

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE  
REFERÊNCIA PARA A MESOREGIÃO DO TRIÂNGULO  
MINEIRO E ALTO PARANAÍBA-MG**

**Zilda Corrêa de Lacerda  
Engenheira Agrônoma**

**2012**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE  
REFERÊNCIA PARA A MESOREGIÃO DO TRIÂNGULO  
MINEIRO E ALTO PARANAÍBA-MG**

**Zilda Corrêa de Lacerda**

**Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco**

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de  
Jaboticabal, como parte das exigências para  
a obtenção do título de Doutor em  
Agronomia - Ciência do Solo.**

**2012**

L131m Lacerda, Zilda Corrêa de  
Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba-MG./ Zilda Corrêa de Lacerda. -- Jaboticabal, 2012  
vii, 69 f. : il.; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012

Orientador: José Eduardo Pitelli Turco

Banca examinadora: Renato Farias do Valle Junior, Pedro Henrique Ferreira Tomé, João Antonio Galbiatti, Teresa Cristina Tarle Pissarra

Bibliografia

1. Hargreaves. 2. Hidrometeorologia 3. Makkink 4. Penman-Monteith 5. Radiação Solar I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 551.573(815.1)

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

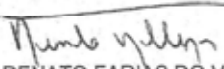
**TÍTULO:** MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A MESOREGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E O ALTO PARANAÍBA-MG

**AUTORA:** ZILDA CORRÊA DE LACERDA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO

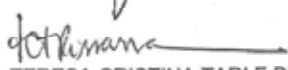
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO  
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro / Uberaba/MG

  
Prof. Dr. PEDRO HENRIQUE FERREIRA TOMÉ  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro / Uberlândia/MG

  
Prof. Dr. JOAO ANTONIO GALBIATTI  
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA  
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 13 de novembro de 2012.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**ZILDA CORRÊA de LACERDA** - Filha de Izidoro Corrêa de Lacerda e Maria José de Jesus, nasceu em Leandro Ferreira – MG, em 05 de maio de 1954. Em dezembro de 1978, graduou-se em Engenharia Agrônoma pela Escola Superior de Agricultura de Lavras, hoje Universidade Federal de Lavras - MG. Especializou-se em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa – MG em 1995. Obteve o título de Mestre em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia – MG, na área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, em 2003. Foi servidora da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais – EMATER-MG, de 1979 a 1992, atuando como engenheira agrônoma no Programa de Desenvolvimento do Cerrado - POLOCENTRO. Atuou como professora na Escola Agrotécnica Federal de Uberaba, na Universidade de Uberaba – UNIUBE e Faculdade de Agronomia e Zootecnia de Uberaba – FAZU, de 1992 a 1994, nas áreas de agricultura, climatologia agrícola e silvicultura. É professora da Escola Agrotécnica Federal de Uberlândia, atual Campus Uberlândia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – IFTM de 1994 até o momento, atuando no Programa de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, área de climatologia e recursos florestais do Acordo Brasil/Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura – UNESCO, coordenado pela Secretaria de Educação Média e Tecnológica – SETEC/MEC no período de 2004 a 2008. Ingressou, em março de 2009, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista - Doutorado Interinstitucional - DINTER/UNESP-Jaboticabal/IFTM, concluindo-o em novembro de 2012.

A DEUS,

Que me ensinou, a superar as dificuldades,

sem sua ajuda nada seria possível.

A juventude tem muitas vantagens sobre a velhice:  
ela encerra em si a semente de seu próprio futuro.

Mas falta-lhe uma característica:  
jamais possuirá a colheita armazenada  
de uma vida humana plenamente amadurecida.

(Elisabeth S. Lukas)

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai, Izidoro Corrêa de Lacerda (in memorian), pelo seu exemplo de serenidade e amor a vida. A minha mãe, Maria José, falecida no dia 18/9/2012, aos 87 anos, por tudo que significa para mim.

Ofereço este trabalho aos meus sete irmãos, pela amizade e companheirismo,  
à minha sobrinha, Ana Clara, pela presença, carinho e estímulo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP-Jaboticabal), pela oportunidade de realização do curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo pela condução do projeto de doutorado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – IFTM, pelo empenho em oportunizar a formação e a capacitação profissional de seus docentes.

A CAPES pela implementação do programa de qualificação profissional, Doutorado Interinstitucional – DINTER/FCAV-UNESP/IFTM.

Ao professor José Eduardo Pitelli Turco, pela orientação e pela amizade durante a realização deste trabalho.

Ao 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia, pela disponibilização dos dados meteorológicos utilizados.

Ao professor Washington Luiz Assunção coordenador do Laboratório de Climatologia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, pela colaboração na sistematização dos dados meteorológicos utilizados.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, pelos ensinamentos e pelas lições de vida.

Aos colegas Carla Regina Amorim dos Anjos Queiroz, Reginaldo Rodrigues de Andrade e Leomar Paulo de Lima, pelo apoio, atenção, estímulo e convívio.

Aos colegas do DINTER e demais colegas de trabalho pelo apoio e incentivo.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.



## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 Evolução e importância da evapotranspiração de referência.....	4
2.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência .....	6
2.3 Comparação e escolha de métodos de estimativa da $ET_0$ .....	9
2.4 Aquisição automática de dados.....	17
2.5 Caracterização agrícola, geográfica e climática da região .....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1 Localização dos municípios e das estações.....	22
3.2 Caracterização das estações e base de dados.....	23
3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência.....	25
3.3.1 Método de Makkink (MK).....	26
3.3.2 Método de Hargreaves (HG) .....	27
3.3.3 Método da Radiação Solar (RS).....	27
3.3.4 Método do Penman-Monteith (PM).....	29
3.3.5 Transferência do erro da variável independente para a variável dependente ..	30
3.3.6 Método dos mínimos quadrados .....	31
3.3.7 Avaliação da qualidade de um ajuste .....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Estimativa da $ET_0$ a partir de elementos meteorológicos.....	34
4.2 Análise de regressão, modelo linear sem intercepto .....	38
4.2.1 Método de Hargreaves .....	38
4.2.2 Método de Makkink .....	41
4.2.3 Método de Radiação Solar .....	44
4.3 Métodos de estimativa da $ET_0$ considerando os erros .....	47
4.3.1 Método de Hargreaves.....	50

4.3.2 Método de Makkink .....	52
4.3.3 Método de Radiação Solar .....	55
5 CONCLUSÕES .....	58
6 REFERÊNCIAS .....	59

## MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A MESOREGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA-MG

**RESUMO** - Uma forma de verificar a eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência é a comparação com o método de Penman-Monteith, recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO, como método padrão para estimativa da  $ET_0$ . Com este estudo o objetivo foi avaliar três métodos de estimativa da  $ET_0$  e a influência dos erros diários na comparação dos métodos Makkink, Hargreaves e Radiação Solar, com o método de Penman-Monteith em quatro municípios da mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG. Para tanto, utilizou-se dados diários do ano de 2010 de radiação solar global, velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar obtidos nas estações meteorológicas automáticas do 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia situadas nos municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba. As análises dos resultados foram feitas para o período diário, utilizando-se análise de regressão modelo linear  $y = ax$ , no qual a variável dependente foi o método de Penman-Monteith e a variável independente as estimativas da  $ET_0$  pelos métodos estudados. Foi utilizada metodologia que verifica a influência do desvio padrão diário da  $ET_0$  na comparação dos métodos estudados, indicando que entre os métodos de Radiação Solar e Penman-Monteith não se estabeleceu uma relação linear. Portanto, não podem ser comparados para as localidades estudadas. O resultado da análise de regressão indicou melhor ajuste para estimativa da  $ET_0$  para o método de Hargreaves para os quatro municípios estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hargreaves, Hidrometeorologia, Makkink, Penman-Monteith, Radiação Solar

## METHODS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR THE MIDDLE OF TRIANGULO MINEIRO AND ALTO PARANAIBA-MG

**ABSTRACT** - A way to check the efficiency of estimating methods for reference of evapotranspiration is compared with the Penman-Monteith, recommended by the United Nations Food and Agriculture Organization - FAO, as the standard method for estimating  $ET_0$ . With this study the objective is to evaluate three methods for estimating  $ET_0$  and the influence of errors daily in the comparison of methods Makkink, Hargreaves and Solar Radiation, with the Penman-Monteith in four counties from the middle of Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba - MG. To this end, we used daily data of the year 2010 of the global solar radiation, wind speed, air temperature and relative humidity obtained from automatic weather stations of the 5<sup>th</sup> District of Meteorology's National Meteorological Institute located in the cities of Uberlândia, Araxá, Patrocínio and Ituiutaba. Analyzes of the results were made for the daily period, using linear regression model  $y = ax$ , where the dependent variable was the Penman-Monteith and the independent variable estimates of  $ET_0$  by the methods studied. Methodology was used to verify the influence of the standard deviation of daily  $ET_0$  in the comparison of the methods studied, indicating that among the methods of Solar Radiation and Penman-Monteith it was not established a linear relationship. Therefore, it cannot be compared to the studied cities. The result of the regression analysis indicated a better fit for the estimation of  $ET_0$  to the method of Hargreaves for the four studied cities.

**KEYWORDS:** Hargreaves, Hydrometeorology, Makkink, Penman-Monteith, Solar Radiation

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização geográfica das estações meteorológicas automáticas utilizadas .....	23
Tabela 2. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Uberlândia - MG.....	35
Tabela 3. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Araxá - MG.....	35
Tabela 4. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Patrocínio - MG.....	36
Tabela 5. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Ituiutaba – MG.....	36
Tabela 6. Determinação dos valores de $r^2$ e $r_{red}^2$ para os municípios estudados....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área em estudo: mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba .....	22
Figura 2. Estação Meteorológica Automática – EMA, ao centro a antena de comunicação via satélite, à direita o “datalogger” com sensor de temperatura presos ao mastro e à esquerda o pluviômetro. ....	24
Figura 3. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Uberlândia-MG. ....	39
Figura 4. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Araxá-MG. ....	39
Figura 5. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Patrocínio-MG. ....	40
Figura 6. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG. ....	40
Figura 7. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Uberlândia-MG. ....	42
Figura 8. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Araxá-MG. ....	42
Figura 9. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Patrocínio-MG. ....	43
Figura 10. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG. ....	43
Figura 11. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Uberlândia-MG. ....	45
Figura 12. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Araxá-MG. ....	45
Figura 13. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Patrocínio-MG. ....	46
Figura 14. Valores médios diários da $ET_0$ obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG. ....	46
Figura 15. Gráfico que relaciona $\frac{2}{red}$ com $\frac{2}{red}$ (VUOLO, 1996). ....	48

Figura 16. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Uberlândia–MG. ....	50
Figura 17. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Araxá–MG. ....	51
Figura 18. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Patrocínio–MG. ....	51
Figura 19. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Ituiutaba–MG. ....	52
Figura 20. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Uberlândia–MG. ....	53
Figura 21. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Araxá–MG. ....	53
Figura 22. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Patrocínio–MG. ....	54
Figura 23. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Ituiutaba–MG. ....	54
Figura 24. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Uberlândia–MG. ....	55
Figura 25. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Araxá–MG. ....	56
Figura 26. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Patrocínio–MG. ....	56
Figura 27. Reta $y = ax$ ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Ituiutaba–MG. ....	57

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas demandam grandes quantidades de água e, diante da preocupação mundial com o uso racional desse recurso natural, esforços têm sido empregados no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a sua economia. Neste sentido, um dos requisitos essenciais para estimar a quantidade de água necessária para a produção agrícola é entender efetivamente as relações entre as condições climáticas e a evapotranspiração.

A combinação de dois processos distintos, a evaporação da água diretamente da superfície do solo e a transpiração através dos estômatos das plantas resulta na evapotranspiração. O conhecimento da evapotranspiração é de fundamental importância em atividades ligadas à gestão de bacias hidrográficas, à recarga dos aquíferos, em modelagem meteorológica e hidrológica e, sobretudo, na dinâmica da umidade do solo e manejo hídrico da agricultura irrigada.

A determinação da evapotranspiração é um problema compartilhado por várias ciências que estudam o sistema solo-planta-atmosfera. Assim a quantificação da evapotranspiração torna-se imprescindível para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar mudanças na gestão do balanço hídrico.

