

JÚLIO CEZAR MACHADO BAPTESTINI

**EFEITOS DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO IRRIGÂMETRO NA REGIÃO  
SUL DO ESTADO DO TOCANTINS**

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  
2010

JÚLIO CEZAR MACHADO BAPTESTINI

**EFEITOS DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO IRRIGÂMETRO NA REGIÃO  
SUL DO ESTADO DO TOCANTINS**

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: 23 de fevereiro de 2010

---

Prof. Paulo Roberto Cecon  
(Coorientador)

---

Prof. Edvaldo Fialho dos Reis

---

Prof. Sérgio Zolnier

---

Prof. Mauro Aparecido Martinez

---

Prof. Rubens Alves de Oliveira  
(Orientador)

*Aos meus pais, João e Luzia, e às  
minhas irmãs, Fernanda e Elizabeth.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve comigo, conduzindo-me pelos caminhos corretos da vida.

Ao meu pai e à minha mãe, pela compreensão, pelo carinho, pela dedicação, pela confiança, pela educação, pelos conselhos, pelo apoio infinito e por tudo que sempre fizeram pensando na minha felicidade.

Às minhas irmãs, pela convivência, pelos conselhos, pelos puxões de orelha, pelos cuidados e pela paciência que sempre tiveram comigo.

À Gheila, minha namorada, pelo amor, pelo carinho, pela compreensão e pela minha felicidade, da qual ela faz parte.

Ao Maurício, meu cunhado, pela amizade e pelas aulas de computação.

Aos meus padrinhos Sandra e Jamil, que sempre estiveram orando por mim.

À Eliana, ao Maurinho e ao Ramon, que me acolheram em sua casa enquanto eu me dedicava a estudar para ingressar na universidade.

Ao meu primo Renan, com quem sempre pude contar nas minhas idas e vindas de Jacu.

Aos meus amigos de Jacu, ES, que sempre me receberam muito bem.

A todos os meus primos, primas, tias, tios e avó, que indiretamente me acompanharam e me apoiaram nesta etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização do Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Rubens Alves de Oliveira, pela oportunidade de realizar este trabalho, pelos puxões de orelha, pela amizade, pela confiança e pela orientação.

Aos professores coorientadores Gilberto C. Sedyama, Paulo Roberto Cecon e Jair da Costa Oliveira Filho, pela atenção e colaboração, pela assistência e pelos esclarecimentos durante o trabalho.

Ao professor Cosme Damião, pela disponibilização do programa Genes e pela boa vontade e disponibilidade em ajudar.

Aos meus amigos Ednaldo Miranda de Oliveira, Samuel Petraccone, Caio Leite, Fabrício Contin, Roberto Milagres, Cristiano Tagliaferre e Gustavo Dantas, pela contribuição profissional.

Aos estudantes de Iniciação Científica e grandes amigos Caio, Luan, Enoque e Aline.

Ao estudante de graduação Arnaldson Santos de Oliveira, orientado pelo professor Jair, pela colaboração nos trabalhos experimentais com seriedade, responsabilidade, dedicação e qualidade.

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

Aos meus amigos do futebol, pelos momentos de descontração e descanso, pelas belas jogadas e passes para meus belos gols.

## **BIOGRAFIA**

JÚLIO CEZAR MACHADO BAPTESTINI, filho de João Baptestini e Luzia Machado Baptestini, nasceu em Cachoeiro do Itapemirim, ES, em 27 de outubro de 1982.

Em março de 2003, ingressou no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, concluindo-o em junho de 2008. Durante a graduação, foi bolsista de Extensão Universitária por dois anos pelo programa PIBEX.

Em agosto de 2008, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2010.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	4
2.2 IRRIGÂMETRO.....	7
2.3 ANÁLISE DE TRILHA.....	10
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>12</b>
3.1 LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	12
3.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	14
3.3 COEFICIENTE DO IRRIGÂMETRO ( $K_I$ ).....	14
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA E COEFICIENTE DE TRILHA.....	16
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>46</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>

## RESUMO

BAPTESTINI, Júlio Cezar Machado, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo irrigâmetro na região sul do Estado do Tocantins.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon e Jair da Costa Oliveira Filho.

A irrigação é uma técnica que pode ajudar o produtor rural a obter maior produtividade e produtos de melhor qualidade, se realizada de maneira correta. No Brasil, a irrigação consome aproximadamente 69% da água utilizada nas diversas atividades humanas. Quando a quantidade de água aplicada é insuficiente para atender às necessidades hídricas das culturas, ocorrem baixas produtividades e prejuízos econômicos ao produtor. Por outro lado, quando a aplicação de água é feita em excesso, ocorre aumento no consumo de energia, favorecimento ao desenvolvimento de doenças, diminuição da qualidade dos produtos, além de provocar lixiviação de nutrientes e contaminação das fontes de água. Assim, torna-se importante fazer o manejo adequado da irrigação, sendo o Irrigâmetro uma das tecnologias existentes. Neste projeto teve-se como objetivos: (a) avaliar o desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) para a região sul do Estado do Tocantins; (b) avaliar os efeitos da temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro ( $ET_I$ ); e (c) determinar o valor do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) para cada estação do ano. A pesquisa foi conduzida numa área experimental da Universidade Federal do Tocantins, campus de Gurupi. Os dados meteorológicos foram coletados numa estação meteorológica automática e utilizados na determinação da  $ET_o$ , com uso do programa computacional REF-ET, com base na equação de Penman-Monteith – FAO 56. O

experimento foi montado num delineamento inteiramente casualizado (DIC), e os parâmetros estatísticos usados para analisar os efeitos da influência dos elementos meteorológicos sobre a  $ET_I$  foram a raiz do erro quadrático médio (REQM), o índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Foi utilizado o programa GENES para análise das correlações dos efeitos diretos e indiretos dos elementos meteorológicos sobre a  $ET_I$ . O Irrigâmetro teve desempenho satisfatório na estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), sendo recomendados as alturas de água no evaporatório de 3,2, 4,2, 4,8 e 3,1 cm nas estações primavera, verão, outono e inverno, respectivamente. O coeficiente do Irrigâmetro aumentou linearmente com a elevação da altura de água dentro do evaporatório para todas as estações do ano. Os valores do coeficiente do Irrigâmetro para as estações primavera, verão, outono e inverno foram de 0,95, 0,98, 0,96 e 1,01, respectivamente. Durante a primavera, os elementos meteorológicos temperatura máxima, umidade relativa e radiação tiveram alta correlação com a  $ET_I$ . No verão e no outono, a correlação da  $ET_I$  foi maior com a radiação solar. A umidade relativa foi o elemento com maior correlação com a  $ET_I$  durante o inverno. A temperatura mínima e a velocidade do vento apresentaram menor correlação com a  $ET_I$  em todas as estações do ano.

## ABSTRACT

BAPTESTINI, Júlio Cezar Machado, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010. **Effects of Meteorological Elements on Evapotranspiration Estimated by an irrigameter in the South Region of the State of Tocantins, Brazil.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon and Jair da Costa Oliveira Filho.

Irrigation is a technique that can help farmers obtain greater productivity and products of greater quality when it is done correctly. In Brazil, irrigation consumes around 69% of water used in all human activity. When the amount of water applied is insufficient to attend crop demands, productivity may decrease leaving the farmer with economics losses. On the other hand, when the application of the water is excessive, it causes increases the energy consumption, facilitates the development of diseases, reduces the quality of products, and can cause lixiviation of nutrients and contamination of water sources. Therefore, is very important that irrigation be performed properly, and the Irrigameter is one of the existent technologies for this purpose. The objectives of this project were: (a) to assess performance of the Irrigameter to estimate reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) for the south region of the state of Tocantins, Brazil; (b) to assess the effects of maximal and minimal temperature, relative humidity, wind velocity and radiation on evapotranspiration as estimated by the Irrigameter ( $ET_I$ ); and (c) to determine the Irrigameter coefficient ( $K_I$ ) for each season of the year. The research was carried out in an experimental area at the Federal University of Tocantins, Gurupi Campus. Meteorological data were collected at an automatic meteorological station and used for determination of the  $ET_0$  using the computer program REF-ET, based on the Penman-Monteith Equation – FAO 56. The experiment was carried out in a completely randomized design and the statistical parameters used to analyze the influence of the

meteorological elements on  $ET_I$  were: the root mean square error (REQM), the Willmott rate (d) and the coefficient of determination ( $r^2$ ). The program GENES was used to analyze the correlations of direct and indirect effects of meteorological elements on the  $ET_I$ . The Irrigameter showed good performance for estimating the reference evapotranspiration ( $ET_o$ ), and the recommended water levels in the evaporator for spring, summer, autumn and winter were 3.2, 4.2, 4.8 and 3.1 cm, respectively. The Irrigameter coefficient increased linearly with the elevation of the water level inside the evaporator for all seasons, and its values for spring, summer, autumn and winter were 0.95, 0.98, 0.96 and 1.01, respectively. During the spring, the meteorological elements of maximal temperature, relative humidity and radiation were highly correlated with the  $ET_I$ . In the summer and autumn, correlation of  $ET_I$  was greater with solar radiation. Relative humidity was the element presenting the highest correlation with  $ET_I$  during the winter. The minimal temperature and the wind velocity showed poorer correlation with  $ET_I$  for all the seasons.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é indispensável à vida, sendo um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. A diminuição da sua disponibilidade ao uso humano, tanto em nível nacional quanto mundial, está aumentando a competição entre os diferentes usuários, como indústria, abastecimento humano, agricultura e agropecuária.

Segundo Smith (1998), mais de 30 países, localizados em regiões áridas e semiáridas, terão sérios problemas com escassez de água até o ano de 2025, com uma disponibilidade anual inferior a 1.000 m<sup>3</sup> per capita. Isso se traduzirá diretamente em redução do desenvolvimento, ameaça ao suprimento de alimentos e agravamento do empobrecimento no meio rural.

Um estudo desenvolvido pela Agência Nacional de Águas (2006) estima que do total da água consumida no Brasil nas diversas atividades humanas a irrigação seja responsável por cerca de 69%. 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 em deficiência hídrica para as plantas, provocando diminuição da produtividade e prejuízos econômicos ao produtor.

Segundo Contin (2008), os agricultores irrigantes dispõem de diversas metodologias no que diz respeito ao manejo da irrigação, sendo o nível tecnológico da propriedade agrícola o fator que determinará a escolha da estratégia mais adequada de manejo. Agricultores que exploram culturas de alto valor econômico podem adotar e investir em técnicas que exigem maior poder aquisitivo para poder dispor dos seus recursos.

O manejo da irrigação consiste em determinar o momento de irrigar e o tempo de funcionamento de um equipamento de irrigação, no caso de sistemas de irrigação por aspersão e localizada, ou a sua velocidade de deslocamento, no caso de pivô central e sistemas lineares, com a finalidade de aplicar a quantidade de água necessária ao pleno desenvolvimento das culturas. É uma prática ainda pouco usada, sendo, na maioria das vezes, empregada nas propriedades rurais que possuem grandes áreas irrigadas.

A evapotranspiração é definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície vegetada durante determinado período. Também pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, em período predeterminado (BERNARDO et al., 2006).

O conhecimento e a quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para o planejamento e o manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1996). A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

O uso de tanques para medição da evaporação da água, para fins de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), deve considerar aspectos da sua instalação e fatores intrínsecos ao próprio tanque. Segundo Valero e Mañas (1993), a rugosidade e o albedo da superfície da água livre, a cor, a forma do tanque e o nível da lâmina de água no seu interior constituem grandes fontes de erros, podendo atingir 15% no tanque Classe “A” quando a superfície da água fica 10 cm abaixo do nível-padrão.

O tanque Classe “A” é um método utilizado 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. Jensen et al. (1990) recomendam o uso do tanque Classe “A” para períodos de tempo superiores a sete dias.

O Irrigâmetro apresenta grande potencial de uso na agricultura irrigada, pois, além de diversas vantagens, ele fornece resposta prática às duas perguntas básicas do manejo de irrigação: quando e quanto irrigar. 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  $K_c$  desejado.

O Irrigâmetro é capaz de estimar a evapotranspiração com precisão satisfatória, sendo esse processo dependente das interações dos diversos elementos meteorológicos e suas inter-relações associadas ao correto ajuste do aparelho (TAGLIAFERRE, 2007).

Assim, pesquisas conduzidas em regiões com condições climáticas diferentes permitirão identificar quais elementos meteorológicos (temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação) são mais relevantes na evapotranspiração estimada pelo aparelho, com avaliação dos efeitos diretos e indiretos desses elementos, possibilitando ajustes mais precisos do aparelho em uma condição climática específica.

Oliveira (2009) usou o Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração de referência na região do Alto Paranaíba-MG, no período de agosto de 2008 a maio de 2009, recomendando operar o aparelho com altura de água no evaporatório igual a 4,1 cm.

Caixeta (2009), em estudo com Irrigâmetro realizado em Viçosa-MG, observou que as variáveis temperatura máxima e radiação foram as principais determinantes na composição da estimativa da evapotranspiração (ET); contudo, somente a radiação apresentou relação nítida de causa e efeito. Isso evidencia que a variação na radiação implicou mudanças diretas na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, sendo o principal elemento meteorológico na tentativa de explicar a variável dependente (ET).

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 meteorológicos de diferentes regiões e ambientes do planeta, possibilitando um estudo mais seguro para estimar a evapotranspiração das culturas, permitindo aos irrigantes serem mais criteriosos na prática do manejo da irrigação.

Tendo em vista o exposto, nesse estudo teve-se como objetivos: (a) avaliar o desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Gurupi-TO; (b) avaliar os efeitos das interações das variáveis meteorológicas temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar global, para cada estação do ano, na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro operando com diferentes alturas de água no evaporatório; (c) determinar o coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) para cada estação do ano, para diferentes alturas de água no evaporatório, com base na estimativa de evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e na evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith - FAO 56; e (d) determinar para cada estação do ano, a altura de água no evaporatório referente ao  $K_I$  igual a 1, ou seja, a altura que corresponde à estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão Penman-Monteith-FAO 56.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Estimativa da evapotranspiração de referência**

A estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) é importante no processo de manejo de irrigação. A sua determinação inclui a soma da evaporação da água do solo e da superfície das plantas e a transpiração vegetal.

O consumo de água envolvido no processo de evapotranspiração é influenciado por diversos fatores, entre eles a ação combinada dos elementos meteorológicos, como a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, o índice de área foliar e a quantidade de água prontamente disponível no solo (DOORENBOS; e PRUITT, 1977; MEDEIROS, 2002). As taxas de evaporação e transpiração se elevam com o aumento da radiação solar, da temperatura do ar, da velocidade do vento e do índice de área foliar e com a diminuição da umidade relativa do ar.

Existem várias maneiras de estimar a evapotranspiração de referência. Segundo Burman et al. (1983), a  $ET_0$  pode ser obtida a partir de medidas diretas ou estimada a partir de elementos climáticos, utilizando-se modelos ou métodos teóricos empíricos. Entre as medidas diretas incluem-se os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo, enquanto entre as estimadas, conforme Jensen et al. (1990), encontram-se os métodos de Penman, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Priestley-Taylor e Hargreaves, entre outros, e também os evaporímetros.

