irrigâmetro, as menores correlações com a variável principal foram velocidade do vento e temperatura mínima, sendo ambas não significativas.
4. O elemento meteorológico que apresentou maior correlação com a estimativa da evapotranspiração foi a radiação, seguida pela temperatura máxima e umidade relativa do ar, tanto para o Irrigâmetro quanto para o tanque Classe A.
5. O efeito indireto da variável temperatura máxima via radiação destacou-se como o mais associado, na tentativa de explicar a evapotranspiração estimada com o uso do tanque Classe A.
6. A temperatura mínima foi o elemento climático que apresentou menor correlação com a evapotranspiração obtida pelo método tanque Classe A, enquanto a velocidade do vento apresentou correlação não significativa.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 4, p. 348-386, 1986.

ALLEN, R.G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82 p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; BORNAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.

AMORIM, M.C. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)**. 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, E.M. et al. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 39-44, 2003.

CARVALHO, S.P. **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. 1995. 163 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CHANG, J. **Climate and agriculture**. Chicago: Aldine Publishing, 1971. 296 p.

CONEJO, J.G.L. (Coord.). **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA/MMA, 2005. p. 20.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa; MG: UFV, 1994. 390 p.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2.ed. Viçosa; MG: UFV, 1997. 390 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requeriment**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

HOUNAM, C.E. **Comparison between pan and lake evaporation**. Geneva: World Meteorological Organization, 1973. 52 p. (Tech. Note, 126; WMO, 354).

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: THE STATE AND MOVEMENT OF WATER IN LIVING ORGANISMS. **Atas and abstract**. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M. **Manual do irrigâmetro**. Viçosa; MG: UFV, 2008. 144 p.

OLIVEIRA, R.A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G.C.; MATERAN, F.J.V.; CECON, P.R. Desempenho do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 166-173, 2008.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba; SP: FEALQ, 1997. 183 p.

PROGRAMA GENES. **Aplicativo computacional em genética e estatística**. Disponível em: <www.ufv.br/dbg/genes/genes.htm>. Acesso em: 2009.

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1996. 176 p.

SIDNÉIA, S.S.; EUNICE, M.A. Análise de componentes principais na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 171-177, 2002.

SLEIGHT, R.B. Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 10, n. 5, p. 209-262, 1917.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of crop water requeriments**. Rome: FAO, 1991. 45 p.

TAGLIAFERRE, C. **Geração de tecnologia inovadora aplicada ao irrigâmetro para o manejo racional da água de irrigação**. 2007. 50 f. Relatório (Pós-Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TAGLIAFERRE, C. **Desempenho do irrigâmetro e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência**. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VALERO, J.A.J.; MAÑAS, F.J.M.S.O. El calculo y la estimacion de la evapotranspiracion . In: MAÑAS, F.J.M.S.O.; VALERO, J.A.J. **Agronomia del riego**. Madrid: Mundi-Prensa, 1993. p. 373-446.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WRIGTH, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 20, 1921.