A evapotranspiração pode ser medida diretamente por equipamentos específicos e por técnicas micrometeorológicas, em experimentos cuidadosamente planejados, de custo elevado e longo tempo. Como alternativa à medição direta foi introduzido o conceito de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) por Doorenbos e Pruitt (1977). A  $ET_0$  é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23, sem restrições de umidade, crescendo ativamente e cobrindo completamente à superfície do solo (ALLEN et al., 2006). Este conceito foi originalmente introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, fenologia e tratamentos culturais.

Uma maneira muito utilizada para obter a evapotranspiração de referência em



diferentes locais e situações é por meio de métodos de estimativa. Diversos pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa através de modelos hidrometeorológicos e modelos matemáticos que envolvem uma quantidade menor de parâmetros, utilizados em substituição aos métodos de medição direta devido às limitações de manejo, custo e tempo inerentes a estes métodos.

Em 1990, os diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração de referência recomendados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO em 1977 foram submetidos a uma revisão feita por especialistas em evapotranspiração, os quais chegaram à conclusão de que o método FAO Penman-Monteith apresentava melhores resultados para estimativa da  $ET_0$  com parâmetros climáticos, passando a ser recomendado pela FAO como método padrão para estimativa da  $ET_0$  (ALLEN et al., 2006).

Dentre os vários métodos desenvolvidos para a estimativa da  $ET_0$  usando dados meteorológicos, nenhum é universalmente adequado para todas as condições climáticas, sem um ajuste local ou regional. Em vista disto, estudos comparando os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO são realizados para diferentes regiões do Brasil e do mundo, como forma de verificar a eficiência dos métodos indiretos.

Os resultados das pesquisas realizadas variam muito, uma vez que cada região apresenta características climáticas peculiares e, os métodos de estimativa apresentam problemas de precisão, principalmente pela falta de ajuste dos coeficientes dos modelos e acurácia dos sensores. Assim, torna-se importante considerar que os métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência são fundamentados em observações e análise estatística, geralmente, adequados para uma condição climática ou região específica influenciando as pesquisas realizadas.

Frequentemente, nos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência é necessário conhecer uma grandeza ( $ET_0$ ) que é composta de diferentes variáveis e que não pode ser medida diretamente, ou seja, essa grandeza é calculada por uma expressão matemática a partir dos valores obtidos para cada variável da expressão. Existe, então, o problema de especificar o erro dessa grandeza obtida com a combinação de outras, decorrentes dos instrumentos de

medida utilizados. Percebe-se que esse erro provém da combinação dos erros das variáveis utilizadas no cálculo da grandeza procurada (TURCO et al., 1994).

Se considerarmos o erro da estimativa da evapotranspiração de referência à avaliação dos métodos para estimativa da  $ET_0$  é mais consistente e ajustada, tornando mais eficiente o manejo da água.

Com este trabalho o objetivo foi avaliar três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e a influência dos erros diários na comparação dos métodos, Makkink (1957), Hargreaves (1976) e Radiação Solar (DOORENBOS; PRUITT, 1977) com o método de Penman-Monteith FAO (ALLEN et al., 1998), para condições climáticas de quatro municípios da mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Evolução e importância da evapotranspiração de referência

O conhecimento das necessidades hídricas das culturas é de grande importância para o estudo do manejo da água utilizada na agricultura irrigada. E a quantificação da evapotranspiração é imprescindível para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação (ORTEGA-FARIAS; IRMAK; CUENGA, 2009). A taxa de evapotranspiração refere-se à combinação da evaporação direta da água livre, da umidade da superfície do solo e da transpiração através das plantas para a atmosfera (SEDIYAMA, 1996).

O conceito de evapotranspiração - ET foi mencionado pela primeira vez por Warren Thornthwaite em 1944, como a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração, numa superfície vegetada (CAMARGO, 1962). De acordo com Sedyama (1998) a preocupação principal no conceito proposto por Thornthwaite era explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima. Assim, a sua equação era apenas uma proposta de estimativa da evapotranspiração em função da temperatura média do ar a partir de um índice térmico anual e do comprimento do dia para um determinado mês do ano. Falta a este método o entendimento da razão da evapotranspiração correspondente a uma dada temperatura não ser a mesma para diferentes locais.

Howard Penman, em 1948, apresenta um modelo envolvendo os processos físicos da evaporação que resulta em um método que proporciona a estimativa da taxa de evaporação da água livre, da umidade da superfície do solo ou da vegetação, para ser estimada a partir dos elementos climáticos relevantes: energia radiante, temperatura, umidade e velocidade do vento (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Neste método Penman combinou o balanço de energia na superfície com um termo aerodinâmico, cuja equação resultante é conhecida como equação combinada ou equação original de Penman (SEDIYAMA, 1996).

A evapotranspiração é uma das principais variáveis do ciclo hidrológico. É um elemento climatológico fundamental que corresponde ao processo oposto à chuva sendo controlada pelo balanço de energia, pela demanda atmosférica, pelo

suprimento de água do solo à vegetação e pelas características fisiológicas das plantas (MENDONÇA et al., 2003, PEREIRA et al., 1997).

O termo evapotranspiração de referência –  $ET_0$  foi introduzido nos anos 1970. Segundo Jensen (1973), a  $ET_0$  é aquela que ocorre numa cultura padrão, no caso a alfafa, com altura entre 0,3 e 0,5 m numa dada condição climática e com cerca de 100 m de área tampão na direção dos ventos predominantes. Ainda nos anos 1970 pesquisas na área de modelagem da evapotranspiração para uma cultura em crescimento com cobertura incompleta foram desenvolvidas resultando em modelos em que a evaporação direta da água do solo e a transpiração ocorriam separadamente, especialmente para pequenos valores de índice de área foliar, quando a evaporação direta da água do solo constitui a maior parte da evapotranspiração total (TANNER; JURY, 1976).

Doorenbos e Pruitt (1977) definiram como  $ET_0$  a evapotranspiração que ocorre em uma extensa área de grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo o solo e sem restrição hídrica. Sob estas condições e, considerando-as invariáveis no tempo e espaço, a transferência de água do sistema solo-planta para atmosfera ocorre como função apenas do balanço vertical de energia, ou seja, das condições atmosféricas sobre a vegetação, sem interferências advectivas, podendo ser estimada por modelos matemáticos, técnico-empíricos desenvolvidos e testados para várias condições climáticas.

O ideal seria que um método para estimar a  $ET_0$  incorporasse todos os fatores que influenciam a evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, estágio de crescimento, condições de solo, principalmente a forma com que as propriedades físicas do solo afetam diretamente a água disponível para a extração pelo sistema radicular e, também, as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferência de energia e massa (CUENCA; NICHOLSON, 1982).

De acordo com Allen et al. (2006) a evapotranspiração de referência é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23, com altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo.

O conceito de evapotranspiração de referência foi originalmente introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, fenologia e tratamentos culturais, sendo um termo mais usado em estudos climáticos e um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período (ALENCAR et al., 2011).

Vários modelos de balanço hídrico são empregados com a finalidade de dimensionar e manejar a agricultura irrigada ou estudar as probabilidades de ocorrências de estiagens ou excessos hídricos (BACK, 2007). Nesses modelos utilizam-se, em geral, como entrada de água no sistema a precipitação e a irrigação e, como principal saída a evapotranspiração. Dados de precipitação podem ser obtidos com relativa facilidade. Entretanto, existe carência de informações sobre evapotranspiração das culturas, principalmente pelas dificuldades de mensuração. Frequentemente a evapotranspiração das culturas é estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência e no coeficiente de cultura.

Ao longo dos anos de acordo com Carvalho et al. (2011), muitos métodos foram desenvolvidos para a estimativa da evapotranspiração de referência. Três importantes razões concorreram para isto: adequação do método às condições climáticas da região, simplicidade de uso e limitação de elementos meteorológicos ou climatológicos que alimentam estes métodos. Devido à diversidade de métodos existentes, em razão da grande variabilidade dos parâmetros que influenciam o fenômeno e, também considerando o empirismo de muitos deles é comum haver pesquisas para avaliar aquele método que tem maior aplicabilidade ao local de estudo.

## **2.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência**

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência podem ser classificados em: combinados, de radiação, de evaporação, de temperatura, de umidade e de múltiplas correlações (PEREIRA et al., 1997). Segundo o mesmo autor, dependendo dos princípios envolvidos no desenvolvimento do método de estimativa da  $ET_0$ , eles podem ser agrupados em cinco categorias: empíricos, aerodinâmicos, baseados no balanço de energia, combinados e correlação de

turbilhões.

Existe um número muito grande de métodos que possibilitam estimar a  $ET_0$ , os mais comumente encontrados na literatura são os métodos baseados em equações matemáticas, empíricas com fundamentação física (CHAUHAN; SHRIVASTAVA, 2009; FOOLADMAND; AHMADI, 2009). Muitos destes métodos possuem variantes, por questões de ajustes e calibrações locais, elevando ainda mais, a quantidade de métodos disponíveis.

Muitos pesquisadores têm estudado a aplicação de técnicas para a estimativa da  $ET_0$ , até então aplicadas, especificamente, a outras áreas do conhecimento. Verifica-se, por exemplo, a aplicação de redes neurais em trabalhos de Kumar et al. (2008), Kumar, Raghuwanshi e Singh (2010) e Landeras, Ortiz-Barreto e López (2008). Assim como, para efeito de planejamento de uso do solo, existem estimativas de  $ET_0$  efetuadas com base em imagens de satélites, tais como as apresentadas em pesquisas desenvolvidas por Bezerra, Silva e Ferreira (2008); Folhes, Rennó e Soares (2009) e Liang, Li e Liu (2010).

O método de Penman-Monteith-FAO (PM-FAO) é um aperfeiçoamento do método original de Penman (PEN) e, diversos estudos, no Brasil e no mundo, têm comprovado que este método aperfeiçoado é bastante preciso (BARROS et al., 2009; LÓPEZ-URREA et al., 2006; XU; CHEN, 2005; YODER; ODHIAMBO; WRIGHT, 2005). O método PM-FAO é amplamente utilizado porque facilita o entendimento dos processos físicos da evaporação de superfícies naturais e, também, porque utiliza informações meteorológicas coletadas em um único nível acima da superfície evaporante. Este método é classificado como um método combinado, pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração (JABLON; SAHLI, 2008).

O método original de Penman, em princípio, não é empírico, apenas alguns de seus parâmetros são estimados por fórmulas empíricas, tal como a função do vento, que utiliza dados coletados em diferentes condições climáticas. O método Penman-Monteith-FAO, foi derivado do método original de Penman e seus coeficientes de correção foram desenvolvidos por Doorenbos e Pruitt (1977), com base em dados de dez localidades, das quais sete foram cultivadas com grama, com uma variação de temperatura máxima de 10°C (PERES; SCARDUA, 1991).

Sentelhas, Santos e Machado (2008) aplicaram o método PM-FAO no desenvolvimento do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955), para todo o Brasil, considerando o método PM-FAO o mais representativo para a estimativa da demanda da evapotranspiração de referência. O mesmo procedimento foi utilizado por Scolforo, Carvalho e Oliveira (2008), no zoneamento ecológico-econômico, para o estado de Minas Gerais, destacando que os parâmetros geoestatísticos indicaram melhor qualidade na interpolação dos resultados obtidos com a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método PM-FAO, quando comparado ao cálculo da  $ET_0$ , pelo método Thornthwaite e Mather (1955).

O uso de dados climáticos médios, em métodos combinados, ou seja, envolvendo os componentes aerodinâmico e radioativo, como é o caso do método PM-FAO pode conduzir a erros, resultante das combinações entre os elementos climáticos. O método PM-FAO pode também, variar bastante, quanto a estimativa do saldo de radiação, quando não se dispõe de medições, o que foi estudado por Turco, Faria e Fernandes (2005) em Jaboticabal - SP e Yin et al. (2008) na China. Estes autores verificaram que, caso a estimativa do saldo de radiação não seja calibrada, a evapotranspiração de referência pode ser superestimada em até 27%.

A determinação da evapotranspiração de referência utilizando métodos combinados tende a superestimar a  $ET_0$ , um pouco em regiões áridas e muito em regiões úmidas Allen et al. (1989). Por sua vez Gavilán, Berengena e Allen (2007) na Espanha realizaram estudos incluindo estimativas e medições de saldo de radiação e fluxo de calor do solo, em regiões semiáridas verificando que estes parâmetros podem apresentar consideráveis diferenças quando a estimativa da  $ET_0$  ocorre na escala horária. Já na escala diária, não foram observadas diferenças significativas, considerando-se que as estimativas de saldo de radiação e fluxo de calor no solo são confiáveis.