Uma das maneiras diretas de obter a evapotranspiração é por meio da utilização de lisímetros, que são grandes reservatórios cheios de solo localizados no campo, para representarem o ambiente local, com superfície coberta por vegetação ou solo nu, para estimativa da evapotranspiração de uma cultura de referência ou, ainda, da evaporação em um solo descoberto (OLIVEIRA, 2009). Para Amorim (1998), o método do

lisímetro é muito preciso e considerado instrumento-padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ).

Entre as medidas indiretas pode ser incluído o tanque Classe A (Figura 1), que mede o efeito integrado da radiação, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa sobre a evaporação de uma superfície de água livre à atmosfera. Entretanto, não é recomendável para períodos menores que cinco dias, pois a temperatura da água do tanque apresenta influência do dia anterior (TAVARES, 2009). Segundo Bernardo et al. (2006), a utilização de metal não recomendado pode proporcionar erro de até 30% na estimativa da evapotranspiração de referência.



Figura 1 - Tanque Classe A.

Operar o Tanque Classe A é muito simples, pois implica apenas medir a variação da altura da água. Essa medição é feita com utilização de um gancho pontiagudo instalado dentro de um poço tranquilizador. A diferença de altura de água no período corresponde à evaporação da água no tanque ( $E_v$ ).

Para utilização do Tanque Classe A na estimativa da evapotranspiração de referência, tem-se a necessidade de saber qual o valor do coeficiente do tanque ( $K_t$ ). Os valores de  $K_t$  são influenciados diretamente pelo tipo de bordadura, se grama ou solo nu, e seu raio de alcance em relação ao tanque, pela umidade relativa e velocidade do vento. Os valores dos coeficientes do Tanque Classe A serão menores quanto menor a umidade relativa, maior velocidade do vento e menor raio de bordadura. A evapotranspiração pode ser calculada utilizando-se a equação seguinte:

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

em que:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>;

$K_t$  = coeficiente do tanque, adimensional; e

$E_v$  = evaporação medida no tanque, mm d<sup>-1</sup>.

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, como descrito no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

Allen et al. (1998) recomendaram para cálculo da evapotranspiração de referência a equação de Penman-Monteith, que é usada como padrão, pois apresenta estimativa confiável e consistente da  $ET_0$ , sendo considerado o modelo de melhor desempenho entre os métodos combinados.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{Ta + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + CdU_2)} \quad (2)$$

em que:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência, mm h<sup>-1</sup>;

$R_n$  = saldo de radiação à superfície, MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>;

$G$  = densidade do fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>;

$T_a$  = temperatura do ar de hora em hora, °C;

$U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura, m s<sup>-1</sup>;

$e_s$  = pressão de saturação de vapor, kPa;

$e_a$  = pressão parcial de vapor, kPa;

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>; e

$Cd$  = coeficiente de resistência de superfície/aerodinâmica.

A equação anterior é uma representação dos fatores que governam o processo de evapotranspiração e define a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) com base em uma cultura hipotética com altura média de 0,12 m, coeficiente de reflexão ou albedo de 0,23 e resistência de superfície de 70 s m<sup>-1</sup>, sendo comparada à evaporação de uma extensa superfície de grama verde, com altura uniforme, de crescimento ativo e adequada umidade do solo (SEDIYAMA, 1996).

O efeito das estações do ano sobre a evaporação e a transpiração é consequência da variação da quantidade de energia radiante que atinge o solo durante esses períodos. Estas variações serão tanto maiores quanto mais afastada do equador for a região a ser considerada (BERNARDO et al., 2006). Assim, em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil, onde a variação da evapotranspiração potencial durante o ano é pequena (BERNARDO, 1977), é possível o cultivo durante quase todo o ano, visto que há boa disponibilidade de energia solar.

## **2.2 Irrigâmetro**

O manejo da irrigação é de grande importância no setor agrícola, pois permite ao proprietário rural aplicar na lavoura a quantidade de água adequada para seu pleno desenvolvimento. Manejar a irrigação é saber qual o momento correto para irrigar e qual o tempo que o sistema de irrigação deve ficar ligado para realização da irrigação ou, então, qual a velocidade de deslocamento do equipamento.

A quantidade de água aplicada numa irrigação deve ser suficiente para repor a água evapotranspirada pela cultura. A frequência da irrigação depende de características do solo, do clima e da planta. A decisão sobre o horário da irrigação considera o preço da energia elétrica, a disponibilidade de mão de obra e a eficiência de aplicação da água. A importância de manejar a irrigação adequadamente envolve mais vantagens do que a economia de água. A água transporta os nutrientes, e seu excesso pode afastá-los das raízes (TAVARES, 2009).

A prática da irrigação visa promover aumento de produtividade e de qualidade dos produtos, com consequente aumento na rentabilidade da propriedade agrícola. Contudo, o uso dessa tecnologia deve ser criteriosamente analisado, visto que a irrigação vai além da simples aplicação de água às plantas, sendo um dos componentes do sistema de produção que interagem entre si para gerar aumento de rentabilidade do empreendimento agrícola.

Uma tecnologia que está sendo desenvolvida com o objetivo de facilitar o manejo da irrigação pelos próprios produtores rurais é o Irrigâmetro. Ele é um aparelho evapopluiométrico utilizado no manejo da irrigação, visando otimizar o uso da água na agricultura irrigada. Essa otimização é importante para a sociedade como um todo, tanto do ponto de vista ambiental, economizando água e energia e evitando degradação do meio ambiente, quanto do ponto de vista de geração de renda para o produtor rural,

reduzindo custos e aumentando a produtividade das culturas e a disponibilidade de alimentos de melhor qualidade.

De acordo com Oliveira e Ramos (2008), a tecnologia do Irrigâmetro é inédita porque introduz grande simplicidade no manejo da água em áreas irrigadas. Nesse sentido, responde a certas questões básicas a respeito do manejo da irrigação: Quando irrigar? Qual a quantidade de água necessária à cultura? Qual o tempo de irrigação? E o que fazer no caso de ocorrência de chuva? Assim, o irrigante não precisa ter conhecimentos técnicos especializados sobre irrigação.

Em condições normais de manejo da irrigação com tanque universal Classe A, o operador mede a lâmina de água evaporada e a lâmina precipitada, com uso de pluviômetro, e posteriormente efetua os cálculos necessários para determinar quando e quanto irrigar. Por outro lado, em condições de manejo da irrigação com uso do Irrigâmetro, a informação quanto ao momento e ao tempo de funcionamento do equipamento de irrigação, ou a sua velocidade de deslocamento, está prontamente disponível ao irrigante. Portanto, não é necessário ter conhecimento técnico nem efetuar cálculos, cuja complexidade pode dificultar o manejo da irrigação pelos irrigantes.

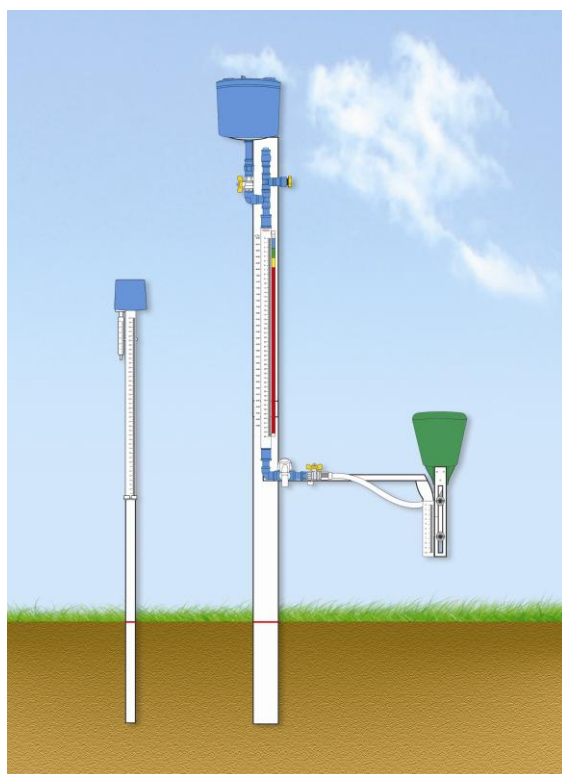
No caso de ocorrência de chuva, a lâmina precipitada é medida e computada facilmente pelo operador do Irrigâmetro, sabendo-se, em seguida, se ela foi suficiente ou não para suprir o déficit hídrico até então existente no solo, sem a necessidade de fazer cálculos. Isso se constitui em outra grande vantagem do Irrigâmetro, pois o uso convencional tanto do tanque universal Classe A quanto de estação meteorológica automática exige cálculos no cômputo da lâmina precipitada no processo de manejo da irrigação.

De acordo com Oliveira e Ramos (2008), o manejo da irrigação com o uso do Irrigâmetro é realizado com o monitoramento de três escalas integradas ao aparelho. A escala laminar, que se constitui numa graduação impressa no próprio tubo de alimentação do aparelho, possui a função de medir a lâmina de água evapotranspirada. A escala da régua de manejo (sem graduação) possui quatro faixas verticais de coloração azul, verde, amarelo e vermelho, com a função de indicar o momento da irrigação, cujo modelo é dependente da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico e de características físico-hídricas do solo da área irrigada. Tem-se também a escala da régua temporal ou percentual, que é graduada em horas e minutos ou em percentagem, respectivamente, sendo o modelo desta régua indicado de acordo com as características de aplicação de água do sistema de irrigação. Esta régua indica o tempo de

funcionamento, no caso de aspersão convencional ou localizada, ou a velocidade de deslocamento do sistema de irrigação, no caso de pivô central ou sistema linear.

Na régua de manejo, as quatro faixas coloridas são indicadoras do momento de irrigar a cultura. Quando o nível da água no interior do tubo de alimentação encontra-se na direção da faixa azul ou da faixa verde, é indicativo de alta e boa disponibilidade de água no solo, respectivamente, não havendo necessidade de irrigar a cultura; na direção da faixa amarela, é recomendável irrigar; e caso o nível de água abaixe a ponto de atingir a faixa vermelha, o Irrigâmetro indicará ao produtor que o momento da irrigação já passou, podendo ocorrer redução na produtividade ou na qualidade da cultura que está sendo irrigada.

Na figura seguinte está sendo mostrado um Irrigâmetro completo, equipado com um pluviômetro e um evaporímetro.



Fonte: OLIVEIRA; RAMOS, 2008.

Figura 2 – Representação do Irrigâmetro equipado com evaporatório (direita) e pluviômetro (esquerda).

O Irrigâmetro indica qual o momento e o tempo de irrigação, tornando o processo de manejo da irrigação mais simples aos agricultores. Ele 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, associado ao correto ajuste do aparelho.

### 2.3 Análise de trilha

Na estimativa da evapotranspiração de referência, considera-se a interação entre vários elementos meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar global, entre outros), os quais atuam em conjunto, influenciando diretamente a  $ET_0$ , e atuam também entre si, cada um influenciando o outro.

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 caminhamento. 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, e sim ao grau que se manifesta. Havendo 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 análises de regressões, de trilha e de correlações parciais, entre outras.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local e caracterização do experimento

O estudo foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Federal de Tocantins (UFT) no Campus Universitário de Gurupi, município de Gurupi, TO (11° 45'S, 49° 03' W e altitude de 287 m).

Foram instalados 24 Irrigômetros, Figuras 3 e 4, dos quais apenas 18 foram utilizados na pesquisa, dispostos na forma triangular, espaçados de 3,0 por 3,0 m, com o braço do aparelho fazendo 30° em relação à direção norte, com o objetivo de evitar que a sombra do próprio Irrigômetro incidisse sobre o evaporatório, influenciando os valores das leituras de  $ET_L$ . Um cercado foi construído isolando os Irrigômetros do contato com animais, para evitar danos aos equipamentos e, conseqüentemente, perdas de leituras. Na Figura 3, cada Irrigômetro está identificado com o número do tratamento e da repetição correspondente. Por exemplo, o Irrigômetro N 6.3, corresponde a terceira repetição do tratamento, cuja altura de água no interior do evaporatório é 6 cm.

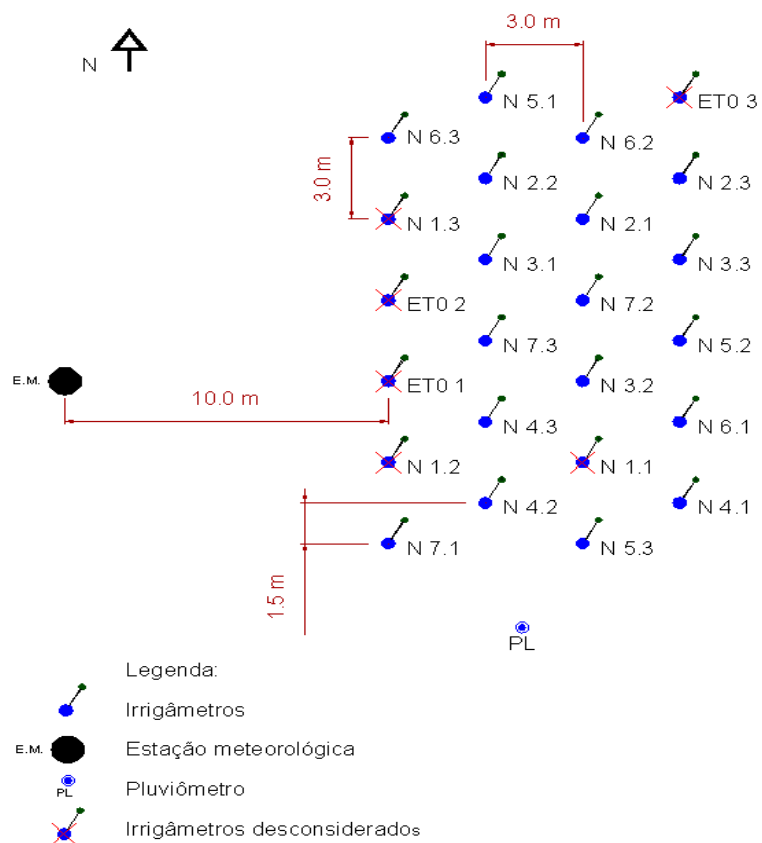


Figura 3 - Disposição dos Irrigômetros, do pluviômetro e da estação meteorológica automática na área experimental.



Figura 4 – Vista da área experimental.

Na área experimental foi instalada uma estação meteorológica automática da marca DAVIS, modelo Vantage Pro II, utilizada para coleta dos dados a cada 30

minutos. Foram considerados apenas os dados horários de radiação, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura do ar, necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

Um pluviômetro do conjunto Irrigâmetro foi usado para determinar os dias chuvosos, os quais foram excluídos da análise dos resultados para manter a integridade dos dados, tendo em vista que a chuva altera a altura da água no evaporatório do Irrigâmetro e a restituição da altura original nem sempre ocorria logo após o término da precipitação pluvial.

O período de coleta de dados iniciou-se em setembro de 2008 e terminou no final de agosto de 2009, originando um período de um ano de coleta de dados.

### **3.2 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )**

Na determinação da evapotranspiração horária foi utilizado o programa computacional REF-ET (ALLEN, 2000), usando-se os dados horários de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação. A evapotranspiração diária foi obtida por integralização dos valores horários. A evapotranspiração diária estimada pelo Irrigâmetro foi determinada no período de 9 horas de um dia até as 9 horas do dia seguinte.

Para fins de comparação, a evapotranspiração diária determinada pelo método de Penman-Montheith – FAO 56 foi determinada integralizando-se os valores de  $ET_0$  horários do período de 9 horas de um dia até as 9 horas do dia seguinte, uma vez que as leituras no Irrigâmetro eram feitas às 9 horas.