Alguns estudos apresentam variações do método PM-FAO, buscando melhores ajustes para determinadas regiões, como ocorre com o método PM-ASCE (GAVILÁN; ESTEVÉS; BERENGENA, 2008; SULEIMAN; HOOGENBOOM, 2009), concluindo que o método PM-ASCE, na base horária, melhorou a precisão da estimativa da  $ET_0$ , se comparado ao método PM-FAO. Segundo Allen et al. 2006 devido a comprovada precisão do método PM-FAO ele é o mais recomendado para

utilização como padrão de comparação com outros métodos.

### **2.3 Comparação e escolha de métodos de estimativa da $ET_0$**

Antes de aplicar um método para determinado local, é necessário verificar o desempenho deste método e, quando necessário, fazer calibrações a fim de minimizar erros de estimativa. Esse desempenho tem sido analisado com a comparação dos métodos em estudo ao método de PM-FAO (CONCEIÇÃO; MANDELLI, 2005).

A escolha dos métodos de estimativa da evapotranspiração, conforme a sua aplicação variam atendendo às necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo. Pesquisas de recursos hídricos exigem estimativas anuais ou no máximo mensais, mas em projetos de manejo da irrigação, são requeridos períodos mais curtos, de 3 a 10 dias, sendo necessária a adoção de um método preciso para aquela condição (MACHADO; MATOS, 2000).

É de grande importância o conhecimento dos métodos mais simples de estimativa da evapotranspiração de referência que demandam dados de fácil obtenção e baixo custo (BONOMO, 1999). Alguns modelos de estimativa da evapotranspiração de referência são precisos, no entanto, requer quantidade expressiva de elementos meteorológicos, como o método PM-FAO. Os produtores rurais em manejo de projetos de irrigação nem sempre dispõe desses dados meteorológicos para utilização de métodos mais complexos de estimativa da  $ET_0$ , sendo necessária a utilização de métodos mais simples (CONCEIÇÃO, 2010). No entanto, tais métodos devem ser calibrados para locais específicos, de modo a fornecerem resultados mais confiáveis (MOHAWESH, 2010).

Os métodos baseados na temperatura do ar têm sido frequentemente usados e recomendados, devido à simplicidade dos cálculos e por exigirem poucos dados de entrada e de fácil obtenção (KHOOB, 2008). Entre os métodos que podem ser usados com apenas dados de temperatura, destacam-se Hargreaves e Blaney-Criddle (TRAJKOVI; KOLAKOVIC, 2009). Tais métodos podem apresentar correções locais de caráter diário, semanal, mensal ou sazonal que também podem afetar a precisão da estimativa do método. O método de Hargreaves superestima a  $ET_0$  e o



método de Blaney-Criddle subestima a  $ET_0$  em locais de clima úmido, conforme observado por Mendonça et al. (2003).

A confiabilidade da estimativa da evapotranspiração de referência, pelos métodos simplificados pode ser definida pelo seu grau de aproximação com o valor estimado pelo método padrão PM-FAO. Vescove e Turco (2005), ao analisarem, para Araraquara – SP, nos períodos verão-outono e inverno-primavera, os métodos PM-FAO, Tanque Classe A, Radiação Solar e Makkink, observaram que o método de Makkink subestimou a  $ET_0$ , no período inverno-primavera, mais que no outro período. Com relação ao método de Radiação Solar, para o período verão-outono, houve superestimativa pelo método mais que no período inverno-primavera.

Chauhan e Shrivastava (2009) compararam o desempenho de métodos indiretos em relação ao método PM-FAO para a região do reservatório Mahanadi, na Índia e, chegaram a correlações significativas e importantes para a aplicação desses métodos em condições menos favoráveis em termos de disponibilidade de dados. Observa-se, portanto, que a análise estatística do desempenho de métodos mais simples em relação ao método PM-FAO consiste de um estudo relevante para aplicação mais precisa ao manejo de irrigação, à simulação hidrológica e a análise climática de uma determinada região.

Avaliando a evapotranspiração de referência, estimada por vários métodos, para Mossoró – RN, Dantas Neto (1999) observou que os resultados das comparações entre as estimativas de  $ET_0$  indicam um melhor ajuste para o método PM-FAO, seguidos de FAO-Radiação, FAO-Blaney-Criddle, Hargreaves e FAO-Tanque, respectivamente. O método FAO-Tanque necessita, possivelmente, de ajustes no coeficiente de tanque para melhores estimativas da  $ET_0$ , em relação ao método Penman-Monteith-FAO. A adoção da metodologia PM-FAO, como padrão facilita os trabalhos que visam ajustar a estimativa da  $ET_0$ , mostrando-se como uma boa opção prática para esse fim, porém, têm-se necessidade de estudá-la para condições locais.

Estudando a evapotranspiração de referência diária com dados de nove estações meteorológicas, localizadas na bacia do rio Verde Grande, situada no norte do estado de Minas Gerais, Faria et al. (2000) compararam a  $ET_0$  estimada pelas equações ajustadas para os métodos de Hargreaves, Penman e Radiação Solar em

relação ao método de Penman-Monteith-FAO. Observaram um ajuste satisfatório, com  $r^2$  superior a 80%, com exceção do método de Hargreaves que obteve, em duas localidades,  $r^2$  inferior a 50%.

Fernandes (2001) utilizando dados coletados em uma estação meteorológica automatizada, instalada em uma área cultivada com soja, verificou que a evapotranspiração real, calculada pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado, mostraram correlações altamente significativas entre si e com o método de Penman-Monteith-FAO.

Em experimento com evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada pelo método Penman-Monteith-FAO em escala mensal e decenal Santiago et al. (2002) observaram que, mesmo com as dificuldades de mensuração lisimétrica da  $ET_0$  a performance da parametrização proposta pelo método PM-FAO pode ser considerada adequada para estimativas mensais e decenais.

Na comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte Fluminense – RJ, segundo Mendonça et al. (2003) para valores de  $ET_0$  obtidos em lisímetro de pesagem com grama com os valores resultantes da utilização dos métodos Penman-Monteith parametrizado pela FAO, Radiação Solar, Makkink, Linacre, Jensen-Haise, Tanque Classe A e Hargreaves observaram que quando se dispõe somente de dados de temperatura máxima e mínima, o método de Hargreaves apresenta adequada precisão para se estimar a  $ET_0$  na região, sobretudo para períodos superiores a sete e dez dias.

Silva et al. (2005) avaliaram a eficiência de métodos de estimativa da  $ET_0$  e concluíram que, na ausência de dados de insolação e velocidade do vento, em Campina Grande – PB, a  $ET_0$  pode ser estimada com razoável precisão pelo método de Hargreaves. Borges e Mendiondo (2007) verificaram a precisão dos métodos Blaney-Criddle, Hamon e Hargreaves em comparação ao método PM-FAO, para a bacia do Rio Jacupiranga – SP. Os resultados obtidos indicaram que, na região, o método Hargreaves pode ser aplicado tanto na forma original como na formulação modificada. Devido à alta confiabilidade os autores sugerem o uso do método Hargreaves modificado, para região da bacia do Rio Jacupiranga, visto que este necessita somente de dados de temperatura do ar, conjugando simplicidade e

exequibilidade.

Na Alemanha, Xu e Chen (2005) avaliaram sete métodos de evapotranspiração, dentre eles, especificamente para  $ET_0$ , o método de Thornthwaite, Hargreaves, Makkink e Priestley-Taylor, comparando-os com dados de lisímetros de pesagem. Os autores concluíram que Thornthwaite, Makkink e Priestley-Taylor obtiveram igualmente bons resultados, com erros abaixo de 10%. O resultado menos eficiente foi obtido com o método Hargreaves.

Em estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco Reis et al. (2007) avaliaram o desempenho dos métodos Penman Original, Penman Modificado-FAO24, Radiação Solar, Blaney-Criddle-FAO24, Hargreaves e Makkink com o método universal proposto pela FAO como padrão PM-FAO. Os autores concluíram que para as condições climáticas registradas nos períodos seco de 2006 da localidade de Venda Nova do Imigrante, Sooretama e Cachoeiro de Itapemirim no Espírito Santo os métodos de estimativa da  $ET_0$  para as quatro escalas temporais estudadas, diária, três, cinco e sete dias, os melhores resultados foram obtidos respectivamente por Penman Original, Penman Modificado-FAO24, Makkink e Radiação Solar.

Na avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira – MG, Pereira et al. (2009) estudaram métodos indiretos de estimativa da  $ET_0$  em comparação com o método PM-FAO durante o período seco e chuvoso em escalas diária e mensal. O resultado da avaliação mostrou que na região da Serra da Mantiqueira, os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que empregam radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar.

O método que mais superestimou a evapotranspiração de referência, independente do intervalo de comparação, foi o de Hargreaves, para localidade de Viçosa – MG, quando comparado ao método padrão PM-FAO (OLIVEIRA et al., 2008). Resultados semelhantes também foram encontrados por Araújo, Costa e Santos (2007), que avaliaram alguns métodos de evapotranspiração para a região de Boa Vista – RR.

Valores da  $ET_0$  estimados por métodos que se baseiam em dados de temperatura e radiação solar para as condições climáticas do Norte da Bahia foram comparados com valores diários da evapotranspiração de referência calculada pelo método PM-FAO (OLIVEIRA et al., 2010). Para esta região os resultados do estudo mostraram que os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que utilizaram como variável de entrada a temperatura do ar e a radiação solar global tiveram desempenho mais eficiente.

Para as condições climáticas do Sul do Espírito Santo Araújo et al. (2011) estudaram o desempenho de cinco métodos para estimativa da  $ET_0$  em relação ao método padrão PM-FAO. Dentre os métodos avaliados Blaney-Criddle-FAO24 subestimou os valores da  $ET_0$  em relação ao método padrão, já os métodos de Radiação Solar e Hargreaves superestimaram a evapotranspiração de referência em relação ao método padrão, independentemente do intervalo de tempo analisado.

Alencar et al. (2011) avaliaram métodos de estimativa da  $ET_0$  para três localidades do Norte de Minas, comparando os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência Blaney-Criddle-FAO24, Hargreaves, Priestley-Taylor e Radiação Solar com o método padrão PM-FAO, utilizando diferentes índices estatísticos. Dentre os métodos estudados o da Radiação Solar apresentou o pior desempenho para o período de baixa demanda evaporativa, superestimando o método PM-FAO para todos os períodos estudados. López-Urrea et al. (2006) também avaliaram diferentes métodos de estimativa da  $ET_0$  para uma região semiárida da Espanha, tendo observado que o método da Radiação Solar superestimou a evapotranspiração de referência obtida pelo método PM-FAO.

Estimar e comparar a evapotranspiração de referência por meio de dois métodos simplificados e avaliar o seu desempenho em relação ao método PM-FAO, além de verificar a melhoria dos ajustes para otimização dos métodos simplificados, para oito localidades em regiões produtoras de café arábica foi o estudo desenvolvido por França Neto et al. (2011). Com base nas pesquisas desenvolvidas os autores concluíram que o método de Hargreaves apresentou maior aproximação ao método PM-FAO para estimativa da evapotranspiração de referência. O método Blaney-Criddle-FAO24 subestimou os valores de  $ET_0$  nas diferentes condições climáticas, principalmente nos períodos de alta demanda de evapotranspiração. E

ainda que, o ajuste local dos métodos simplificados proporcionou melhoria significativa da estimativa da  $ET_0$ , sendo possível manejar adequadamente a irrigação nas regiões produtoras de café utilizando-se o método de Hargreaves com ajuste dos parâmetros da equação de regressão linear.

O desempenho de métodos de estimativa da  $ET_0$  nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeiras das Missões – RS, foi avaliado por Pilau et al. (2012) através do ajuste de modelos de regressão entre os diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em relação ao método PM-FAO. Nas condições estudadas, os métodos de Makkink e Radiação Solar que incluem dados de radiação solar incidente como variável de entrada pode substituir o método PM-FAO. Dispondo-se apenas de dados de temperatura do ar para o cálculo da  $ET_0$  na escala diária o método de Hargreaves deve ser preferencialmente adotado.

No estado de Pernambuco para a microrregião de Garanhuns, Borges Júnior et al. (2012) avaliaram o desempenho dos métodos FAO-24, Radiação Solar, Priestley-Taylor, Camargo-71 e Hargreaves de estimativa da evapotranspiração de referência em base diária comparando com o método padrão Penman-Monteith-FAO. Dentre os métodos avaliados o melhor desempenho foi obtido com o método de Priestley-Taylor, com base nos valores do erro médio absoluto. Em relação aos métodos com requerimento apenas de dados de temperatura, o método Hargreaves calibrado foi o que apresentou o melhor desempenho.

Turco, Perecin e Pinto Júnior (2008) avaliaram quatro métodos de estimativa da  $ET_0$ , Makkink, Hargreaves, Tanque Classe A e Radiação Solar comparando-os com o método PM-FAO. Concluíram que o resultado da avaliação dos métodos considerando os erros da evapotranspiração de referência devido à utilização dos instrumentos de medida indica um melhor ajuste para a estimativa da  $ET_0$  para o método de Hargreaves, considerando o método de Penman-Monteith-FAO como padrão para comparação.

Para doze localidades no Sul de Ontário, Canadá, Sentelhas, Gillespie e Santos (2010) estudando métodos que utilizam, basicamente, dados de temperatura como Hargreaves, Priestley-Taylor e comparando-os ao método padrão PM-FAO, observaram que o método Hargreaves, após alguns ajustes, foi a melhor opção para estimar a  $ET_0$ . Resultados similares foram encontrados por Silva et al. (2008) em

Lavras – MG, mostrando a viabilidade do método Hargreaves, quando faltam dados para entrada ao método PM-FAO.

Tagliaferre et al. (2010) avaliaram o desempenho dos métodos empíricos Penman modificado, Radiação Solar, Blaney-Cridde, Priestley-Taylor e Hargreaves em relação ao método padrão PM-FAO para as condições climáticas do sul da Bahia, no município de Eunápolis, cujo clima é classificado como subúmido. Os métodos Radiação Solar e Blaney-Cridde apresentaram melhor desempenho para estimativa da  $ET_0$  em quatro escalas de tempo: diária, três, cinco e sete dias. O método Hargreaves não foi eficiente para estimar a  $ET_0$  quando comparado ao método padrão PM-FAO. Segundo os mesmos autores, em razão do grande número de métodos existentes para estimativa da  $ET_0$ , a escolha do método mais adequado depende da disponibilidade de dados meteorológicos, climatológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade, bem como do custo de aquisição de equipamentos.

Em quatro diferentes tipos de clima, no Irã, Tabari (2010) avaliou os métodos Makkink, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves. Os resultados mostraram que o método Turc teve o melhor desempenho em regiões áridas. Contrariamente, o método de Makkink teve o pior desempenho, exceto para clima frio e úmido. De maneira geral, os métodos de Turc e Hargreaves sobressaíram aos métodos de Makkink e Priestley-Taylor.

Na Croácia e Sérvia, Trajkovic e Kolakovic (2010) avaliaram cinco métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em condições de clima úmido. O estudo indicou que o método Turc é o mais adequado para estimar a  $ET_0$  em locais úmidos, quando os dados são insuficientes para aplicar o método PM-FAO. Os demais métodos apresentaram a seguinte ordem decrescente de desempenho: Hargreaves, Priestley-Taylor, Jensen-Haise e Thornthwaite.

Adeboye et al. (2009) avaliaram o desempenho dos métodos Jensen-Haise e Hargreaves comparando-os com o método PM-FAO na bacia do Rio Ogun-Osun, na Nigéria. Concluíram que o método Jensen-Haise é mais ajustado para estimativa da  $ET_0$  em situações em que apenas as temperaturas máximas e mínimas estão disponíveis. Por sua vez, Maeda, Wiberg e Pellikka (2011) no Sul do Quênia, na África, verificaram que o método de Hargreaves foi o mais apropriado, quando há disponibilidade somente de dados de temperatura do ar.

No estudo de doze métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do Semiárido Nordestino, Cavalcante Júnior et al. (2011) concluíram que dentre os métodos estudados quatro deles Penman Original, Radiação Solar, Blaney-Criddle e Frere-Popov apresentaram ótimo desempenho na estimativa da evapotranspiração de referência em qualquer época do ano, podendo serem recomendados para manejo de irrigação, uma vez que seus resultados apresentaram uma satisfatória correlação com o método padrão PM-FAO. De maneira geral os métodos avaliados mostraram melhor desempenho na precisão da estimativa do período seco para o úmido.

Em condições semiáridas na bacia do Rio Tensift, em Marrocos e, no Vale Yaqui, noroeste do México, Er-Raki et al. (2010) identificaram melhores resultados para o método Hargreaves em comparação ao método padrão PM-FAO. Por outro lado o desempenho dos métodos Priestley-Taylor e Makkink foram piores, exceto em condições úmidas. No entanto, os autores sugerem que parâmetros específicos nos métodos Priestley-Taylor e Makkink, quando calibrados localmente, melhoram os seus desempenhos.

Diferentes métodos são desenvolvidos ou recomendados para condições climáticas específicas, dependendo da disponibilidade de dados locais, precisão exigida e escala temporal. Havendo a indisponibilidade de dados de entrada, para o método padrão PM-FAO, justifica-se a utilização de métodos alternativos. Verifica-se na literatura que os métodos mais estudados são: Thornthwaite (TW), Hargreaves (HG), Makkink (MK), Radiação Solar (RS), Blaney-Criddle (BC), Priestley-Taylor (PT), Turc (TC), Linacre (LN), Hamon (HM), Holdridge (HD), Jensen-Haise (JH), Tanque Classe A (TCA) e, evidentemente o método padrão PM-FAO. Contudo para adequar cada método a uma condição específica, muitos deles passam por ajustes, calibrações, evidenciando-se, portanto, que para adoção de um método, deve-se atentar para as condições climáticas em que ele foi desenvolvido (CARVALHO et al., 2011).

Quando há disponibilidade de dados para a utilização do método PM-FAO este deve ser utilizado como padrão, tendo em vista sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial. Caso contrário, deve-se avaliar o desempenho de um método que esteja ajustado com o método padrão PM-FAO, os

dados disponíveis e adequação às condições climáticas do local.

## **2.4 Aquisição automática de dados**

A evolução tecnológica das estações meteorológicas automáticas a partir dos anos 60 (WMO, 1967) e sua difusão têm proporcionado precisão e rapidez na coleta e ordenação dos dados, facilitando o seu uso nas estimativas da  $ET_0$ , principalmente nos métodos simplificados, com menos dados meteorológicos de entrada requeridos (BAUSCH, 1990). A principal importância da coleta automatizada de dados está no fato de que, assim pode-se obter um monitoramento mais rápido e eficiente das condições atmosféricas para aplicar no manejo dos recursos hídricos durante o período de cultivo, do plantio até a colheita.

As estações meteorológicas automáticas são desenvolvidas para medições mais acuradas e precisas, proporcionando o armazenamento de dados meteorológicos por um longo período de tempo e a um custo relativamente baixo (TANNER, 1990). Utilizando-se dados meteorológicos como entrada, diversos métodos para a estimativa da  $ET_0$  têm sido desenvolvidos com variável complexidade, no entanto, poucos países dispõem, em toda sua extensão territorial, de estações equipadas o suficiente para fornecerem todos os elementos necessários à aplicação de um determinado modelo de estimativa de evapotranspiração (MELLO, 1998; TABARI, 2010).

Comparações na uniformidade dos dados registrados nas estações meteorológicas automáticas em relação às estações convencionais têm demonstrado ajuste eficiente entre os elementos analisados, especialmente precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, considerando os diferentes tipos de sensores, abrigos e frequência de medidas (ALMEIDA; SOUZA; ALCÂNTARA, 2008; CUNHA; MARTINS, 2004; OLIVEIRA, 2003; OLIVEIRA et al., 2010; SCARPARE et al., 2006).

O monitoramento automático de diversas variáveis meteorológicas em tempo real com maior acuracidade e sensibilidade nas medidas representa um avanço nos sistemas de aquisição automática de dados. Segundo Galvani (2001) a automatização da aquisição de dados meteorológicos tem sido amplamente utilizada



pela facilidade, eficiência, qualidade e padronização dos dados coletados, diminuindo os erros oriundos de leitura, interpretação e digitação de dados.

A evolução na eletrônica, na computação e a necessidade de monitoramento do tempo, clima e recursos hídricos promoveram a ampliação das redes observacionais regionais e nacionais (OLIVEIRA, 2003). No entanto, há ainda um número limitado de locais onde estão instaladas estações meteorológicas para medição e monitoramento de elementos do clima como, temperatura e umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação.

O Brasil possui 5.561 municípios e o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET possui uma rede de 500 estações meteorológicas automáticas, instaladas em menos de 10% dos municípios brasileiros. As estações meteorológicas automáticas do INMET coletam, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, radiação solar, direção e velocidade dos ventos) representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite, para a sede do INMET em Brasília. O conjunto de dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados (INMET, 2011).

Os sistemas de aquisição automática de dados, além da importância na área de meteorologia, vêm ganhando espaço na área de agronomia, favorecendo o monitoramento das variáveis relacionadas à planta, ao solo e às máquinas agrícolas as quais estão ligadas direta ou indiretamente ao crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas, melhorando o manejo das atividades agrícolas (CUNHA; MARTINS, 2004).

A estação meteorológica automática – EMA é um equipamento que constitui em um sistema de coleta automática de informações ambientais locais (meteorológicas e hidrológicas) e, inclui quatro subsistemas: coleta de dados, controle e armazenamento de dados, energia e comunicação. A coleta de dados é feita através de sensores para medição dos parâmetros meteorológicos a serem observados. As medidas tomadas, em intervalos de minuto a minuto e, integralizadas para o período de uma hora, para serem transmitidas, são: temperatura instantânea, máxima e mínima do ar, umidade relativa instantânea,

máxima e mínima do ar, temperatura instantânea, máxima e mínima do ponto de orvalho, pressão atmosférica instantânea, máxima e mínima do ar, velocidade instantânea do vento, direção do vento, radiação solar e precipitação. O controle e armazenamento dos dados são compostos por um processador central (datalogger) de baixo consumo de energia, que faz o registro dos valores observados em uma unidade de memória que contem as instruções programadas para aquela unidade. Os dados são armazenados em uma memória não volátil que mantém os dados medidos por um período especificado. O subsistema de energia torna a estação independente de energia elétrica externa e não requer nenhum equipamento ou sala para sua operação diária. Inclui baterias e um painel solar responsável pelo fornecimento de energia para o funcionamento de todo o instrumental da EMA. O subsistema de comunicação faz a transmissão dos dados coletados, que estão armazenados na memória. A comunicação interativa entre a EMA e o INMET, em tempo real é feita através do satélite BrasilSat, em órbita geosíncronica, que permite comunicação bidirecional ( INMET, 2011).

A confiabilidade de dados meteorológicos obtidos através de sistema automático de aquisição de dados é função da escolha e manutenção dos sensores utilizados na estação meteorológica automática. Segundo Sentelhas et al. (1997) a escolha do sensor é de grande importância, devendo-se seguir a ordem de prioridade: acurácia, custo, manutenção e consumo de energia. A acurácia dos sensores é o que mais limita quanto ao objetivo da coleta e o manejo de recursos hídricos, visto que a baixa precisão pode levar a erros grosseiros na determinação da evapotranspiração de referência (BARROS et al., 2009).

Todas as estações meteorológicas automáticas da rede do INMET são instaladas em uma base física, numa área livre de obstruções naturais e prediais, situada em área gramada mínima de 14 m por 18 m, cercada por tela metálica. Os sensores e demais instrumentos são fixados em um mastro metálico de 10 m de altura, aterrado eletricamente e protegido por para-raios. Os instrumentos para medição de precipitação e radiação solar, bem como a antena para a comunicação de dados, ficam situados fora do mastro, mas dentro do cercado. O funcionamento de cada sensor na EMA é monitorado pelo Centro de Controle do INMET. O Centro de Controle também monitora o fluxo de dados entre os vários

computadores/servidores que interligam o Sistema de Comunicações Meteorológicas do INMET com seus parceiros no Brasil e no exterior, sendo o INMET o operador do Centro Regional de Comunicações da Organização Meteorológica Mundial – OMM, no âmbito da América do Sul (INMET, 2011).

## **2.5 Caracterização agrícola, geográfica e climática da região**

A ocupação da região dos cerrados de Minas Gerais, especificamente da Mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, nas últimas décadas, vem representando um importante papel, não só por sua imensa área agricultável de 1,5 milhão de hectares, mas também por ser possuidora de grande potencial econômico. Esta mesoregião congrega diversos municípios de uma área geográfica com similaridade econômica, social e fisiográfica (FERREIRA, 2005). A extensa fronteira agrícola que se constitui pelas frentes de ocupação tem contribuído enormemente para a elevação da participação desta região na produção agropecuária do País.