### **3.3 Coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ )**

O Irrigâmetro é um aparelho que possui um evaporatório de material termoplástico de cor verde, em formato cônico (Figura 5), dentro do qual fica água exposta à atmosfera, sob os efeitos dos elementos meteorológicos. O tubo em forma de cone permite que, à medida que a altura da água seja elevada, a superfície exposta à atmosfera aumente. Um tubo flexível conecta o evaporatório a uma válvula instalada na base do tubo alimentação, funcionando como um sistema de vasos comunicantes.



Figura 5 – Vista superior mostrando o formato cônico e detalhe da régua de nível na parede interna do evaporatório.

O coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) representa a razão entre a estimativa da evapotranspiração obtida no Irrigâmetro ( $ET_I$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). Assim, foi atribuído ao  $K_I$  o valor do coeficiente angular ( $\beta_1$ ) da regressão linear, não se considerando a constante  $\beta_0$  no modelo.

A fim de determinar o coeficiente do Irrigâmetro e a influência dos elementos climáticos associados para cada altura de água no evaporatório, o experimento foi montado num delineamento inteiramente casualizado, com seis alturas de água no evaporatório e três repetições, representando os tratamentos. Os tratamentos foram: N1 = 2, N2 = 3, N3 = 4, N4 = 5, N5 = 6 e N6 = 7 cm, tomados a partir de uma altura de referência numa escala ascendente, existente no evaporatório do aparelho, totalizando 18 Irrigâmetros.

A altura da água no evaporatório que corresponde ao  $K_I = 1$ , ou seja, a altura ajustada para a estimativa direta da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), foi determinada com o ajuste de uma equação que relaciona as alturas de água no evaporatório e os respectivos coeficientes do Irrigâmetro obtidos para as diferentes alturas avaliadas. A coleta de dados nos Irrigâmetros foi feita diariamente, e os dados armazenados na estação meteorológica automática foram acessados semanalmente.

Para cada tratamento foi determinado um coeficiente  $K_I$  por estação do ano, calculado com aplicação da equação 3, que estabelece a relação entre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro ( $ET_I$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ).

$$K_I = \frac{\sum ET_o ET_I}{\sum ET_o^2} \quad (3)$$

em que:

$K_I$  = coeficiente do Irrigâmetro, adimensional;

$ET_I$  = evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro,  $\text{mm d}^{-1}$ ; e

$ET_o$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm d}^{-1}$ .

Para as estações do ano e para todo o período experimental, foram feitos testes de hipóteses usando o teste “t” a 5% de probabilidade. As hipóteses consideradas foram relacionadas ao valor do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), tendo sido testadas as hipóteses ( $H_0: \beta_1=1$  e  $H_1: \beta_1 \neq 1$ ).

### 3.4 Análise estatística e coeficiente de trilha

Para verificação do desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos no aparelho com os valores obtidos com a aplicação da equação de Penman-Monteith - FAO 56.

Para avaliar o desempenho do Irrigâmetro, foram usados a raiz do erro quadrático médio (REQM), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o coeficiente angular (b) das equações de regressão encontradas para as relações entre a  $ET_I$  e a  $ET_o$ . A alternativa que indica melhor desempenho do Irrigâmetro é a que apresentar maior valor para  $r^2$ , menor valor para REQM e b próximo de 1.

A comparação dos valores foi realizada fundamentando-se na raiz do erro quadrático médio (REQM) e calculado pela equação:

$$REQM = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (ET_I - ET_o)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

em que:

REQM = raiz do erro quadrático médio, mm d<sup>-1</sup>;

ET<sub>I</sub> = evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, mm d<sup>-1</sup>;

ET<sub>o</sub> = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>; e

N = número de observações.

O coeficiente de determinação indica a precisão, sendo a porcentagem de valores de evapotranspiração que será explicada pela equação de regressão encontrada. A aproximação dos valores estimados em relação aos observados é dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de zero, quando não ocorre nenhuma concordância, a 1, para concordância perfeita.

O índice de concordância é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ET_I - ET_o)^2}{\sum_{i=1}^N \left[ \left( |ET_I - \overline{ET_o}| \right) + \left( |ET_o - \overline{ET_o}| \right) \right]^2} \quad (5)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

ET<sub>I</sub> = evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, mm d<sup>-1</sup>;

ET<sub>o</sub> = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>;

$\overline{ET_o}$  = média dos valores de ET<sub>o</sub> obtidos pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>; e

N = número de observações.

Os efeitos entre as variáveis meteorológicas e a ET<sub>I</sub> e entre os elementos meteorológicos entre si foram determinados utilizando-se a análise de trilha, que possibilita realçar os efeitos diretos e indiretos de um conjunto de variáveis meteorológicas sobre uma variável principal. Esse modelo permite identificar qual

elemento tem maior influência sobre a estimativa da  $ET_I$ , considerando-se Irrigômetros operando com alturas de água diferentes.

A Figura 6 representa o desdobramento dos coeficientes de Pearson em efeitos diretos e indiretos. As setas vermelhas indicam o efeito direto de uma variável explicativa sobre a principal, enquanto as setas verdes representam a interdependência de duas variáveis explicativas e determinam a trilha representativa do efeito indireto sobre a variável básica. Foi realizada a avaliação de multicolinearidade a partir das matrizes dos coeficientes de correlação de cada estação do ano.

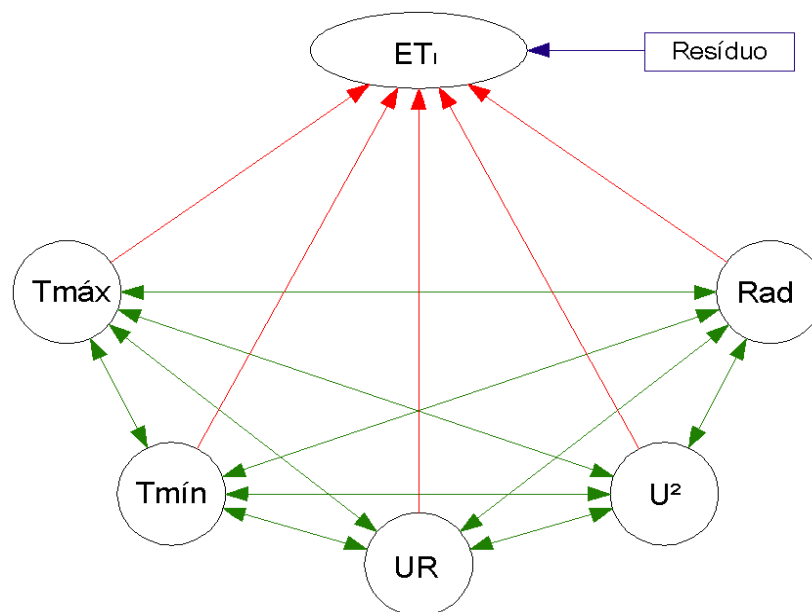


Figura 6 - Diagrama causal indicando as inter-relações diretas e indiretas das variáveis explicativas temperatura máxima ( $T_{máx}$ ), temperatura mínima ( $T_{mín}$ ), umidade relativa ( $UR$ ), velocidade do vento a dois metros de altura ( $U^2$ ) e radiação ( $Rad$ ) com a evapotranspiração do Irrigômetro ( $ET_I$ ).

As variáveis explicativas foram previamente escolhidas, e fez-se, inicialmente, a análise de correlação linear simples (correlação de Pearson), utilizando o programa estatístico GENES 2009.7.0 (2009), para obter as matrizes de correlação e suas significâncias pelo teste “t”, em níveis de 1 e 5% de probabilidade. Posteriormente, foi feita a análise de trilha, com os objetivos de estimar as correlações e analisar a relação entre as variáveis explicativas temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação pelos seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos sobre a variável principal - no caso, a evapotranspiração estimada pelos Irrigômetros operando nos

tratamentos N1, N2, N3, N4, N5 e N6, correspondentes as alturas de água no evaporatório do Irrigâmetro de 2, 3, 4, 5, 6 e 7 cm, respectivamente.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 são mostradas as variações dos valores dos elementos meteorológicos utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência, para o período de desenvolvimento do projeto.

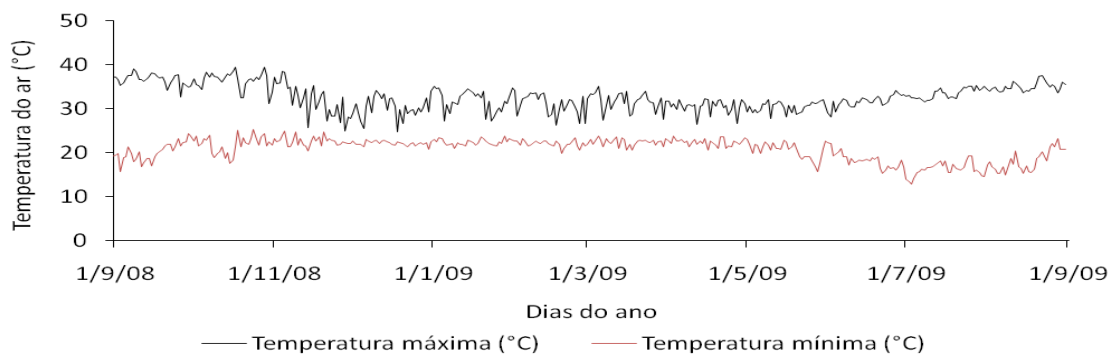


Figura 7 – Variação diária dos valores de temperaturas máxima e mínima para o período experimental.

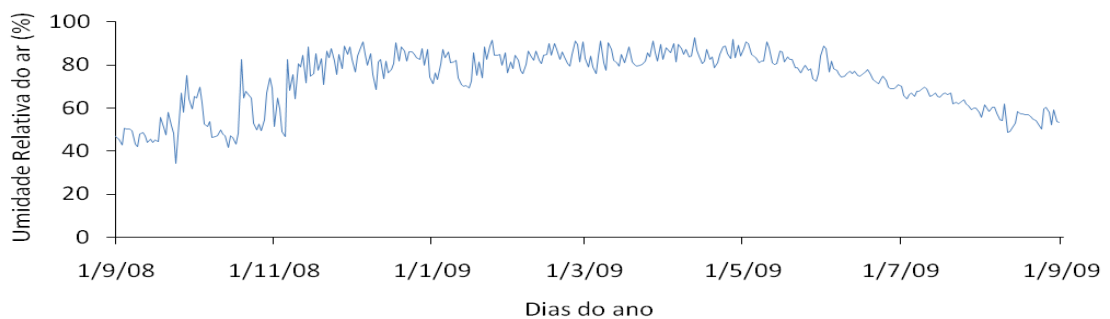


Figura 8 – Variação diária da umidade relativa média do ar durante o período experimental.

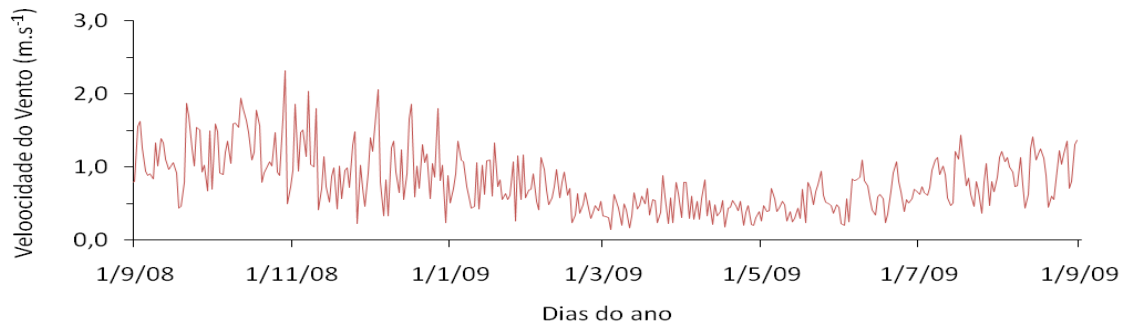


Figura 9 – Variação da velocidade do vento média diária medida no período experimental.

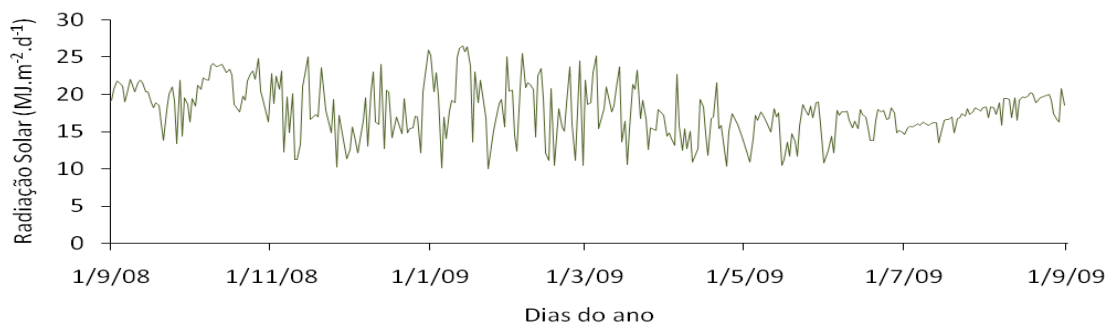


Figura 10 – Variação dos valores de radiação solar diária durante o período experimental.

Observa-se na Figura 7 que, durante o período experimental, o valor médio das temperaturas máxima e mínima foram elevados, correspondendo a 32°C e 20°C, respectivamente, com elevados valores de temperatura do ar durante grande parte do ano.

Na região sul do Estado do Tocantins, as estações de chuva e seca são bem distintas. Na Figura 8, constata-se que a umidade relativa do ar foi elevada durante o período de novembro a maio, período chuvoso, em que a média diária foi de 82%. Durante os meses de junho a outubro, período seco, foi observada média diária da umidade relativa (61%). A média durante todo o período de condução do experimento foi de 73%.

Na Figura 9, observa-se maior variabilidade da velocidade do vento no período de junho a dezembro. A velocidade média do vento durante o período experimental foi de 0,80 m s<sup>-1</sup>.

Na Figura 10, a radiação solar variou relativamente pouco no período de junho a setembro. O valor médio diário durante o período experimental foi de 17,80 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Medeiros (2002) menciona que os principais elementos meteorológicos que proporcionam energia para evaporação e remoção de vapor de água a partir de superfícies evaporantes são a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, além do déficit de pressão de vapor. A radiação solar é o elemento de maior importância na demanda evaporativa da atmosfera.

Na Figura 11 são apresentados os valores do coeficiente do Irrigâmetro em todas as alturas de água analisadas, para as quatro estações do ano. Observa-se que, para todas as estações, os valores do coeficiente do Irrigâmetro aumentam linearmente com o aumento da altura de água dentro do evaporatório. Observa-se, ainda, que as diferenças entre os valores de  $K_I$ , entre as estações do ano, são menores para a altura de água no evaporatório de 2 cm e vão aumentando à medida que as alturas de água no evaporatório são elevadas. As estações de primavera e inverno apresentam valores de  $K_I$  maiores que os observados durante o verão e outono.