No estado de Minas Gerais a Mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba se apresentam como grandes produtoras de soja, milho e feijão. A agricultura irrigada é expressiva e, Santana et al. (2008) afirmaram que para esta região a irrigação se constitui como alternativa viável, dentre os tratamentos culturais, na melhoria da produtividade e, que a finalidade básica desta técnica é proporcionar água a cultura para atender à exigência hídrica. Segundo Hsiao, Steduto e Fereres (2007), a melhoria da performance dos sistemas de irrigação e o aprimoramento do manejo da irrigação são de grande importância e necessários para aumentar a produtividade por unidade de água e tornar a agricultura irrigada sustentável, uma vez que a disponibilidade de água para irrigação será reduzida no futuro, devido ao aumento da demanda por outros setores (SANTOS et al., 2010).

A Mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba é formada por 66 municípios agrupados em sete microrregiões, localizada na região oeste de Minas Gerais entre as coordenadas geográficas 18<sup>o</sup> 40' e 19<sup>o</sup> 60' de latitude sul e longitude de 46<sup>o</sup> 20' e 50<sup>o</sup> 13' W e limitada pelos rios Grande e Paranaíba, formadores do rio Paraná. Tem área de 90.545 Km<sup>2</sup> e equivale a 15,4 % do território mineiro (NISHIYAMA, 1998).

O relevo pertence ao domínio morfoclimático dos planaltos e chapadões e, faz parte do Planalto Arenítico da Bacia do Paraná variando de plano à ligeiramente ondulado na maioria absoluta, com pequenas manchas de relevo fortemente ondulado. Os solos são predominantemente Latossolo Vermelho Escuro Álico, textura argilosa, com pequenas manchas de solos podzólicos (EMBRAPA, 1982). A cobertura vegetal natural é predominantemente de vegetação de cerrado penetrada por florestas de galerias (AB' SABER, 1970).

A região apresenta clima tropical de altitude de acordo com a classificação de Köppen, onde predomina o tipo climático Cwa mesotérmico, com verões quentes, chuvas no verão e inverno seco, situado na região marginal da área de clima Cwb (EMBRAPA, 1982). A temperatura média anual é de 22<sup>o</sup> C e a amplitude térmica anual entre 7<sup>o</sup> C e 9<sup>o</sup> C, caracterizado por um inverno seco, período em que o tempo apresenta-se com céu limpo, intensa radiação solar e baixa umidade do ar (KLINK; MACHADO, 2005).

O comportamento pluviométrico é caracterizado pela alternância de duas estações, uma chuvosa, outra seca, a primeira coincidindo com o verão e a segunda com o inverno. De acordo com Silva, Guimarães e Tavares (2003), a precipitação anual é de 1500 mm, em média, sendo o trimestre mais chuvoso, dezembro, janeiro e fevereiro, com precipitação entre 42,8mm e 541 mm por mês, para uma série histórica de sessenta e dois anos. A chuva se concentra no período de outubro a março, ocorrendo dois a três meses praticamente sem nenhuma precipitação no outro período do ano.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização dos municípios e das estações

A área de estudo (Figura 1) é composta dos municípios mineiros de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba localizados na mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG.

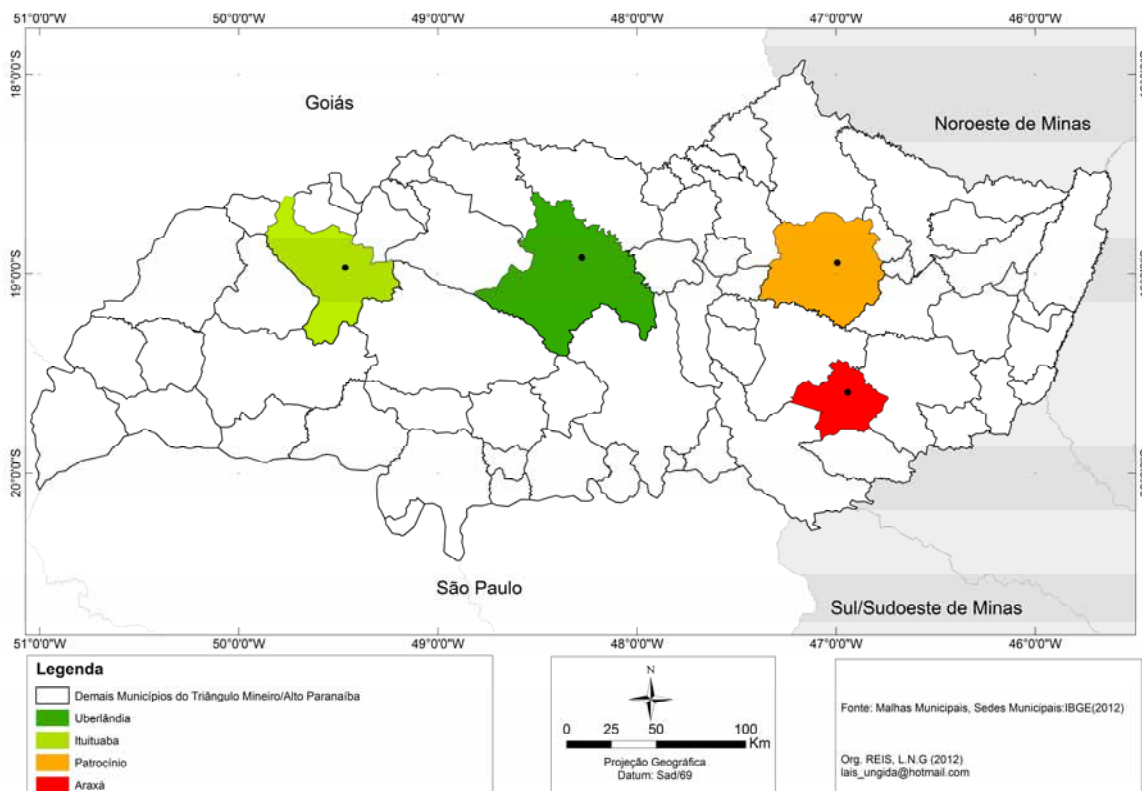


Figura 1. Área em estudo: mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba

Neste estudo os dados utilizados foram obtidos nas estações meteorológicas automáticas (Tabela 1), do 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, situadas nos municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba na mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG.

Cada estação meteorológica automática – EMA tem um código de identificação na Organização Meteorológica Mundial – OMM e, são instaladas em um município através de uma parceria do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET com uma instituição parceira. As instituições parceiras das estações utilizadas são: estação de código A507, Universidade Federal de Uberlândia – UFU; estação de

código A505, Centro Universitário do Planalto de Araxá – UNIARAXÁ; estação de código A523, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais – EPAMIG e estação de código A512, Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG / Fundação Educacional de Ituiutaba – FEIT.

Tabela 1. Localização geográfica das estações meteorológicas automáticas utilizadas

Estação	Código	Latitude	Longitude	Altitude	Instalação
Uberlândia	A507	18°91'66"S	48°25'05"W	869m	19/12/02
Araxá	A505	19°60'00"S	46°93'33"W	999m	14/12/02
Patrocínio	A523	18°99'67"S	46°98'56"W	963m	22/08/06
Ituiutaba	A512	18°95'28"S	49°52'53"W	760m	11/05/06

### 3.2 Caracterização das estações e base de dados

As estações meteorológicas automáticas do INMET são instaladas em uma base física de 14m por 18m numa área gramada livre de obstruções naturais e prediais, cercada por tela metálica para proteção. Os sensores e demais instrumentos são fixados em um mastro metálico de 10 metros de altura, aterrado eletricamente com malha de cobre e protegido por para-raios. Os instrumentos para medição de precipitação e radiação solar, bem como a antena para comunicação, ficam situados fora do mastro, mas dentro do cercado. Observa-se ao centro a antena de comunicação via satélite, à direita o “datalogger” com sensor de temperatura presos ao mastro e à esquerda o pluviômetro (Figura 2).

A marca das estações meteorológicas automáticas é Vaisala, modelo MAWS301, com sistema de aquisição de dados QML201C da Vaisala, com 10 canais, tendo 8 entradas e 8 saídas para sensores. Este sistema de aquisição de dados possui ampla capacidade de cálculo e armazenamento de dados.

Os dados coletados pelas EMA's são enviados automaticamente para a sede do INMET em Brasília, de hora em hora, onde são efetuadas as validações por um sistema de qualidade e disponibilizados em tempo real. Estes dados são inseridos

no Sistema Mundial de Telecomunicações – SMT da Organização Meteorológica Mundial – OMM e disponibilizados para a comunidade meteorológica internacional.



Figura 2. Estação Meteorológica Automática – EMA, ao centro a antena de comunicação via satélite, à direita o “datalogger” com sensor de temperatura presos ao mastro e à esquerda o pluviômetro.

Os dados obtidos para este estudo constam dos registros horários, referentes ao período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2010. Estes dados foram temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global.

As estações meteorológicas automáticas do INMET possuem os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa, modelo HMP45A acurácia de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  para temperatura e acurácia de  $\pm 1\%$  para umidade relativa; velocidade do vento anemômetro com sensor modelo WAA151, com limite de funcionamento entre 0,4 a  $75 \text{ m s}^{-1}$  e acurácia de  $\pm 0,17 \text{ m s}^{-1}$  instalado a altura de 2 m; radiação solar global piranômetro com sensor modelo CMP6, com acurácia  $\pm 20 \text{ W m}^{-2}$  e constante de calibração de  $12,80 \cdot 10^{-6} \text{ V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , todos da marca vaisala.

### 3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência

A  $ET_0$  em  $\text{mm dia}^{-1}$  foi estimada para o período diário, para o ano de 2010, pelos métodos de Makkink (1957), Hargreaves (1976), Radiação Solar (DOORENBOS; PRUITT, 1977) e Penman-Monteith FAO (ALLEN et al., 1998), considerado como padrão, para comparação e análise dos demais métodos.

As análises dos resultados foram feitas para o período diário, utilizando-se análise de regressão modelo linear:

$$y = ax + b \quad (1)$$

em que,

$y$  –  $ET_0$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ , método Penman-Monteith;

$a$  – coeficiente angular;

$x$  –  $ET_0$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ , outros métodos, e

$b$  – coeficiente linear.

A variável dependente foi a estimativa da  $ET_0$  pelo método de Penman-Monteith (PM) e a variável independente as estimativas da  $ET_0$  pelos três métodos estudados. Nessa análise foi considerado o modelo completo e o sem intercepto. Foram analisados os ajustes dos modelos de regressão linear para os métodos de estimativa da  $ET_0$ , por meio do teste t de Student, ao nível de 1% e 5% de probabilidade.

Foram, também, analisados os erros padrão de estimativas (EPE) entre as estimativas de  $ET_0$  dos métodos estudados e  $ET_0$  do método PM, de acordo com a equação:

$$EPE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left( Y_i - \hat{Y}_i \right)^2}{n-1} \right]^{0,5} \quad (2)$$

na qual,

$Y_i$  = média de  $ET_0$  método PM;

$\hat{Y}_i$  = estimativa de  $ET_0$  outros métodos estudados;

$n$  = número total de observações.

Para atingir o objetivo desse trabalho, foi utilizada a técnica para determinação



de desvio padrão (erros) em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, descrita por Turco et al. (1994), nos seguintes métodos de estimativa da  $ET_0$ : Makkink (1957), Hargreaves (1976), Radiação Solar (DOORENBOS; PRUITT, 1977) e Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Para isso, foi realizado um tratamento matemático na equação original desses métodos (TURCO; PERECIN; PINTO JÚNIOR, 2008).

### 3.3.1 Método de Makkink (MK)

Descrição da equação original do método de Makkink e o tratamento matemático realizado.

Seja,

$$ET_{0MK} = (0,61 Q W) - 0,12 \quad (3)$$

a equação básica proposta por Makkink (1957) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

$ET_{0MK}$  = evapotranspiração de referência, em gramado,  $mm \text{ dia}^{-1}$ ;

$Q$  = radiação solar global medida ou estimada,  $cal \text{ cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;

$W$  = fator que representa a parte fracional da radiação solar que é utilizada na  $ET_0$ , para diferentes valores de temperatura e altitude (VILLA NOVA; REICHARDT, 1989).