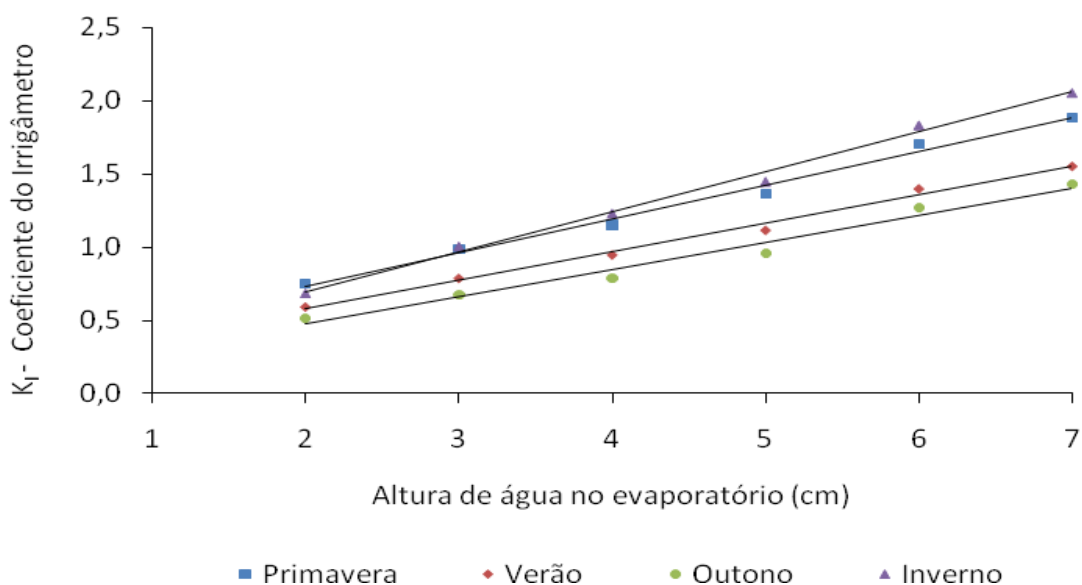


Figura 11 – Coeficiente do Irrigâmetro em função das alturas de água dentro do evaporatório, para as quatro estações do ano.

Na Tabela 1 encontram-se as equações de regressão que devem ser usadas para determinação das alturas de água dentro do evaporatório do Irrigâmetro e seus coeficientes de determinação. Essas são as equações ajustadas, para cada estação do ano, de acordo com a Figura 11.

Tabela 1 – Equações de regressão ajustadas para determinação da altura de água dentro do evaporatório do Irrigâmetro para cada estação do ano

Estações do ano	Equação	Coefficiente de determinação
Primavera	$Y = 0,229X + 0,275$	$r^2 = 0,99$
Verão	$Y = 0,193X + 0,193$	$r^2 = 0,99$
Outono	$Y = 0,186X + 0,101$	$r^2 = 0,98$
Inverno	$Y = 0,272X + 0,151$	$r^2 = 0,99$

Pode ser observado na Tabela 1, que o aumento de 1 cm na altura de água dentro do evaporatório do Irrigâmetro aumenta em 22,90% no valor do  $K_I$  durante a primavera, 19,30% durante o verão, 18,60% no outono e 27,20% no inverno.

Devido ao bom ajuste, a equação obtida para cada estação pode ser utilizada para determinar as alturas de água dentro do evaporatório do Irrigâmetro, a fim de estimar diretamente o valor da evapotranspiração de referência ( $K_I = 1$ ) ou da cultura para qualquer estágio de desenvolvimento, fazendo-se, nesse caso,  $K_I$  igual ao valor de  $K_c$ .

Para a região sul do Estado do Tocantins, o coeficiente do Irrigâmetro aumenta linearmente com o aumento da altura de água dentro do evaporatório. Oliveira (2009), em estudo realizado na região do Alto Paranaíba-MG, encontrou variação exponencial do coeficiente do Irrigâmetro com a elevação da altura de água dentro do evaporatório.

Na Tabela 2 encontram-se os valores das alturas de água recomendadas no evaporatório para estimativa da  $ET_o$  na região sul do Estado do Tocantins, para a primavera, verão, outono e inverno, correspondentes ao valor de  $K_I$  igual a 1. As alturas de água foram estimadas com uso das equações de primeiro grau encontradas na Tabela 1.

Tabela 2 - Alturas de água dentro do evaporatório do Irrigâmetro recomendadas para estimar a evapotranspiração de referência em cada estação do ano

Estações do ano	Altura de água recomendado no evaporatório (cm)
Primavera	3,2
Verão	4,2
Outono	4,8
Inverno	3,1

Como pode ser observado na Tabela 2, a altura de água dentro do evaporatório para estimar a evapotranspiração de referência no outono foi maior do que no verão. Isso pode ser devido à maior nebulosidade ocorrida durante a estação de verão, a qual

propiciava maior interceptação da radiação solar, resultando em menor evapotranspiração.

De acordo com estudos realizados por Oliveira (2009), durante os meses de agosto de 2008 à junho de 2009, para a região do Alto Paranaíba-MG, a análise dos dados mostrou que, para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro, deve-se operar o aparelho com altura de água no evaporatório igual a 4,1 cm. Paula (2009), em trabalho semelhante na região norte de Minas Gerais, conduzido entre junho e agosto de 2008, concluiu que para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro deve-se operar o aparelho com altura de água no evaporatório igual a 3,9 cm. Segundo Caixeta (2009), na região de Viçosa-MG, em estudo realizado entre março e setembro de 2008, para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro deve-se operar o aparelho com altura de água no evaporatório igual a 2,4 cm.

Nas Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos utilizados no estudo do desempenho do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração de referência, quando são considerados todo o período experimental e as estações do ano. Observa-se nas tabelas seguintes que o Irrigâmetro apresenta resultados confiáveis para estimar a evapotranspiração de referência quando são utilizadas alturas de água no evaporatório de 3 cm durante a primavera, 4 cm no verão, 5 cm no outono e 3 cm durante o inverno.

Tabela 3 - Valores do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), raiz do erro quadrático médio (REQM), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), teste “t” e valores de  $ET_I$  e  $ET_o$ , para todo o período experimental

Tratamento	Altura da água (cm)	$K_I$	REQM (mm d <sup>-1</sup> )	d	$r^2$	$lt_{calc}$	$ET_I$ (mm d <sup>-1</sup> )	$ET_o$ (mm d <sup>-1</sup> )
N1	2	0,67	1,78	0,66	0,54	22,79 *	2,78	
N2	3	<b>0,92</b>	<b>1,20</b>	<b>0,83</b>	0,64	4,63 *	3,84	
N3	4	1,11	1,41	0,82	0,70	5,56 *	4,58	
N4	5	1,31	1,98	0,72	0,70	15,00 *	5,45	4,27
N5	6	1,66	3,33	0,55	<b>0,75</b>	27,84 *	6,90	
N6	7	1,85	4,26	0,46	0,69	29,18 *	7,72	

\* significativo a 5% pelo teste t.

Tabela 4 - Valores do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), raiz do erro quadrático médio (REQM), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), teste “t” e valores de  $ET_I$  e  $ET_o$ , para a primavera

Tratamento	Altura da água (cm)	$K_I$	REQM (mm d <sup>-1</sup> )	d	$r^2$	$lt_{calc}$	$ET_I$ (mm d <sup>-1</sup> )	$ET_o$ (mm d <sup>-1</sup> )
N1	2	0,75	1,61	0,78	0,65	9,24 *	3,65	
<b>N2</b>	3	<b>0,98</b>	<b>1,14</b>	<b>0,90</b>	<b>0,74</b>	<b>0,48 ns</b>	4,75	
N3	4	1,15	1,52	0,84	0,71	4,29 *	5,60	4,93
N4	5	1,37	2,46	0,70	0,67	8,59 *	6,69	
N5	6	1,70	4,04	0,54	0,73	14,42 *	8,30	
N6	7	1,88	4,99	0,45	0,68	15,96 *	9,24	

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t.

Tabela 5 - Valores do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), raiz do erro quadrático médio (REQM), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), teste “t” e valores de  $ET_I$  e  $ET_o$ , para o verão

Tratamento	Altura da água (cm)	$K_I$	REQM (mm d <sup>-1</sup> )	d	$r^2$	$lt_{calc}$	$ET_I$ (mm d <sup>-1</sup> )	$ET_o$ (mm d <sup>-1</sup> )
N1	2	0,59	1,95	0,48	0,04	12,25 *	2,57	
N2	3	0,79	1,42	0,54	0,10	4,84 *	3,43	
<b>N3</b>	<b>4</b>	<b>0,95</b>	<b>1,13</b>	<b>0,73</b>	0,31	<b>1,18 ns</b>	4,05	4,23
N4	5	1,12	1,24	0,71	0,35	2,52 *	4,77	
N5	6	1,40	2,15	0,55	<b>0,46</b>	7,64 *	5,95	
N6	7	1,55	2,90	0,43	0,35	8,32 *	6,62	

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t.

Tabela 6 - Valores do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), raiz do erro quadrático médio (REQM), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), teste “t” e valores de  $ET_I$  e  $ET_o$ , para o outono

Tratamento	Altura da água (cm)	$K_I$	REQM (mm d <sup>-1</sup> )	d	$r^2$	$lt_{calc}$	$ET_I$ (mm d <sup>-1</sup> )	$ET_o$ (mm d <sup>-1</sup> )
N1	2	0,52	1,72	0,43	0,15	19,98 *	1,67	
N2	3	0,67	1,25	0,53	0,26	13,08 *	2,18	
N3	4	0,79	0,94	0,72	0,55	8,65 *	2,51	3,21
<b>N4</b>	<b>5</b>	<b>0,96</b>	<b>0,79</b>	<b>0,79</b>	0,50	<b>1,45 ns</b>	3,05	
N5	6	1,27	1,25	0,68	0,61	7,98 *	4,02	
N6	7	1,43	1,70	0,58	<b>0,69</b>	11,84 *	4,51	

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t.

Tabela 7 - Valores do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), raiz do erro quadrático médio (REQM), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), teste “t” e valores de  $ET_I$  e  $ET_o$ , para o inverno

Tratamento	Altura da água (cm)	$K_I$	REQM ( $\text{mm d}^{-1}$ )	d	$r^2$	$lt_{\text{calc}}$	$ET_I$ ( $\text{mm d}^{-1}$ )	$ET_o$ ( $\text{mm d}^{-1}$ )
N1	2	0,69	1,85	0,51	0,37	12,62 *	3,16	
<b>N2</b>	<b>3</b>	<b>1,01</b>	<b>1,10</b>	<b>0,74</b>	0,48	<b>0,32 ns</b>	4,67	
N3	4	1,23	1,68	0,64	0,60	8,29 *	5,67	4,67
N4	5	1,45	2,44	0,49	0,63	17,32 *	6,72	
N5	6	1,84	4,16	0,33	<b>0,68</b>	29,41 *	8,51	
N6	7	2,06	5,36	0,26	0,53	24,82 *	9,54	

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t.

Nas Tabelas 3 a 7, observa-se que a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro aumenta com a elevação da altura de água dentro do evaporatório. Quando se eleva a altura de água no evaporatório, a superfície de água exposta à atmosfera aumenta e fica mais próxima da borda superior do evaporatório, sofrendo maior influência dos elementos meteorológicos. À medida que a altura de água aumentou dentro do evaporatório, ocorreu também maior interceptação da radiação solar, variável com grande influência na evaporação da água, além de favorecer a ação do vento na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante, acarretando maiores valores de evaporação.

Com finalidade prática, os valores dos parâmetros não convencionais foram usados para indicar as melhores opções de alturas de água no evaporatório para estimar a evapotranspiração de referência, considerando-se valor de  $K_I$  próximo da unidade, menor valor de REQM e coeficiente de concordância (d) mais próximo de 1, que é o valor de concordância perfeita. Esse critério foi usado na análise para todas as estações do ano.

Quando se considera todo o período experimental (Tabela 3), o valor médio da evapotranspiração de referência foi de  $4,27 \text{ mm d}^{-1}$ , e a melhor alternativa foi obtida com o Irrigâmetro operando com água no evaporatório no tratamento N2, que corresponde à altura de coluna de água de 3 cm, indicando melhor desempenho para a estimativa da  $ET_o$ , diante das demais alturas estudadas. Entretanto, para essa mesma altura, o teste “t” é significativo a 5% de probabilidade, indicando que o valor de  $\beta_1$  é diferente do valor de  $K_I$  para o período total de coleta dos dados, sendo importante fazer a análise por estação do ano.

Na Tabela 4, é possível observar que na primavera a melhor condição em que o Irrigâmetro deve se encontrar para estimar a evapotranspiração de referência é quando a

altura da água no evaporatório estiver em 3 cm (N2). O valor médio de  $ET_o$  determinado pelo método-padrão foi de  $4,93 \text{ mm d}^{-1}$ , valor muito próximo da  $ET_I$  média ( $4,75 \text{ mm d}^{-1}$ ) do tratamento N2 na primavera. Observa-se que o teste “t” foi não significativo apenas para  $K_I = 0,98$ , ou seja, aceita-se a hipótese de que esse valor é estatisticamente igual a um ( $K_I = 1$ ), a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Na Tabela 5, observa-se que, no verão, a melhor condição para o Irrigâmetro estimar a evapotranspiração de referência é quando a altura de água no evaporatório estiver em 4 cm (N3). Essa alternativa é a que possui menor REQm, maior índice de concordância e valor do coeficiente do Irrigâmetro mais próximo de 1. O valor de  $ET_o$  médio, determinado pelo método-padrão, corresponde a  $4,23 \text{ mm d}^{-1}$ , valor muito próximo da  $ET_I$  média ( $4,05 \text{ mm d}^{-1}$ ) da altura 4 cm no verão. O teste “t” foi não significativo apenas para  $K_I = 0,95$ .

Constata-se na Tabela 6, referente à estação do outono, que a altura que melhor estima os valores de  $ET_o$  é de 5 cm em relação ao fundo do evaporatório, sendo a estimativa média de  $ET_o$  igual a  $3,21 \text{ mm}$ , e a  $ET_I$  mais próxima igual a  $3,05 \text{ mm}$  correspondente ao tratamento N4 e sendo o teste “t” não significativo apenas para  $K_I = 0,96$ .

Durante o inverno (Tabela 7), pode-se observar que o tratamento que melhor representa a situação para estimar a evapotranspiração de referência é o N2. Observa-se que o valor médio da  $ET_o$  é igual ao valor da  $ET_I$  determinada pela altura 3 cm; além disso, o teste “t” foi não significativo também para essa altura de água, sendo  $K_I = 1,01$ . O tratamento N1 subestima a  $ET_o$ , enquanto os tratamentos N3, N4, N5 e N6 a superestimam.

É importante observar, nas Tabelas 4, 5, 6 e 7, que o teste “t” confirma a hipótese de que os valores  $K_I$  são estatisticamente iguais a 1 apenas para as alturas de água que melhor estimaram a evapotranspiração de referência para cada estação do ano.

Nas Figuras 16 a 20, cada gráfico é referente a uma altura de água, em relação ao fundo do evaporatório, sendo 2, 3, 4, 5, 6 e 7 cm, respectivamente. As equações de regressão apresentadas em cada gráfico explicam o comportamento dos valores de  $ET_I$  em relação aos de  $ET_o$  quando a linha de tendência é forçada a passar pela origem dos eixos cartesianos. Assim, o valor do coeficiente do Irrigâmetro é igual ao valor da inclinação da linha de tendência (b).