Pode-se escrever a eq. (3) na seguinte forma:

$$ET_0 = \frac{C.W.Q}{59} \quad (4)$$

na qual,

$Q$  = radiação global recebida,  $cal \text{ cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;

$1/59$  = fator de conversão de  $cal \text{ cm}^{-2}$  a  $mm$  de evaporação equivalente.

Admitindo-se por hipótese que:

$$W = K_a T \quad (5)$$

na qual,

$K_a$  = constante calculada por meio de diferentes valores de  $W$  e  $T$ .

Substituindo a eq. (5) na (4) tem-se:

$$ET_0 = \frac{C.W.Q}{59} \quad (6)$$

e considerando que:

$$K_c = \frac{K_a \cdot K_b}{59}$$

tem-se:

$$ET_0 = K_c \cdot U \cdot V \cdot T \cdot Q \quad (7)$$

### 3.3.2 Método de Hargreaves (HG)

Descrição da equação original do método de Hargreaves e o tratamento matemático realizado.

Seja,

$$ET_{0HG} = 0,0075Q T \quad (8)$$

a equação básica proposta por Hargreaves (1976) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

$ET_{0HG}$  = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia<sup>-1</sup>;

T = temperatura média do ar, °F;

Q = radiação solar global medida ou estimada, cal cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

Pode-se escrever a eq. (8) na seguinte forma:

$$ET_0 = \frac{C \cdot W \cdot Q}{59} \quad (9)$$

na qual,

Q = radiação solar global recebida, cal cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

1/59 = fator de conversão de cal cm<sup>-2</sup> a mm de evaporação equivalente.

Considerando que:

$$K_c = \frac{K_a \cdot K_b}{59}$$

tem-se:

$$ET_0 = K_c \cdot U \cdot V \cdot T \cdot Q \quad (10)$$

### 3.3.3 Método da Radiação Solar (RS)

Descrição da equação original do método de Radiação Solar e o tratamento

matemático realizado.

Seja,

$$ET_0 = C W Q \quad (11)$$

a equação básica proposta por Doorenbos e Pruitt (1977) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência, em gramado,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

C = coeficiente angular de regressão  $ET_0 \times W Q$ , determinado em função da umidade relativa média do ar e da velocidade média do vento a 2 m de altura (VILLA NOVA; REICHARDT, 1989);

W = fator que representa a parte fracional da radiação solar que é utilizada na  $ET_0$ , para diferentes valores de temperatura e altitude (VILLA NOVA; REICHARDT, 1989);

Q = radiação solar global medida ou estimada,  $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$

Pode-se escrever a eq. (11) na seguinte forma:

$$ET_0 = \frac{C.W.Q}{59} \quad (12)$$

na qual,

$ET_0$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

Q = radiação global recebida,  $\text{cal.cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ;

1/59 = fator de conversão de  $\text{cal cm}^{-2}$  a mm de evaporação equivalente.

Admitindo-se por hipótese que:

$$C = K_a U V \quad (13)$$

$$W = K_b T \quad (14)$$

na qual,

$K_a$  = constante calculada por meio de diferentes valores de C, U e V;

$K_b$  = constante calculada por meio de diferentes valores de W e T;

U = umidade relativa média do ar, %;

V = velocidade média do vento a 2 m de altura,  $\text{m s}^{-1}$ ;

T = temperatura média do ar,  $^{\circ}\text{C}$ .

Substituindo as eq. (13) e (14) na (12), tem-se:

$$ET_0 = \frac{K_a.K_b}{59} U.V.T.Q$$

Considerando que:

$$K_c = \frac{K_a \cdot K_b}{59}$$

tem-se:

$$ET_0 = K_c \cdot U \cdot V \cdot T \cdot Q \quad (15)$$

### 3.3.4 Método do Penman-Monteith (PM)

Para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, Allen et al. (1998) propuseram a seguinte equação:

$$ET_{0(PM)} = \frac{0,409 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{900}{T + 273} \right) v (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 v)} \quad (16)$$

na qual,

$ET_0 PM$  = evapotranspiração de referência pelo método PM, em gramado,  $\text{mmd}^{-1}$ ;

$R_n$  = radiação líquida,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;

$G$  = fluxo de calor no solo,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;

$T$  = temperatura média do ar,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$V$  = velocidade média do vento a 2m de altura,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$(e_s - e)$  = déficit de pressão de vapor,  $\text{kPa}$ ;

$\Delta$  = tangente à curva de pressão de vapor em relação a temperatura,  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

900 = fator de conversão.

A pressão atual do vapor da água do ar é expressa por:

$$e = (U/100) e_s \quad (17)$$

na qual,

$e$  = pressão atual do vapor da água do ar,  $\text{kPa}$ ;

$e_s$  = pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro seco,  $\text{kPa}$ ;

$U$  = umidade relativa média do ar, %.

A pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro seco é determinada pela equação:

$$e_s = 0,6108 \exp \left( \frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \quad (18)$$

A curva de pressão de vapor é determinada pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (19)$$

Substituindo as equações (17), (18) e (19) na (16), temos:

$$ET_0 = \frac{1021,247827 \frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} Rn + 36,666324 \frac{V \left( \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) - \frac{1}{100} U \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \right)}{T + 273}}{2503,0584 \frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} + 0,0667 + 0,022678 V} \quad (20)$$

### 3.3.5 Transferência do erro da variável independente para a variável dependente

Para análise dos resultados desse trabalho, considerando os desvios padrão (erros) da  $ET_0$ , foi utilizada a metodologia de Vuolo (1996), descrita a seguir:

Quando relacionamos diariamente a  $ET_0PM$  com a  $ET_0$  dos três métodos estudados ocorre que uma grandeza  $y$  que é medida em função de uma variável  $x$  considerada como independente ( $y = f(x)$ ). Entretanto, ambas as grandezas têm erros e, portanto, devem ser associadas incertezas às duas variáveis:

$$x \longrightarrow \sigma_x \quad y \longrightarrow \sigma_{y_0}$$

Na análise da dependência entre  $y$  e  $x$ , é desnecessário admitir incertezas nas duas variáveis. Isto é, geralmente, não interessa conhecer os valores verdadeiros de  $x$  e  $y$  em cada caso, mas interessa conhecer a relação verdadeira entre  $x$  e  $y$ . Por isso, pode-se admitir que o resultado  $x$  é o valor verdadeiro, mas  $y$  tem incerteza maior  $\sigma_y$ , dada por:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_0}^2 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_0^2 \sigma_x^2 \quad (21)$$

em que  $(dy/dx)_0$  é uma estimativa preliminar da derivada  $(dy/dx)$ . A variância  $\sigma_y^2$  é a variância original  $\sigma_{y_0}^2$  somada a uma variância  $\left(\frac{dy}{dx}\right)_0^2 \sigma_x^2$  que representa a incerteza transferida de  $x$  para  $y$ .

### 3.3.6 Método dos mínimos quadrados

Quando relacionamos diariamente os métodos estudados em relação ao método PM temos duas variáveis,  $x$  e  $y$ . Os resultados das medidas são chamados pontos experimentais, pois cada par de valores de  $x$  e  $y$  pode ser representado como um ponto no gráfico  $x, y$ . Um conjunto de pontos experimentais pode ser indicado por  $\{x_1, y_1, \sigma_1\}, \{x_2, y_2, \sigma_2\}, \dots, \{x_i, y_i, \sigma_i\}, \dots, \{x_n, y_n, \sigma_n\}$ , onde  $x_i$  é admitida como variável independente, sendo considerada isenta de erros, enquanto que a incerteza estatística na variável  $y_i$  é dada pelo desvio padrão  $\sigma_i$ .

Um problema fundamental é obter a melhor função  $f(x)$  para descrever o conjunto de pontos experimentais obtido em medidas das grandezas  $x$  e  $y$ . O problema de ajustar a melhor função  $f(x)$  a um conjunto de pontos experimentais só pode ser resolvido a partir de um critério que defina objetivamente qual é a melhor função. O critério utilizado foi o método dos mínimos quadrados para ajuste da função  $f(x)$  ao conjunto de pontos experimentais.

No método dos mínimos quadrados, a função  $f(x)$  deve ser determinada a partir de uma função geral  $f(x; a_1, a_2, \dots, a_n)$  previamente escolhida. Isto é, a função  $f(x)$  tem forma e número de parâmetros predeterminados.

Por exemplo, a função geral a ser ajustada pode ser escolhida como um polinômio de 2º grau:

$$f(x; a_1, a_2, a_3) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2$$

e o método dos mínimos quadrados permite determinar os melhores valores para  $a_1, a_2, a_3$ .

Foi utilizada a função  $f(x, a_1, a_2) = a_1 + a_2 x$  em que foram determinados os valores para  $a_1$  e  $a_2$ . Essa função é de grau 1 ( $m$ ) e número de parâmetros igual a 2 ( $p = m+1$ ).

A seguir, são apresentadas as expressões para ajuste de uma reta para um conjunto de pontos experimentais  $\{x_1, y_1, \sigma_1\}, \{x_2, y_2, \sigma_2\}, \dots, \{x_i, y_i, \sigma_i\}, \dots, \{x_n, y_n, \sigma_n\}$ , em que  $\sigma_i$  é a incerteza em  $y_1$  e as medidas  $x_i$  são supostas isentas de erro, conforme método dos mínimos quadrados.

A equação geral da reta é:

$$y = ax + b \tag{22}$$

O problema consiste em determinar os parâmetros  $a$  e  $b$ . A reta é um exemplo simples de função linear em relação aos parâmetros:

$$f(x, a_1, a_2) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x), \quad (23)$$

na qual,

$$f_1(x) = x, \quad f_2(x) = 1, \quad (24)$$

$$a_1 = a \quad \text{e} \quad a_2 = b.$$

Assim, conforme o método dos mínimos quadrados, os melhores valores para  $a$  e  $b$  são calculados por meio da solução da seguinte equação na forma matricial, para ajuste de função linear aos parâmetros:

$$A = M^{-1} B \quad (25)$$

na qual,

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} y_i f_1 \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} y_i f_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} y_i \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} x_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \end{bmatrix} \quad (26)$$

A matriz  $M$  pode ser escrita com notação mais simples:

$$M = \begin{bmatrix} s_{x^2} & s_x \\ s_x & s_\sigma \end{bmatrix} \quad (27)$$

em que:

$$s_\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i}, \quad s_x = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i}, \quad s_{x^2} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i}, \quad s_y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i}, \quad s_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sigma_i} \quad (28)$$

A matriz  $M^{-1}$  é dada por

$$M^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} s_\sigma & -s_x \\ -s_x & s_{x^2} \end{bmatrix} \quad (29)$$

em que:

$$\Delta = (s_\sigma \cdot s_{x^2} - s_x^2) \quad (30)$$

Assim, os melhores valores para  $a$  e  $b$  dados por (31) e (32) são:

$$a = \frac{1}{\Delta} (s_\sigma \cdot s_{xy} - s_x \cdot s_y) \quad \text{e} \quad (31)$$

$$b = \frac{1}{\Delta} (s_{x^2}s_y - s_x s_{xy}) \quad (32)$$

### 3.3.7 Avaliação da qualidade de um ajuste

Um critério de avaliação da qualidade do ajuste é essencialmente um método para se determinar se a curva ajustada foi boa em relação aos pontos experimentais. O critério utilizado para avaliação da qualidade de ajuste foi o Teste de  $\chi^2$  reduzido, descrito a seguir.

Indicando por  $f(x)$  a função ajustada a um conjunto de  $n$  pontos experimentais  $(x_i, y_i, \sigma_i)$ , a quantidade  $\chi^2$  (estatístico) é definido como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (33)$$

A quantidade  $\chi^2$  (reduzido) é definida como:

$$\chi_{\text{red}}^2 = \frac{\chi^2}{\nu} \quad (34)$$

em que  $\nu$  é o número de graus de liberdade do ajuste. Como  $n$  é o número de pontos e  $p$  é o número de parâmetros ajustados,  $\nu = (n-p)$ . Após a obtenção dos  $\chi_{\text{red}}^2$ , a avaliação da qualidade de ajuste foi feita relacionando os valores de  $\nu$  com os valores de  $\chi_{\text{red}}^2$ .