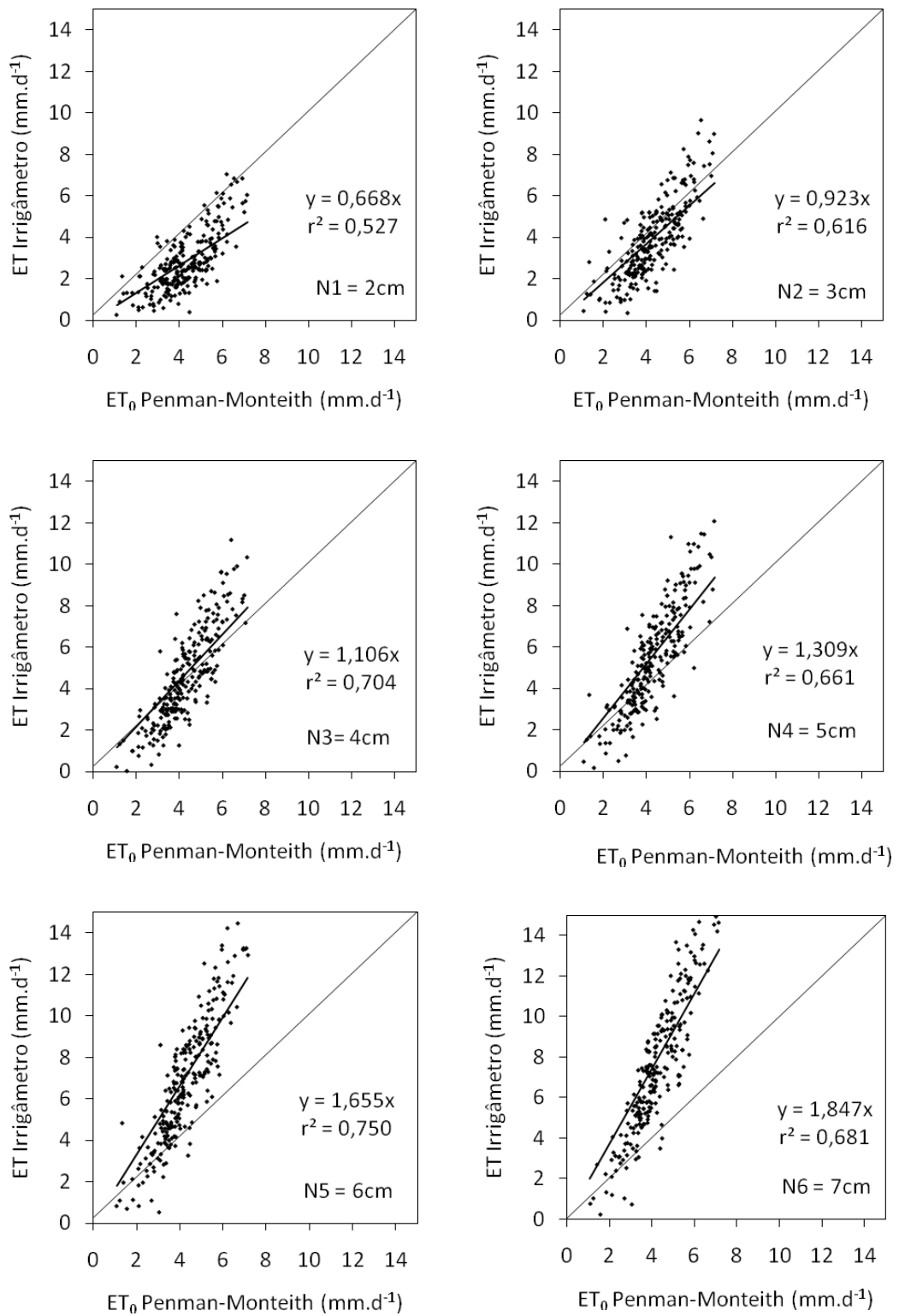


Figura 12 - Comparação entre a evapotranspiração diária estimada com o uso do Irrigâmetro obtida para cada altura de água no evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6) e o valor de ET<sub>0</sub> obtido pelo método-padrão de Penman-Monteith - FAO 56 para os dados coletados ao longo de todo o período experimental.

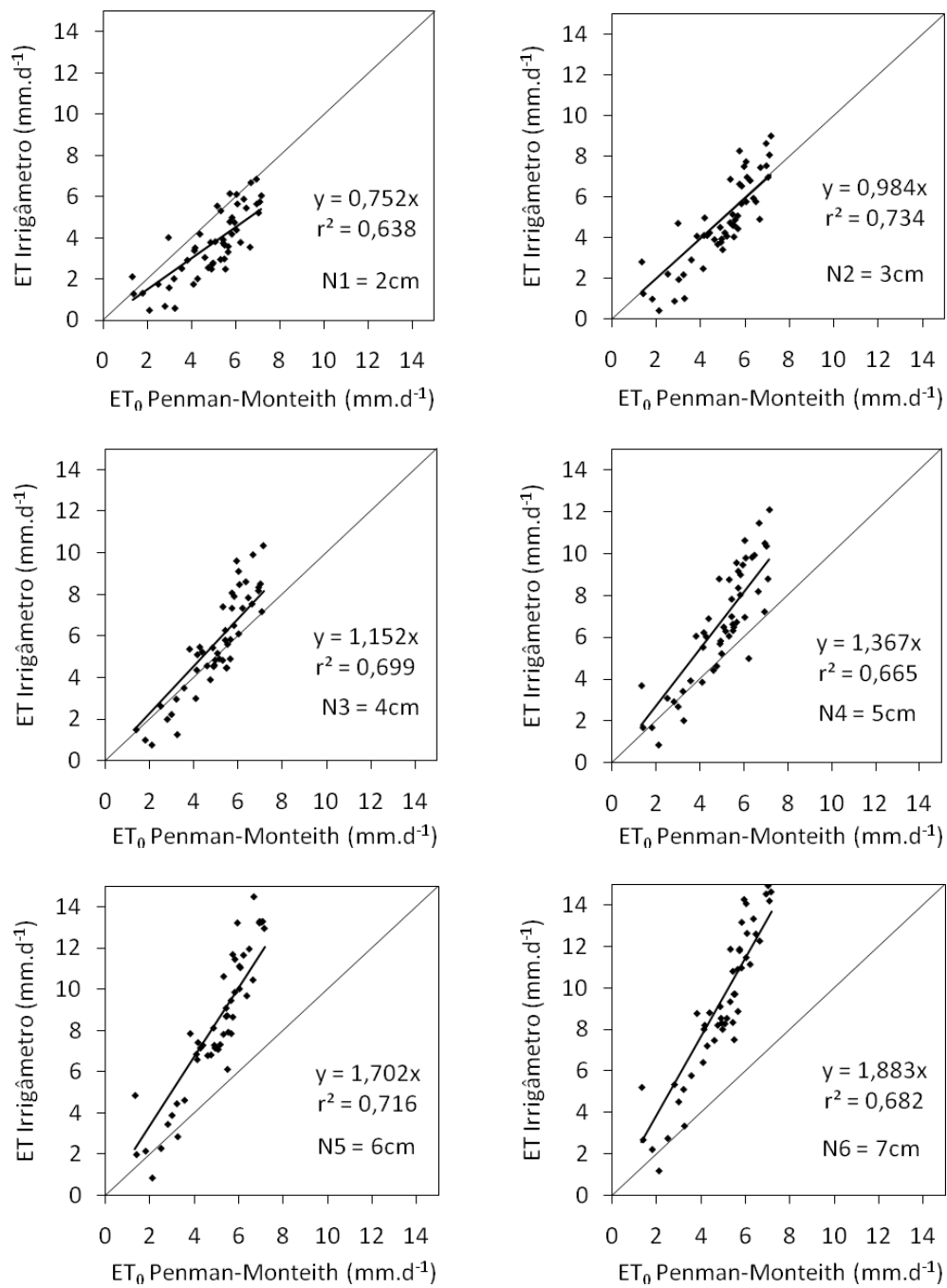


Figura 13 - Comparação entre a evapotranspiração diária estimada com o uso do Irrigâmetro obtida para cada altura de água no evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6) e a ET<sub>0</sub> obtida pelo método-padrão de Penman-Monteith - FAO 56, para a primavera.

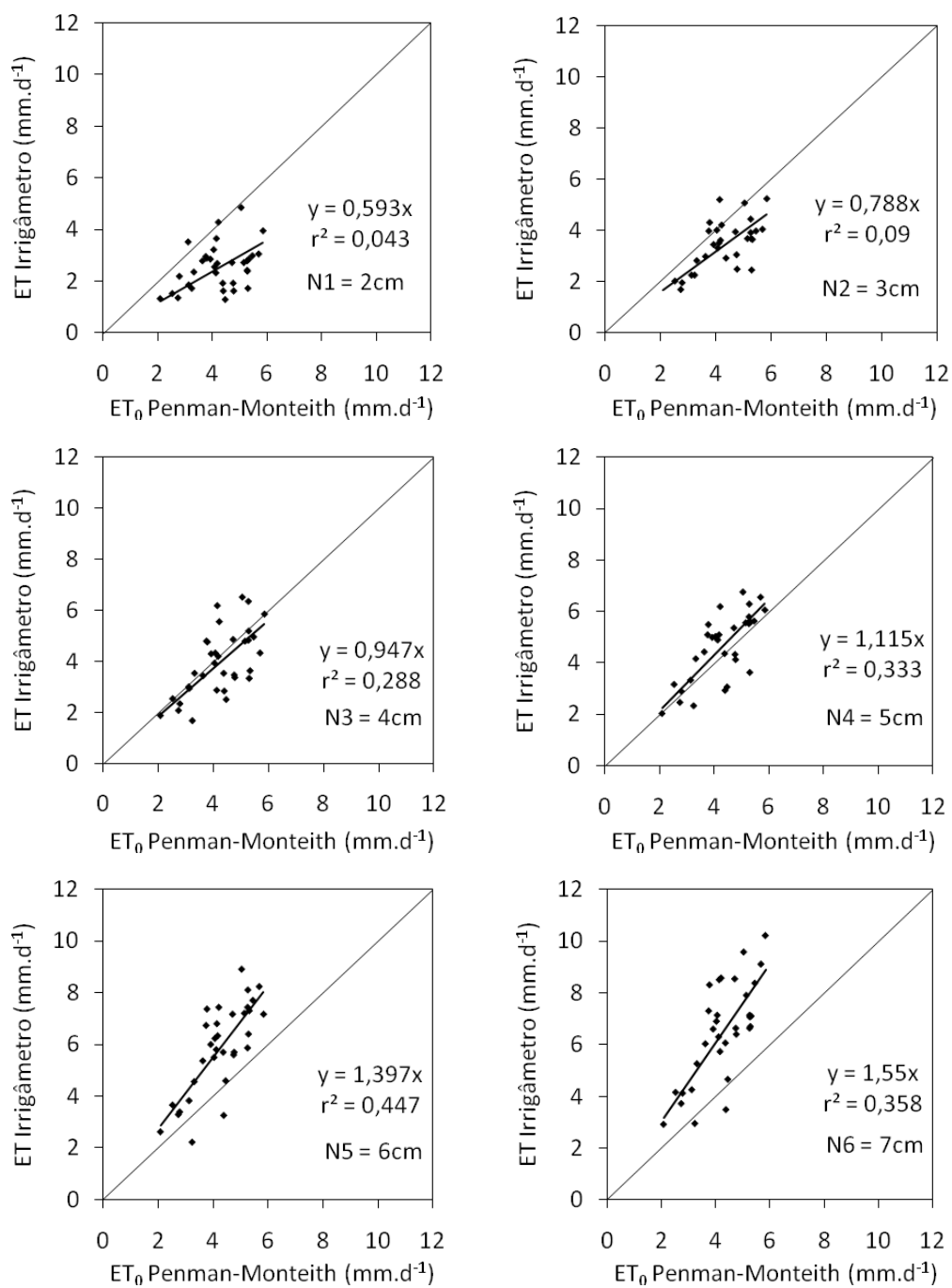


Figura 14 - Comparação entre a evapotranspiração diária estimada com o uso do Irrigâmetro obtida para cada altura de água no evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6) e a ET<sub>0</sub> obtida pelo método-padrão de Penman-Monteith - FAO 56, para o verão.

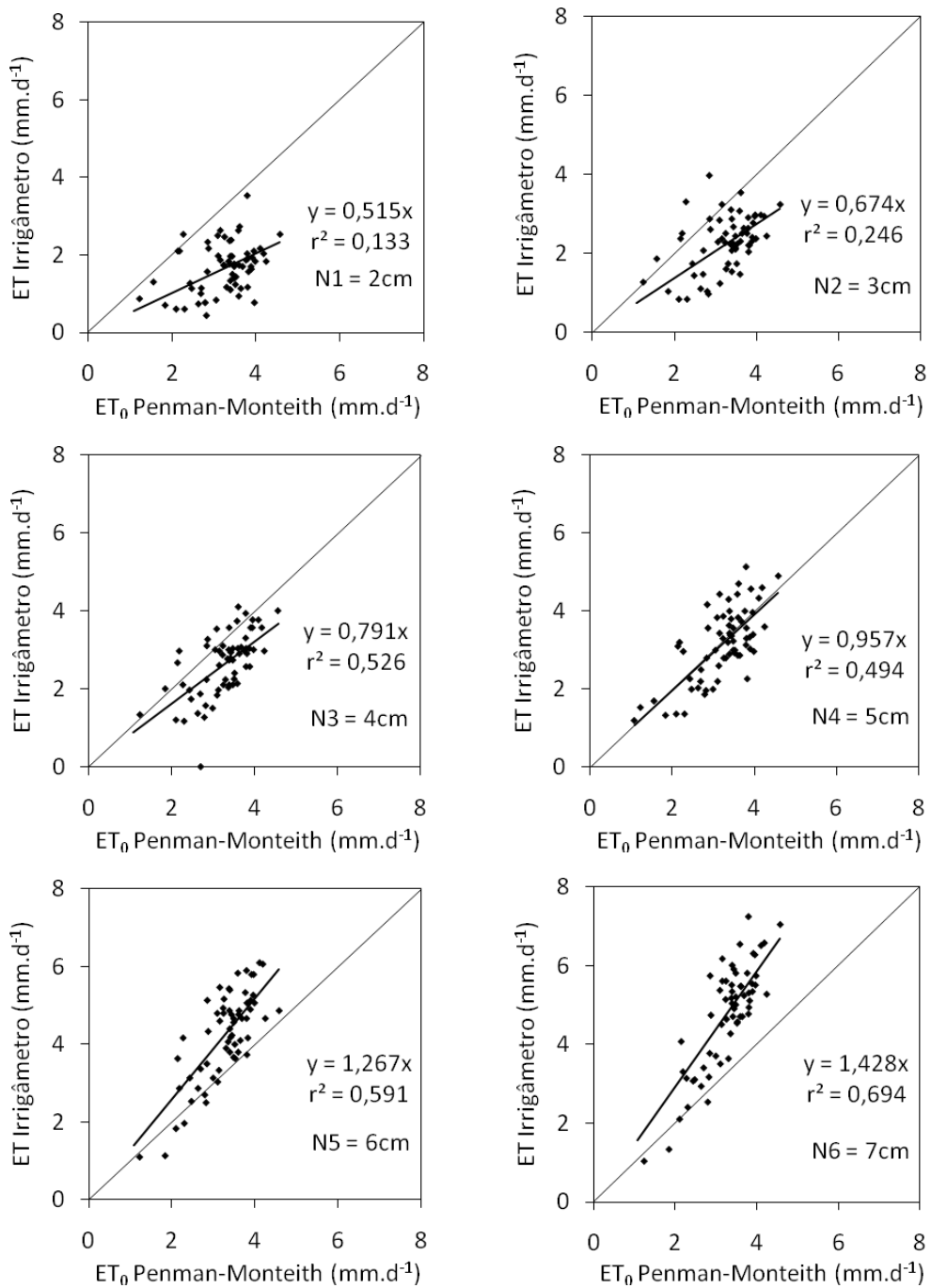


Figura 15 - Comparação entre a evapotranspiração diária estimada com o uso do Irrigâmetro obtida para cada altura de água no evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6) e a ET<sub>0</sub> obtida pelo método-padrão de Penman-Monteith - FAO 56, para o outono.