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estimativa da $ET_0$ a partir de elementos meteorológicos

Para os quatro municípios estudados a partir da estimativa da  $ET_0$  média diária pelos métodos avaliados, identificou-se a equação linear de cada método que se ajustasse com mais eficiência a  $ET_0$  estimada pelo método parametrizado pela FAO Penman-Monteith (PM). A análise de regressão da  $ET_0$  obtida pelos métodos estudados em comparação com o método PM através da equação  $y = ax + b$  resultou em coeficiente linear não significativo ( $p > 0,01$ ), de acordo com o teste t de Student, para as quatro localidades estudadas. A regressão foi reestimada, passando pela origem e, obtidos os coeficientes angulares da equação  $y = ax$  da  $ET_0$  estimada pelos métodos avaliados em comparação com o método padrão PM, para os municípios estudados na mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

Os resultados da análise de regressão entre os valores médios diários da  $ET_0$  estimados pelos métodos avaliados em comparação com o método PM, utilizando-se o modelo linear sem intercepto são apresentados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 para o ano de 2010, nos municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba respectivamente.

Comparando os valores médios da  $ET_0$  dos métodos avaliados com a  $ET_0$  média estimada pelo método padrão PM, Tabelas 2, 3, 4 e 5 verificou-se que os métodos de Hargreaves (HG) e Makkink (MK) subestimaram os valores médios diários da  $ET_0$ , enquanto o método da Radiação Solar (RS) superestimou, em todos os municípios estudados.

Tabela 2. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Uberlândia - MG

Método	ET <sub>0</sub> médio (mm d <sup>-1</sup> )	a	r <sup>2</sup>	r	EPE
PM	5,6	—	—	—	—
HG	5,1	1,1131	0,7037	0,8389	0,5764
MK	4,1	1,3894	0,7127	0,8442	0,5854
RS	6,2	0,9104	0,6280	0,7925	0,6817

a-coeficiente angular, r<sup>2</sup>-coeficiente de determinação, r-coeficiente de correlação, EPE-erro padrão de estimativa.

Tabela 3. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Araxá - MG

Método	ET <sub>0</sub> médio (mm d <sup>-1</sup> )	a	r <sup>2</sup>	r	EPE
PM	5,5	—	—	—	—
HG	5,0	1,1064	0,7143	0,8452	0,5663
MK	4,0	1,3884	0,7204	0,8488	0,5702
RS	6,2	0,9076	0,6333	0,7958	0,6424

a-coeficiente angular, r<sup>2</sup>-coeficiente de determinação, r-coeficiente de correlação, EPE-erro padrão de estimativa.

Tabela 4. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Patrocínio - MG

Método	ET <sub>0</sub> médio (mm d <sup>-1</sup> )	a	r <sup>2</sup>	r	EPE
PM	5,4	—	—	—	—
HG	4,8	1,1070	0,7240	0,8509	0,5457
MK	4,1	1,3757	0,7269	0,8526	0,5929
RS	6,1	0,9021	0,6372	0,7982	0,6252

a-coeficiente angular, r<sup>2</sup>-coeficiente de determinação, r-coeficiente de correlação, EPE-erro padrão de estimativa.

Tabela 5. Resultado da análise de regressão, modelo linear sem intercepto, para o município de Ituiutaba – MG

Método	ET <sub>0</sub> médio (mm d <sup>-1</sup> )	a	r <sup>2</sup>	r	EPE
PM	5,9	—	—	—	—
HG	5,3	1,1058	0,7154	0,8458	0,5716
MK	4,2	1,3970	0,7287	0,8536	0,5945
RS	6,3	0,9096	0,6237	0,7897	0,7159

a-coeficiente angular, r<sup>2</sup>-coeficiente de determinação, r-coeficiente de correlação, EPE-erro padrão de estimativa.

Observa-se, nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, o coeficiente angular e o coeficiente de determinação, obtidos do ajustamento linear entre os valores estimados da ET<sub>0</sub> pelos métodos estudados e o método padrão PM. Em todas as localidades estudadas o método RS e o método HG apresentaram valores do coeficiente angular na equação de regressão, mais próximos da unidade, indicando concordância entre os valores estimados por esses métodos e os estimados pelo método padrão PM.

Obtiveram-se maiores valores de r<sup>2</sup> com o método MK e o método HG, Tabelas 2, 3, 4, e 5, mostrando que os dois métodos tiveram grau de eficiência similares nas quatro localidades estudadas, quando comparados com o método

padrão, com índices de precisão de 71,27% e 70,37%, 72,04% e 71,43%, 72,69% e 72,40% e, 72,87% e 71,54% respectivamente para os municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba, indicando que considerável parte da variação total dos valores da  $ET_0$  é explicada pelos métodos.

Resultado semelhante foi obtido por (OLIVEIRA et al., 2008) em estudo de comparação de valores de  $ET_0$  diários pelo método HG e por método de lisímetro de pesagem hidráulica encontrando valor  $r^2$  0,71 para Vitória de Santo Antão, Pernambuco. Contudo, a adoção do coeficiente de determinação  $r^2$  como único critério de definição da qualidade de métodos não é adequado, uma vez que esse índice não estabelece o tipo e a magnitude das diferenças entre um valor estimado pelo método padrão e um valor previsto por modelos de estimativa (BARROS et al., 2009). Assim, a análise do coeficiente de correlação e erro padrão da estimativa auxilia a interpretação dos resultados.

O coeficiente de correlação (Tabelas 2, 3, 4 e 5) obtidos da comparação entre os valores estimados da  $ET_0$  pelos métodos estudados e o método padrão PM, para as quatro localidades estudadas, mostraram que os métodos HG e MK com  $r$  respectivamente 0,8389 e 0,8442 para Uberlândia; 0,8452 e 0,8488 para Araxá; 0,8509 e 0,8526 para Patrocínio e 0,8458 e 0,8536 para Ituiutaba têm correlação positiva com o método padrão PM, uma vez que a amplitude de variação da correlação é bem definida de  $-1 \leq r \leq 1$ . Quanto mais próxima da unidade, mais efetiva é a correlação. O coeficiente de correlação não indica que há qualquer relação causa-efeito entre as duas variáveis e, apenas que a  $ET_0$  estimada pelo método padrão PM tende a crescer à medida que a  $ET_0$  obtida pelos métodos estudados cresce.

O erro padrão da estimativa – EPE, Tabelas 2, 3, 4 e 5, encontrados na comparação entre os valores estimados da  $ET_0$  pelos métodos estudados e o método Penman-Monteith-FAO, mostrou que o método Hargreaves apresentou o menor erro, para todas as localidades estudadas sendo, 0,5764 mm  $d^{-1}$ , 0,5663 mm  $d^{-1}$ , 0,5457 mm  $d^{-1}$ , e 0,5716 mm  $d^{-1}$ , respectivamente para Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba, indicando menor desvio e melhor ajuste em relação ao método padrão PM.

Resultados semelhantes foram obtidos na bacia do Rio Jacupiranga, SP, por

(BORGES; MENDIONDO, 2007), em estudo de comparação de métodos de estimativa de  $ET_0$  com o método padrão PM onde o método HG apresentou o menor erro padrão da estimativa.

## **4.2 Análise de regressão, modelo linear sem intercepto**

### **4.2.1 Método de Hargreaves**

Mostra-se, nas Figuras 3, 4, 5 e 6 o ajuste do modelo linear sem intercepto, para os valores médios diários da  $ET_0$  estimado pelo método de Hargreaves comparado com o método padrão Penman-Monteith e as respectivas equações de ajuste e coeficiente de determinação para as quatro localidades estudadas.

Observa-se, nas Figuras 3, 4, 5 e 6 que a linha de regressão está próxima da reta  $y = x$  e o método HG subestimou a  $ET_0$  para os municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba em respectivamente 11,31%, 10,64%, 10,70% e 10,58%, em comparação ao método padrão PM. Os pares de pontos estão próximos, à linha de regressão, mostrando que o método estudado apresenta pequena dispersão em relação ao método padrão PM. O resultado da análise de regressão indicou ajuste eficiente para o método de Hargreaves na estimativa da  $ET_0$  em comparação com o método padrão PM para todas as localidades estudadas.

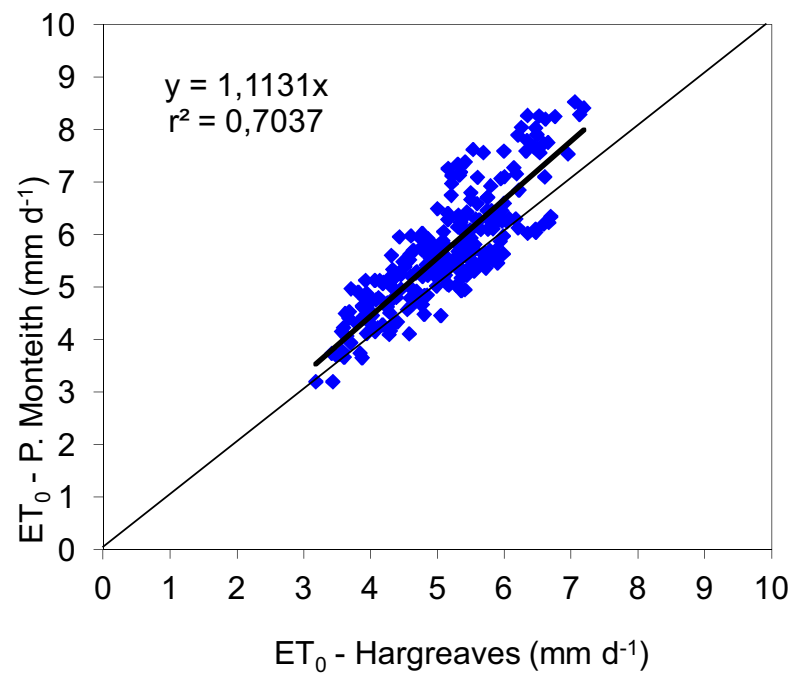


Figura 3. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Uberlândia-MG.

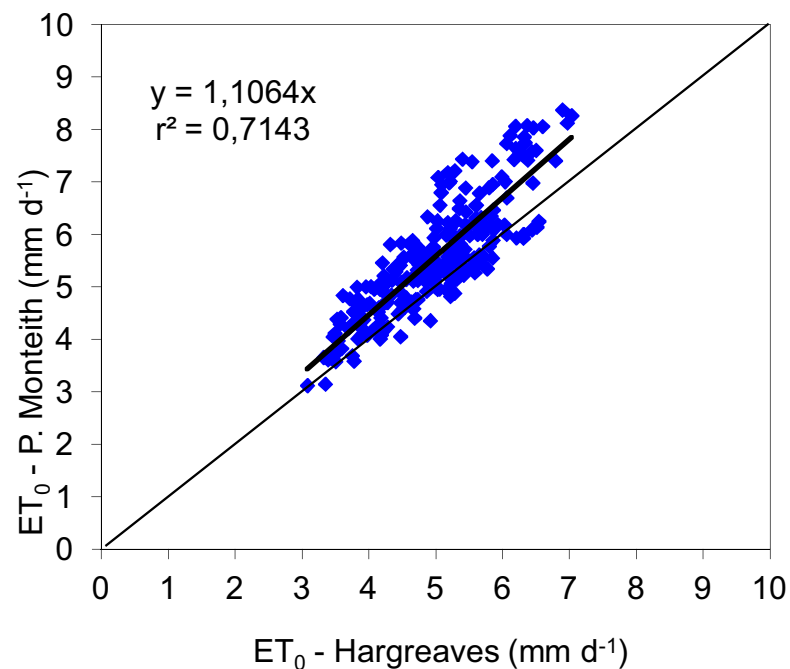


Figura 4. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Araxá-MG.

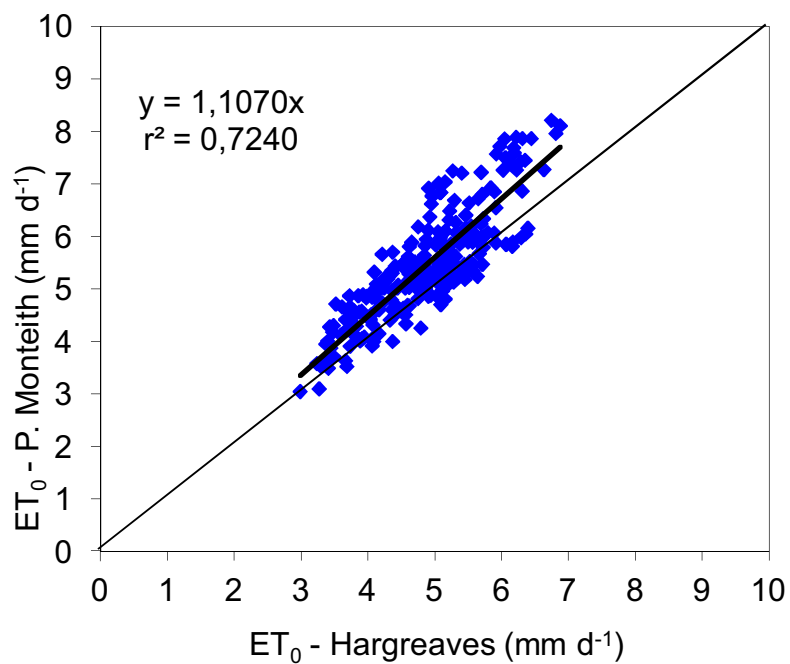


Figura 5. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Patrocínio-MG.