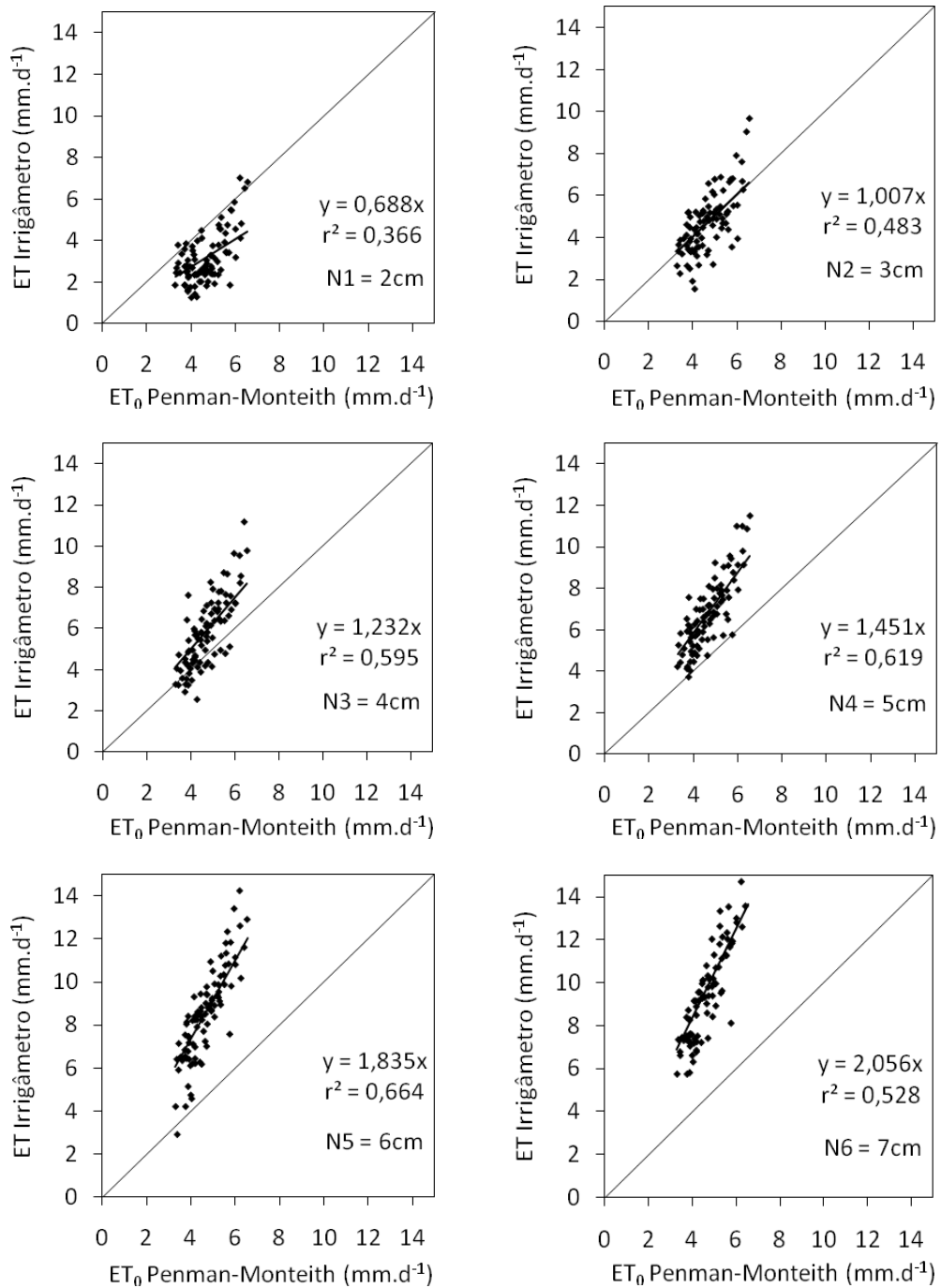


Figura 16 - Comparação entre a evapotranspiração diária estimada com o uso do Irrigâmetro obtida para cada altura de água no evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6) e a ET<sub>0</sub> obtida pelo método-padrão de Penman-Monteith - FAO 56, para o inverno.

Na Tabela 3, observa-se que, para os tratamentos N1 e N2, o Irrigâmetro subestima os valores de  $ET_o$ , ocorrendo superestimativa para os tratamentos N3, N4, N5 e N6. Os valores do coeficiente do Irrigâmetro para cada altura de água estudada foram iguais a 0,67; 0,92; 1,11; 1,31; 1,66; e 1,85.

O maior coeficiente de determinação foi obtido para os dados do tratamento N5, ou seja, a equação de regressão explica melhor os valores de  $ET_i$ ; contudo, o que melhor estima a  $ET_o$  é o tratamentos N2, pois apresenta  $K_I$  mais próximo de 1, menor REQM e maior valor do índice de concordância (d).

Para o período de primavera (Figura 13), observa-se que no tratamento N2 a linha de tendência é praticamente paralela à linha 1:1, sendo a melhor alternativa para estimar a evapotranspiração de referência. As alturas 2 e 3 cm subestimam a evapotranspiração de referência, enquanto as alturas 4, 5, 6 e 7 cm superestimam a  $ET_o$ . A altura 3 cm é a que fornece melhor estimativa da  $ET_o$  na primavera, com a linha de tendência mais próxima da reta de inclinação 1:1. No caso da primavera, como mostrados na Tabela 4, todos os parâmetros estatísticos indicaram N2 como a melhor opção, tendo 1,14 como valor da REQM; 0,90 para o índice de concordância de Willmott e 0,74 para o coeficiente de determinação.

O verão na região sul de Tocantins é uma estação bastante chuvosa, com temperatura e umidade relativa elevadas. Os dias em que ocorreram precipitação pluvial foram excluídos, tendo sido analisados os dados de 35 dias durante toda a estação.

Na Figura 14, pode-se verificar que as linhas de tendência nos tratamentos N3 e N4 são praticamente paralelas à reta 1:1; no entanto, apenas o tratamento N4 é não significativo pelo teste “t” a 5% de probabilidade, ou seja, estatisticamente, o valor de  $K_I$  para essa altura é igual a 1. Observa-se que os pontos estão bastante dispersos, resultando em baixos valores de coeficientes de determinação. Nos tratamentos N1, N2 e N3 há subestimativa dos valores de  $ET_o$ , ocorrendo superestimativa nos demais.

Na Figura 15, percebe-se que N1, N2, N3 e N4 subestimam os valores de  $ET_o$ , enquanto N5 e N6 os superestimam. Apesar de subestimar o valor de  $ET_o$  no outono, a altura 5 cm é a que melhor estima a evapotranspiração de referência para essa estação do ano.

Durante o inverno (Figura 16), os valores de  $ET_o$  são subestimados quando a água dentro do evaporatório se encontra na altura 2 cm e superestimados nas demais alturas. O inverno foi a estação do ano cujo valor de  $K_I$  mais se aproximou da unidade, com água no evaporatório na altura 3 cm, situação em que o valor do coeficiente do Irrigâmetro foi de 1,01.

Segundo Caixeta (2009), na região de Viçosa-MG, em estudo realizado entre março e setembro de 2008, o Irrigâmetro, operando com água na altura 2 cm, superestimou a evapotranspiração para valores menores que  $2,2 \text{ mm d}^{-1}$  e subestimou para valores maiores. Em relação às alturas 3, 4, 5 e 6 cm o Irrigâmetro superestimou a  $ET_0$  obtida pelo método Penman-Monteith; contudo, na altura 3 cm a linha de tendência para o Irrigâmetro praticamente acompanha a linha de valores 1:1, considerando o método de Penman-Monteith – FAO 56 como padrão.

De acordo com estudos realizados por Oliveira (2009), durante os meses de agosto de 2008 à junho de 2009, para a região do Alto Paranaíba-MG, o Irrigâmetro subestimou a evapotranspiração de referência, operando com alturas de água nos evaporatórios em 1, 2, 3 e 4 cm, e superestimou nas alturas 5 e 6 cm. A altura de água no evaporatório em 4 cm (N4) foi o que melhor se ajustou para a estimativa da evapotranspiração de referência, considerando o método de Penman-Monteith - FAO 56 como padrão. Oliveira (2009) mostra que valores de  $K_I$  subestimados ( $K_I < 1$ ) e superestimados ( $K_I > 1$ ) podem ser usados para estimar diretamente a evapotranspiração da cultura utilizando o Irrigâmetro, com correspondência para valores de  $K_c$  menores e maiores que a unidade, respectivamente.

As figuras seguintes mostram as variações da evapotranspiração de referência e da evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, para as condições de alturas de água que apresentaram melhor desempenho do aparelho.

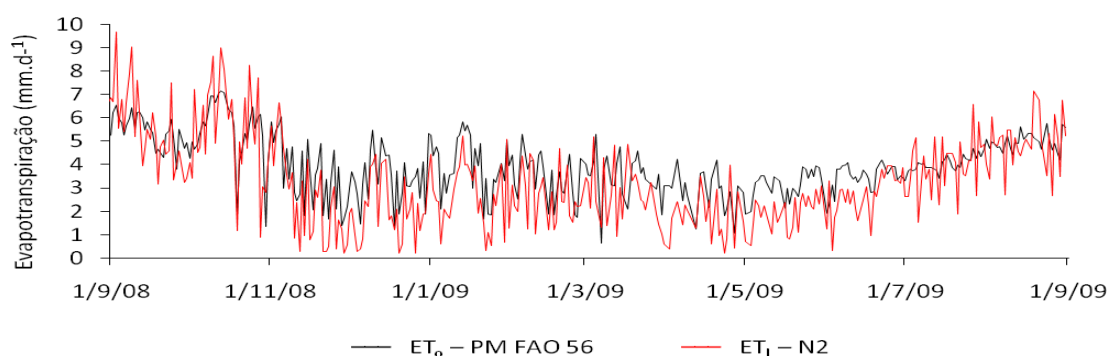


Figura 17 – Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro ( $ET_1$ ) com altura de água no evaporatório igual a 3 cm, ao longo do período experimental.

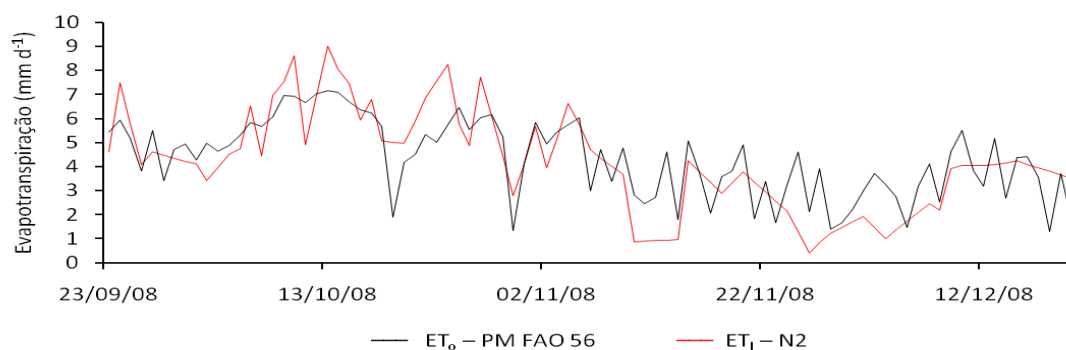


Figura 18 –  $ET_0$  e  $ET_1$  com altura de água no evaporatório em 3 cm (N2), durante a primavera.

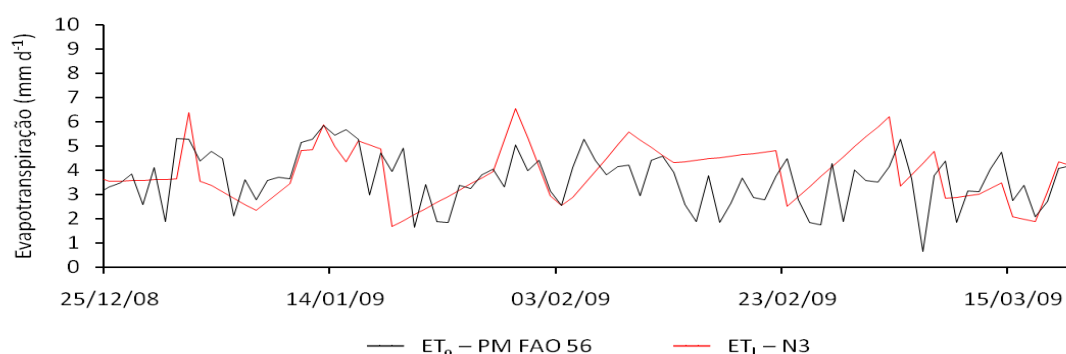


Figura 19 -  $ET_0$  e  $ET_1$  com altura de água no evaporatório em 4 cm (N3), durante o verão.

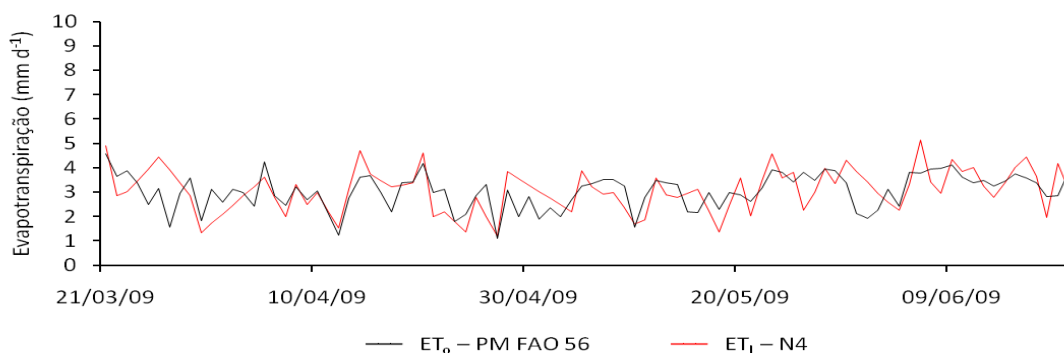


Figura 20 -  $ET_0$  e  $ET_1$  com altura de água no evaporatório em 5 cm (N4), durante o outono.

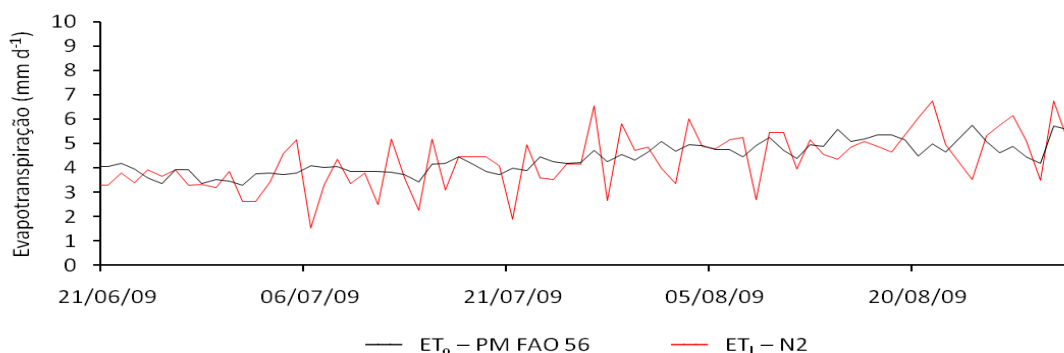


Figura 21 -  $ET_0$  e  $ET_1$  com altura de água no evaporatório em 3 cm (N2), durante o inverno.

A variação da  $ET_1$  ocorrida no gráfico da Figura 19, referente ao período do verão, foi ocasionada pela pequena disponibilidade de dados por causa da exclusão dos dias chuvosos. Observa-se nas figuras anteriores que a evapotranspiração determinada pelo Irrigâmetro tem uma variação semelhante ao da evapotranspiração estimada pela equação de Penman-Monteith.

Os resultados da análise de trilha para cada mês encontram-se nas Tabelas 13, 15, 16, 17 e 18, em que são descritos os efeitos diretos e indiretos dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, correspondente a cada altura de água no evaporatório.

Tabela 8 – Estimativa da correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação para cada estação do ano e cada altura de água no evaporatório.

Correlação Total (Pearson)						
Variável	Primavera					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
T. máxima	0,7266**	0,8256**	0,8372**	0,7997**	0,8338**	0,8342**
T. mínima	-0,3081*	-0,2132 ns	-0,3544**	-0,2845*	-0,3155*	-0,1056 ns
UR	-0,7428**	-0,8572**	-0,8447**	-0,7885**	-0,8234**	-0,8007**
U <sup>2</sup>	0,2881*	0,3061*	0,3062*	0,3343*	0,3877**	0,3310*
Rad	0,7223**	0,7286**	0,7121**	0,6980**	0,7092**	0,6994**
Verão						
T. máxima	0,2758 ns	0,2672 ns	0,5211**	0,5378**	0,6104**	0,5660**
T. mínima	0,0790 ns	0,0633 ns	0,0982 ns	0,1502 ns	0,2115 ns	0,2200 ns
UR	-0,2530 ns	-0,3518*	-0,5004**	-0,5399**	-0,6103**	-0,5288**
U <sup>2</sup>	0,0347 ns	-0,0232 ns	0,0897 ns	0,1268 ns	0,2094 ns	0,1672 ns
Rad	0,4198*	0,3534*	0,5989**	0,6452**	0,7150**	0,6380**
Outono						
T. máxima	0,2647*	0,2916*	0,4133**	0,4686**	0,5883**	0,6227**
T. mínima	-0,0358 ns	-0,1347 ns	-0,3144*	-0,2354 ns	-0,3594**	-0,3426**
UR	-0,3066*	-0,3308**	-0,5823**	-0,5971**	-0,7150**	-0,7367**
U <sup>2</sup>	0,1956 ns	0,2240 ns	0,3774**	0,3214**	0,3927**	0,4015**
Rad	0,3918**	0,5210**	0,6846**	0,6979**	0,7366**	0,7921**
Inverno						
T. máxima	0,5150**	0,5065**	0,5821**	0,5616**	0,5887**	0,5670**
T. mínima	0,2528*	0,2354*	0,2579*	0,2687**	0,3267**	0,3951**
UR	-0,5738**	-0,5918**	-0,6552**	-0,6724**	-0,7033**	-0,6600**
U <sup>2</sup>	0,3669**	0,4109**	0,4795**	0,5355**	0,5378**	0,4831**
Rad	0,4668**	0,5193**	0,5479**	0,5378**	0,5695**	0,5054**

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t; \*\* significativo a 1% pelo teste t.

Na Tabela 8 são apresentados os valores do coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas (temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação) e a variável principal ET<sub>I</sub>, para cada altura de água no evaporatório do Irrigâmetro e para cada estação do ano.

Há correlação positiva entre duas variáveis quando o aumento de uma resulta em aumento da outra. A temperatura máxima tem correlação significativa com a ET<sub>I</sub> em grande parte das situações, exceto durante o verão nos tratamentos N1 e N2, com 2 e 3 cm de altura de água no evaporatório, respectivamente, onde essas correlações são não significativas. Durante a primavera, a correlação da temperatura mínima com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro é negativa e não significativa para os tratamentos N2 e N6 e, além disso, as correlações são negativas; no verão, ela não tem correlação significativa em nenhuma situação quanto à altura de água no evaporatório.

Quando se compara a temperatura mínima com a  $ET_I$  durante o outono, ocorre correlação significativa nos tratamentos N3, N5 e N6 e não significativa nos outros, porém durante o inverno existe correlação positiva significativa em todos os tratamentos.

A umidade relativa tem correlação negativa com a  $ET_I$  em todas as estações do ano, sendo não significativa apenas quando o aparelho é utilizado com água no evaporatório na altura 2 cm, durante o verão.

A velocidade do vento possui correlação positiva com a  $ET_I$  em quase todas as alturas de água e para todas as estações do ano, exceto no tratamento N2 durante o verão, porém são correlações baixas e algumas não significativas a 5% de probabilidade pelo teste “t”. Observa-se também que, à medida que a altura de água aumenta o valor da correlação também aumenta, devido à menor distância da superfície da água em relação à borda do evaporatório, que facilita a remoção do ar e contribui para aumentar o déficit de saturação de vapor de água.

A radiação solar é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para estimativa da evapotranspiração. As correlações entre a radiação solar e a  $ET_I$ , em todos os tratamentos e em todas as estações do ano, são significativas a 1% de probabilidade pelo teste “t”, exceto nos tratamentos N1 e N2 durante o verão, em que a significância ocorreu a 5% de probabilidade.

Os elementos meteorológicos que tiveram maiores correlações com a  $ET_I$  foram temperatura máxima, radiação e umidade relativa. A temperatura mínima e a velocidade do vento tiveram correlações baixas ou não significativas com a  $ET_I$ , à exceção das estações de primavera e inverno. Caixeta (2009) observou, em estudo realizado entre março e setembro de 2008 na região de Viçosa-MG, que a temperatura mínima foi o elemento que apresentou a menor correlação com a evapotranspiração estimada no Irrigâmetro, enquanto a velocidade do vento mostrou correlação não significativa.

Por meio da análise de trilha, as correlações de cada elemento meteorológico temperatura máxima ( $T_{max}$ ), temperatura mínima ( $T_{min}$ ), umidade relativa (UR), velocidade do vento a dois metros de altura ( $U^2$ ) e radiação (Rad), com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, para cada estação do ano, em seus efeitos diretos e indiretos, para verificar a influência de cada elemento meteorológico sobre essa evapotranspiração.

Os resultados da análise de trilha para cada estação do ano encontram-se nas Tabelas 9, 10, 11 e 12, em que são descritos os efeitos diretos e indiretos das variáveis

meteorológicas sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, correspondente a cada altura de água no evaporatório.

Tabela 9 - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação, para cada altura de água na evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6), na primavera

Primavera						
Temperatura máxima	Tratamentos					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,1396	0,2001	0,4159	0,4016	0,4303	0,4588
Indireto via T mín	0,0212	0,0063	0,0241	0,0175	0,0192	0,0009
Indireto via UR	0,2459	0,4470	0,2717	0,2050	0,2209	0,2366
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0104	0,0120	-0,0004	0,0186	0,0328	0,0284
Indireto via Rad	0,3096	0,1600	0,1260	0,1570	0,1305	0,1095
Total (cor.Pearson)	0,7266**	0,8256**	0,8372**	0,7997**	0,8338**	0,8342**
Temperatura mínima						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,2113	-0,1045	-0,2400	-0,1747	-0,1919	-0,0123
Indireto via T Max	-0,0140	-0,0121	-0,0417	-0,0402	-0,0431	-0,0320
Indireto via UR	-0,0598	-0,0889	-0,0661	-0,0499	-0,0537	-0,0469
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0062	-0,0068	0,0002	-0,0111	-0,0196	-0,0147
Indireto via Rad	-0,0168	-0,0010	-0,0068	-0,0085	-0,0071	0,0003
Total (cor.Pearson)	-0,3081*	-0,2132 ns	-0,3544**	-0,2845*	-0,3155*	-0,1056 ns
Umidade relativa						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,2751	-0,5010	-0,3040	-0,2294	-0,2472	-0,2645
Indireto via T Max	-0,1247	-0,1786	-0,3717	-0,3589	-0,3846	-0,4105
Indireto via T mín	-0,0460	-0,0185	-0,0522	-0,0380	-0,0417	-0,0022
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0090	-0,0104	0,0003	-0,0162	-0,0286	-0,0228
Indireto via Rad	-0,2880	-0,1487	-0,1172	-0,1460	-0,1214	-0,1007
Total (cor.Pearson)	-0,7428**	-0,8572**	-0,8447**	-0,7885**	-0,8234**	-0,8007**
Velocidade do vento						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,0316	0,0373	-0,0012	0,0567	0,0999	0,0903
Indireto via T Max	0,0458	0,0645	0,1365	0,1318	0,1413	0,1445
Indireto via T mín	0,0415	0,0190	0,0471	0,0343	0,0377	0,0020
Indireto via UR	0,0787	0,1396	0,0869	0,0656	0,0707	0,0668
Indireto via Rad	0,0905	0,0457	0,0368	0,0459	0,0382	0,0275
Total (cor.Pearson)	0,2881*	0,3061*	0,3062*	0,3343*	0,3877**	0,3310*
Radiação						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,4012	0,2081	0,1633	0,2034	0,1692	0,1425
Indireto via T máx	0,1077	0,1539	0,3209	0,3099	0,3320	0,3526
Indireto via T mín	0,0088	0,0005	0,0100	0,0073	0,0080	0,0000
Indireto via UR	0,1975	0,3579	0,2182	0,1646	0,1774	0,1870
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0071	0,0082	-0,0003	0,0128	0,0225	0,0174
Total (cor.Pearson)	0,7223**	0,7286**	0,7121**	0,6980**	0,7092**	0,6994**
Coef. Determinação	0,67	0,78	0,81	0,71	0,78	0,73
Ef. Variável residual	0,57	0,47	0,44	0,54	0,47	0,52

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t; \*\* significativo a 1% pelo teste t.

Tabela 10 - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação, para cada altura de água na evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6), no verão

Verão						
Temperatura máxima	Tratamentos					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,1468	-0,2702	0,1186	-0,0210	-0,0061	0,0933
Indireto via T mín	-0,0011	0,0043	-0,0211	0,0103	0,0389	0,0372
Indireto via UR	-0,2870	0,3290	-0,0677	-0,0291	-0,0331	-0,1085
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0023	-0,0270	-0,0077	-0,0013	0,0132	0,0124
Indireto via Rad	0,7130	0,2311	0,4990	0,5788	0,5976	0,5316
Total (cor.Pearson)	0,2758 ns	0,2672 ns	0,5211**	0,5378**	0,6104**	0,566**
Temperatura mínima						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,0031	0,0127	-0,0618	0,0302	0,1138	0,1088
Indireto via T máx	-0,0502	-0,0924	0,0406	-0,0072	-0,0021	0,0319
Indireto via UR	-0,0298	0,0341	-0,0070	-0,0030	-0,0034	-0,0113
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0050	0,0580	0,0166	0,0027	-0,0284	-0,0265
Indireto via Rad	0,1570	0,0509	0,1099	0,1274	0,1316	0,1171
Total (cor.Pearson)	0,0790 ns	0,0633 ns	0,0982 ns	0,1502 ns	0,2115 ns	0,2200 ns
Umidade relativa						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,3518	-0,4032	0,0829	0,0356	0,0406	0,1330
Indireto via T máx	0,1198	0,2204	-0,0968	0,0171	0,0050	-0,0762
Indireto via T mín	0,0003	-0,0011	0,0052	-0,0026	-0,0096	-0,0092
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0060	0,0690	0,0197	0,0032	-0,0338	-0,0315
Indireto via Rad	-0,7309	-0,2369	-0,5115	-0,5933	-0,6125	-0,5449
Total (cor.Pearson)	-0,2530 ns	-0,3518*	-0,5004**	-0,5399**	-0,6103**	-0,5288**
Velocidade do vento						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,0165	-0,1910	-0,0545	-0,0090	0,0935	0,0873
Indireto via T Max	-0,0208	-0,0383	0,0168	-0,0030	-0,0009	0,0132
Indireto via T mín	0,0009	-0,0039	0,0188	-0,0092	-0,0346	-0,0330
Indireto via UR	-0,1270	0,1456	-0,0300	-0,0129	-0,0147	-0,0480
Indireto via Rad	0,1981	0,0642	0,1387	0,1608	0,1660	0,1477
Total (cor.Pearson)	0,0347 ns	-0,0232 ns	0,0897 ns	0,1268 ns	0,2094 ns	0,1672 ns
Radiação						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,8499	0,2755	0,5948	0,6899	0,7123	0,6337
Indireto via T máx	-0,1232	-0,2267	0,0995	-0,0176	-0,0051	0,0783
Indireto via T mín	-0,0006	0,0023	-0,0114	0,0056	0,0210	0,0201
Indireto via UR	-0,3025	0,3467	-0,0713	-0,0306	-0,0349	-0,1144
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0039	-0,0445	-0,0127	-0,0021	0,0218	0,0203
Total (cor.Pearson)	0,4198*	0,3534*	0,5989**	0,6452**	0,7150**	0,6380**
Coef. Determinação	0,23	0,17	0,37	0,42	0,52	0,43
Ef. Variável residual	0,88	0,91	0,80	0,76	0,69	0,76

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t; \*\* significativo a 1% pelo teste t.

Tabela 11 - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação, para cada altura de água na evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6), no outono

Outono						
Temperatura máxima	Tratamentos					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Direto sobre ET <sub>1</sub>	-0,5157	-0,3458	-0,5656	-0,5637	-0,2807	-0,3162
Indireto via T mín	-0,0892	-0,0050	-0,0241	-0,0532	-0,0224	-0,0300
Indireto via UR	0,5875	0,1057	0,4006	0,5430	0,4436	0,4677
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0077	0,0048	0,0110	0,0024	0,0124	0,0116
Indireto via Rad	0,2899	0,5319	0,5913	0,5401	0,4354	0,4896
Total (cor.Pearson)	0,2647*	0,2916*	0,4133**	0,4686**	0,5883**	0,6227**
Temperatura mínima						
Direto sobre ET <sub>1</sub>	0,5076	0,0279	0,1343	0,3020	0,1272	0,1705
Indireto via T máx	0,0907	0,0618	0,1015	0,0992	0,0494	0,0557
Indireto via UR	-0,5877	-0,1074	-0,4090	-0,5250	-0,4288	-0,4521
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0127	-0,0076	-0,0175	-0,0038	-0,0202	-0,0189
Indireto via Rad	-0,0591	-0,1094	-0,1236	-0,1078	-0,0869	-0,0978
Total (cor.Pearson)	-0,0358 ns	-0,1347 ns	-0,3144*	-0,2354 ns	-0,3594**	-0,3426**
Umidade relativa						
Direto sobre ET <sub>1</sub>	-0,8219	-0,1505	-0,5714	-0,7563	-0,6178	-0,6514
Indireto via T Max	0,3686	0,2428	0,3965	0,4048	0,2015	0,2270
Indireto via T mín	0,3629	0,0199	0,0962	0,2096	0,0883	0,1184
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0162	-0,0093	-0,0212	-0,0045	-0,0237	-0,0221
Indireto via Rad	-0,2325	-0,4338	-0,4824	-0,4506	-0,3633	-0,4085
Total (cor.Pearson)	-0,3066*	-0,3308**	-0,5823**	-0,5971**	-0,7150**	-0,7367**
Velocidade do vento						
Direto sobre ET <sub>1</sub>	-0,0320	0,0202	0,0460	0,0101	0,0530	0,0495
Indireto via T Max	-0,1238	-0,0829	-0,1358	-0,1321	-0,0658	-0,0741
Indireto via T mín	-0,2013	-0,0105	-0,0512	-0,1152	-0,0485	-0,0651
Indireto via UR	0,4172	0,0689	0,2638	0,3383	0,2763	0,2914
Indireto via Rad	0,1355	0,2282	0,2547	0,2204	0,1777	0,1998
Total (cor.Pearson)	0,1956 ns	0,2240 ns	0,3774**	0,3214**	0,3927**	0,4015**
Radiação						
Direto sobre ET <sub>1</sub>	0,3722	0,6905	0,7676	0,6892	0,5556	0,6248
Indireto via T máx	-0,4017	-0,2664	-0,4357	-0,4418	-0,2199	-0,2478
Indireto via T mín	-0,0806	-0,0044	-0,0216	-0,0473	-0,0199	-0,0267
Indireto via UR	0,5134	0,0946	0,3591	0,4946	0,4040	0,4259
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0116	0,0067	0,0153	0,0032	0,0170	0,0158
Total (cor.Pearson)	0,3918**	0,5210**	0,6846**	0,6979**	0,7366**	0,7921**
Coef. Determinação	0,24	0,31	0,60	0,60	0,66	0,74
Ef. Variável residual	0,87	0,83	0,63	0,63	0,58	0,51

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t; \*\* significativo a 1% pelo teste t.

Tabela 12 - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação, para cada altura de água na evaporatório (N1, N2, N3, N4, N5 e N6), no inverno

Inverno						
Temperatura máxima	Tratamentos					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,3143	0,2246	0,4350	0,2839	0,2160	0,1683
Indireto via T mín	-0,0272	-0,0323	-0,0566	-0,0418	-0,0036	0,0376
Indireto via UR	0,1075	0,1641	0,0468	0,1679	0,2120	0,2310
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0159	0,0193	0,0322	0,0338	0,0317	0,0270
Indireto via Rad	0,1047	0,1307	0,1247	0,1179	0,1325	0,1030
Total (cor.Pearson)	0,5150**	0,5065**	0,5821**	0,5616**	0,5887**	0,5670**
Temperatura mínima						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,0498	-0,0591	-0,1032	-0,0763	-0,0065	0,0631
Indireto via T máx	0,1718	0,1227	0,2387	0,1558	0,1185	0,1005
Indireto via UR	0,0588	0,0894	0,0256	0,0919	0,1161	0,1401
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0378	0,0395	0,0557	0,0584	0,0549	0,0381
Indireto via Rad	0,0343	0,0428	0,0412	0,0390	0,0438	0,0534
Total (cor.Pearson)	0,2528*	0,2354*	0,2579*	0,2687**	0,3267**	0,3951**
Umidade relativa						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	-0,1220	-0,1866	-0,0532	-0,1909	-0,2411	-0,2607
Indireto via T Max	-0,2768	-0,1975	-0,3826	-0,2497	-0,1900	-0,1492
Indireto via T mín	0,0240	0,0283	0,0497	0,0367	0,0031	-0,0339
Indireto via U <sup>2</sup>	-0,0884	-0,0971	-0,1372	-0,1439	-0,1352	-0,1085
Indireto via Rad	-0,1106	-0,1389	-0,1319	-0,1247	-0,1402	-0,1077
Total (cor.Pearson)	-0,5738**	-0,5918**	-0,6552**	-0,6724**	-0,7033**	-0,6600**
Velocidade do vento						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,2834	0,2961	0,3942	0,4134	0,3885	0,3315
Indireto via T Max	0,0176	0,0147	0,0355	0,0232	0,0176	0,0137
Indireto via T mín	-0,0067	-0,0079	-0,0146	-0,0108	-0,0009	0,0072
Indireto via UR	0,0381	0,0612	0,0185	0,0664	0,0839	0,0854
Indireto via Rad	0,0345	0,0469	0,0458	0,0433	0,0487	0,0452
Total (cor.Pearson)	0,3669**	0,4109**	0,4795**	0,5355**	0,5378**	0,4831**
Radiação						
Direto sobre ET <sub>I</sub>	0,2321	0,2881	0,2740	0,2591	0,2912	0,2439
Indireto via T máx	0,1418	0,1019	0,1979	0,1292	0,0983	0,0711
Indireto via T mín	-0,0074	-0,0088	-0,0155	-0,0115	-0,0010	0,0138
Indireto via UR	0,0581	0,0900	0,0256	0,0919	0,1161	0,1151
Indireto via U <sup>2</sup>	0,0422	0,0482	0,0659	0,0691	0,0649	0,0615
Total (cor.Pearson)	0,4668**	0,5193**	0,5479**	0,5378**	0,5695**	0,5054**
Coef. Determinação	0,43	0,48	0,60	0,63	0,67	0,58
Ef. Variável residual	0,75	0,72	0,63	0,61	0,57	0,65

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t; \*\* significativo a 1% pelo teste t.

Analisando a Tabela 9, observa-se que, durante a primavera, as variáveis temperatura máxima, umidade relativa e radiação apresentaram correlação elevada com a  $ET_I$ , para todas as alturas de água no evaporatório. A radiação e a temperatura máxima tiveram correlações positivas com a evapotranspiração determinada pelo Irrigâmetro, enquanto a umidade relativa mostrou correlação negativa. Analisando as relações de efeito direto na Tabela 9, pode-se observar que as variáveis que apresentam relação de causa e efeito com a  $ET_I$  são a radiação, para o tratamento N2 (altura 3 cm); a umidade relativa, para N2 e N3; e a temperatura máxima, para N3, N4, N5 e N6. Os elementos que tiveram menor correlação com a  $ET_I$  para esse mesmo período foram a temperatura mínima e a velocidade do vento em todas as alturas de água; contudo, apenas a temperatura mínima teve correlação não significativa para N2 e N6. Pode ser observado que, à medida que se eleva a altura da água dentro do evaporatório, a correlação da velocidade do vento com a evapotranspiração do Irrigâmetro aumenta, por causa da proximidade da lâmina de água com a borda do evaporatório, facilitando a remoção do ar úmido.

Quanto menor a altura de água no evaporatório, menor a massa de água no seu interior; logo, para aquecer e evaporar a água nas alturas menores é necessária menor quantidade de energia proveniente da radiação. Assim, ela é mais importante para alturas menores, apresentando alta correlação com a  $ET_I$ .

Quando é feita a análise da correlação dos efeitos indiretos dos elementos meteorológicos sobre a  $ET_I$ , observa-se que há uma tendência de maior correlação da temperatura máxima com a umidade relativa e da radiação com a temperatura máxima para a maioria dos tratamentos (Tabela 9). As menores correlações ocorrem sempre que um elemento meteorológico é relacionado com a temperatura mínima e com a velocidade do vento, não apresentando relação de causa e efeito com a  $ET_I$ . Observa-se também que o coeficiente de determinação foi maior para o tratamento N3, cujo valor foi de 0,81.

Para a estação de verão (Tabela 10), observa-se que a radiação solar é a variável que apresenta maior correlação com a  $ET_I$  em todos os tratamentos. As variáveis temperatura mínima e velocidade do vento mostraram correlações não significativas com a variável principal. A relação de causa e efeito ocorre entre a  $ET_I$  e a radiação para todas as alturas de água, exceto para a altura 3 cm (tratamento N2), onde essa relação ocorre com a umidade relativa. Durante o verão, as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima e velocidade do vento não apresentaram relação de causa e efeito em nenhuma altura. As correlações dos efeitos indiretos são menores quando se

relacionam com a temperatura mínima ou com a velocidade do vento. Essas duas variáveis meteorológicas são as que menos têm correlação com a  $ET_I$  de maneira direta ou indireta. No verão, a incidência da radiação solar sobre a superfície da Terra ocorre por mais tempo durante o dia, o que eleva o grau de energização do ar e favorece o processo de evapotranspiração. Os valores do coeficiente de determinação foram relativamente mais baixos do que nas outras estações do ano, em decorrência do uso de menor quantidade de dados, sendo o maior valor igual a 0,52 para a altura 6 cm.

No outono (Tabela 11), observa-se que os elementos que possuem maior efeito direto sobre a  $ET_I$  são a umidade relativa do ar para os tratamentos N1, N4, N5 e N6 e a radiação nos tratamentos N2 e N3; as menores correlações ocorrem para a temperatura mínima, em todas as alturas de água no evaporatório. As relações de causa e efeito ocorrem com a temperatura máxima no tratamento N4, com a umidade relativa para N1, N3, N4, N5 e N6 e, além desses, ocorre também com a radiação nos tratamentos N2, N3, N4, N5 e N6. Para essa estação do ano, o maior valor encontrado para o coeficiente de determinação foi de 0,74, para a altura 7 cm (N6).

Quando se trata de efeito indireto sobre a  $ET_I$ , a velocidade do vento e a temperatura mínima entram novamente como os elementos de menor correlação.

Durante o inverno (Tabela 12), as correlações dos elementos meteorológicos com a  $ET_I$  são todas significativas, inclusive para a temperatura mínima e a velocidade do vento. Analisando os efeitos indiretos, constata-se que os elementos que possuem maior correlação são umidade relativa e temperatura máxima, ao passo que a menor correlação ocorre entre a velocidade do vento e a temperatura mínima. Ocorre relação de causa e efeito da  $ET_I$  com a temperatura máxima para os tratamentos N1, N2, N3, N4 e N5, com a umidade relativa para os tratamentos N5 e N6 e com a radiação para os tratamentos N1, N2, N3, N4, N5 e N6.

Tabela 13 – Estimativa dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, nas estações do ano

	T. mínima	UR	U <sup>2</sup>	Rad
Primavera				
T. máxima	-0,1002 ns	-0,8938**	0,3283*	0,7717**
T. mínima		0,2174 ns	-0,1963 ns	-0,0418 ns
UR			-0,2859*	-0,7177**
U <sup>2</sup>				0,2256 ns
Verão				
T. máxima	0,3419*	-0,8159**	0,1416 ns	0,8389**
T. mínima		-0,0846 ns	-0,3037 ns	0,1847 ns
UR			-0,3611*	-0,8599**
U <sup>2</sup>				0,2331 ns
Outono				
T. máxima	-0,1758 ns	-0,7148**	0,2400 ns	0,7788**
T. mínima		0,7150**	-0,3966**	-0,1588 ns
UR			-0,5076**	-0,6247**
U <sup>2</sup>				0,3640**
Inverno				
T. máxima	0,5466**	-0,8794**	0,0817 ns	0,4550**
T. mínima		-0,4817**	-0,1335 ns	0,1478 ns
UR			-0,3480**	-0,4814**
U <sup>2</sup>				0,1671 ns

ns não significativo a 5% pelo teste t; \* significativo a 5% pelo teste t; \*\* significativo a 1% pelo teste t.

Na Tabela 13 observa-se que, na primavera, a temperatura mínima não teve correlação significativa com nenhuma das outras variáveis meteorológicas utilizadas no estudo. Durante o verão, a temperatura mínima se correlacionou moderadamente com a temperatura máxima; isso também pode ser observado na Figura 7, onde se percebe uma tendência das médias dessas variáveis permanecerem constantes. Em todas as estações do ano, a correlação entre temperatura máxima e umidade relativa foi significativa a 1% de probabilidade pelo teste “t”, com correlação negativa muito forte. Houve correlação negativa moderada entre radiação solar e velocidade do vento apenas durante o outono. Quando consideradas as variáveis radiação solar e temperatura máxima, para todas as estações, as correlações foram positivas e significativas a 1% de probabilidade pelo teste “t”. Para umidade relativa, as correlações foram sempre negativas, variando de moderada no inverno a muito forte no verão.

Na Figura 8, é possível notar que, durante as estações de verão e outono, a umidade relativa teve valor médio mais elevado e com menor variação. As variáveis temperatura mínima e velocidade do vento foram as que tiveram menos correlações significativas com as demais.

## 5. CONCLUSÕES

1. O Irrigâmetro tem desempenho satisfatório na estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para a região sul do Estado do Tocantins, quando se usam as alturas de água recomendadas no evaporatório iguais a 3,2; 4,2; 4,8; e 3,1 cm, para as estações de primavera, verão, outono e inverno, respectivamente.
2. O coeficiente do Irrigâmetro aumentou linearmente com a elevação da altura da água dentro do evaporatório, em todas as estações do ano, em decorrência do aumento da superfície evaporante.
3. Durante a primavera, os elementos meteorológicos temperatura máxima, umidade relativa e radiação tiveram alta correlação com a  $ET_I$ .
4. No verão e no outono, a correlação da  $ET_I$  foi maior com a radiação solar.
5. A umidade relativa é o elemento meteorológico que possui maior correlação com a  $ET_I$  durante o inverno.
6. A temperatura mínima e a velocidade do vento são as variáveis que apresentam menor correlação com a  $ET_I$  na maioria das estações do ano.

## 7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (ANA). **Água, fatos e tendências**. Brasília: ANA; CEBDS, 2006. 31 p.

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

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

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 (ET<sub>o</sub>)**. 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.1.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BERNARDO, S. **Relação solo-água-clima e planta**. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV. 1977. 30 p. (Boletim de extensão n°6).

BURMAN, R.D., NIXON, P.R., WRIGHT, J.L. et al. O. Water Requirements. IN : JENSEN, M. E. ed. **Design and operation of farm irrigation systems** . St. Joseph : ASAE, 1983. cap. 6, p. 189-232.

CAIXETA, S. P. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigômetro nas condições climáticas da zona da mata mineira**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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.

CONTIN, F.S. **Tecnologia do Irrigâmetro aplicada no manejo da irrigação do feijoeiro**. 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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 requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

GENES Programa para Análise e Processamento de Dados Baseado em Modelos de Genética e Estatística Experimental, versão 2009.7.0: Fundação Arthur Bernardes - UFV - Viçosa, 2007.

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.

OLIVEIRA, E.M. **Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência na região do Alto Paranaíba-MG**. 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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.

OLIVEIRA, R.A. & RAMOS, M. M. **Manual do Irrigâmetro**. (2008)

PAULA, A. L. T. **Tecnologia do irrigâmetro e da válvula intermitente para aspersor aplicada no perímetro irrigado do Jaíba**. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SANTOS, S. S. dos. **Influência da aplicação, via irrigação por gotejamento, de esgoto sanitário tratado na cultura do cafeeiro e no solo**. 2004. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1996.

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

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 45p.

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

TAGLIAFERRE, C. **Desempenho do irrigâmetro e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 99 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2006.

TAVARES DE PAULA, A. L. **Tecnologia do Irrigâmetro e da válvula intermitente para aspersion aplicada no perímetro irrigado do Jaíba**. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VALERO, J.A. de J.; MAÑAS, F.J. M. de S.O. El calculo y la estimacion de La evapotranspiracion . In: MAÑAS, F.J.M. de S.O.; VALERO, J.A. de 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.