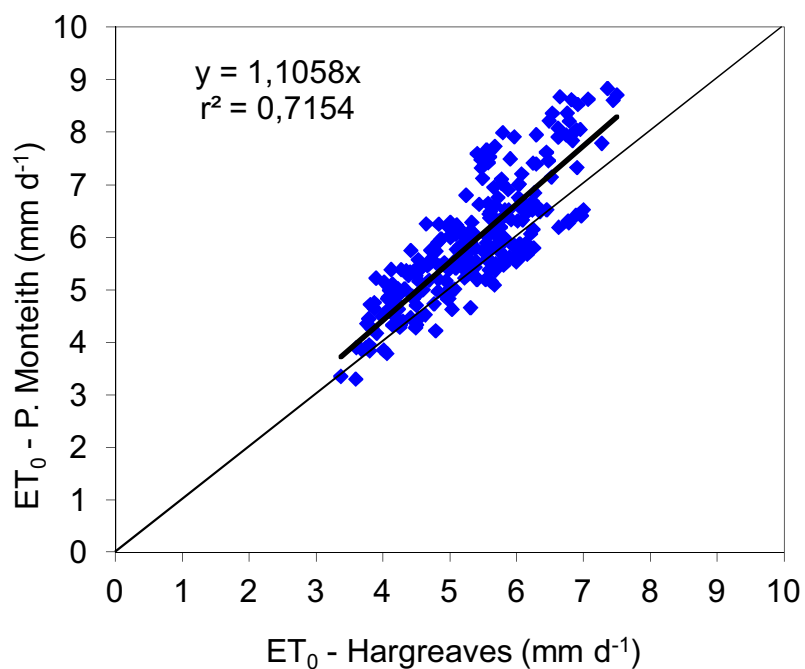


Figura 6. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos com o método HG, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG.

Tendência semelhante foi obtida por Sentelhas, Gillespie e Santos (2010), para doze localidades no sul de Ontário, Canadá, estudando métodos que utilizam, basicamente dados de temperatura, como Hargreaves, Thornthwaite e Priestley-Taylor, observando que os dois primeiros métodos foram as melhores opções para estimar a  $ET_0$ . Maeda, Wiberg e Pellikka (2011) também avaliaram a eficiência de métodos de estimativa da  $ET_0$  e verificaram que o método de Hargreaves foi o mais apropriado para as condições climáticas do sul do Quênia, na África. Borges e Mediondo (2007) verificaram a precisão de vários métodos, entre eles o método Hargreaves, para a bacia do Rio Jacupiranga, SP, os resultados obtidos indicaram que, na região, o método Hargreaves pode ser aplicado tanto na forma original como na formulação modificada.

#### **4.2.2 Método de Makkink**

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 nota-se que houve menor proximidade da  $ET_0$  estimada pelo método de Makkink em comparação com o método padrão PM e a linha de regressão está mais distante da linha 1:1, subestimando a  $ET_0$  em 38,94%, 38,84%, 37,57% e 39,70% respectivamente para Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba, em comparação ao método padrão PM. O ajuste da estimativa da  $ET_0$  para o método de Makkink em comparação com o método padrão PM é menos eficiente, para as quatro localidades estudadas.



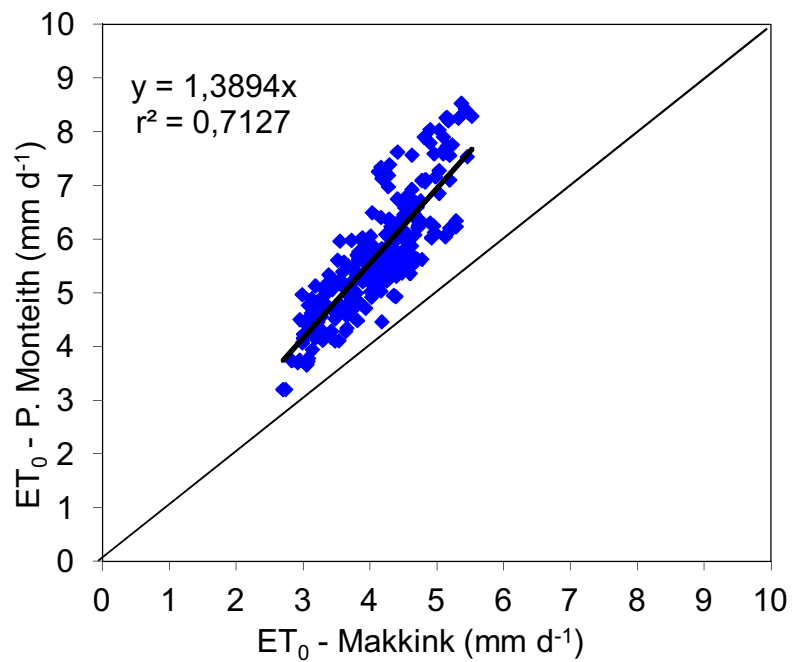


Figura 7. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Uberlândia-MG.

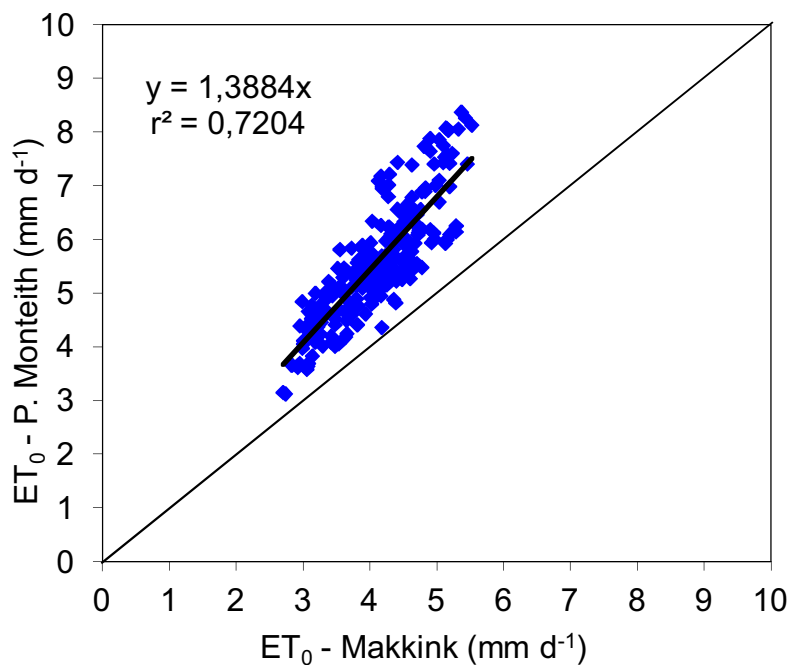


Figura 8. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Araxá-MG.

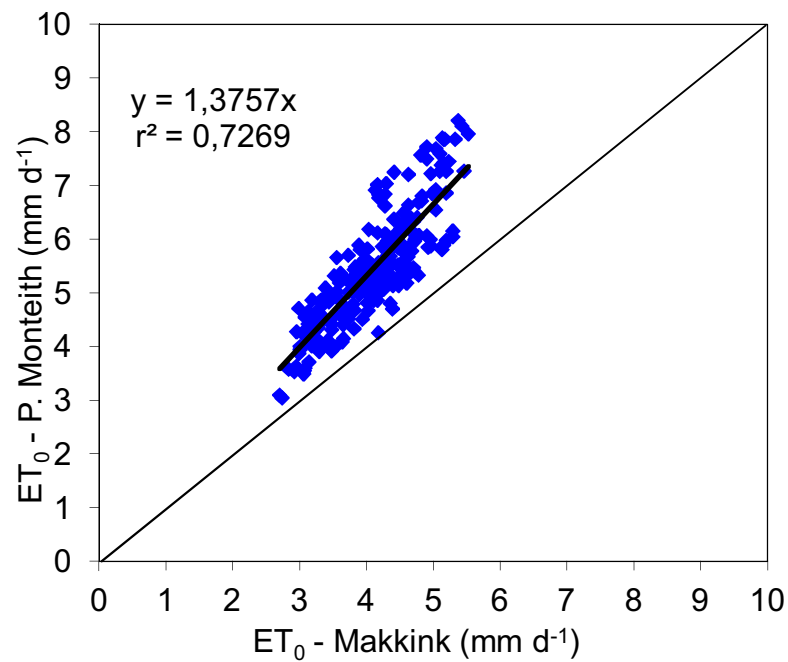


Figura 9. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Patrocínio-MG.

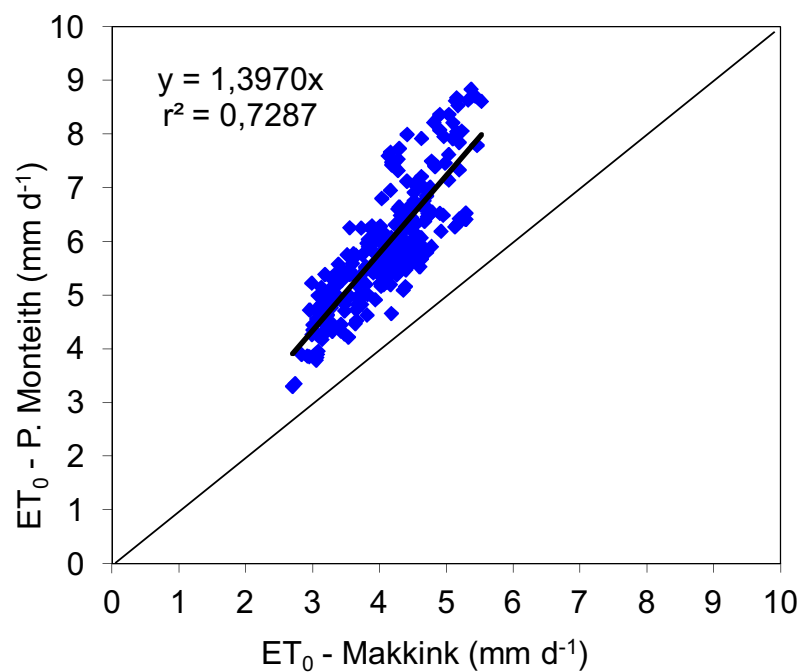


Figura 10. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método MK, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG.

Resultados similares foram obtidos por Pilau et al. (2012), em Frederico Westphalen e Palmeira das Missões no Rio Grande do Sul, onde o método MK subestimou a  $ET_0$  em relação ao método padrão na maioria dos meses do ano. Para a região de Araraquara, SP, Vescove e Turco (2005), comparando métodos de estimativa de  $ET_0$  observaram que o método de Makkink subestimou a  $ET_0$  em relação ao método padrão PM no período inverno-primavera, mais do que no período verão-outono. Nas condições climáticas do semiárido nordestino Cavalcante Júnior et al. (2011), ao avaliarem métodos de estimativa de  $ET_0$ , comparando com o método padrão PM observaram que o método Makkink subestimou a  $ET_0$  nos meses úmidos e secos, sendo a subestimava mais acentuada no período seco.

#### **4.2.3 Método de Radiação Solar**

Na estimativa da  $ET_0$  pelo método da Radiação Solar (Figuras 11, 12, 13 e 14), observa-se que a linha de regressão está próxima da reta  $y = x$  e o método RS superestimou a  $ET_0$  em 8,96%, 9,24%, 9,79% e 9,04% respectivamente para Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba em comparação ao método padrão PM. O método estudado apresentou precisão para Uberlândia de 62,80%, Araxá de 63,33%, Patrocínio de 63,72% e Ituiutaba de 62,37% em relação ao método padrão PM, mostrando grande dispersão dos pares de pontos. O ajuste da estimativa da  $ET_0$  para o método RS em comparação com o método padrão PM é pouco eficiente para todos os municípios estudados.

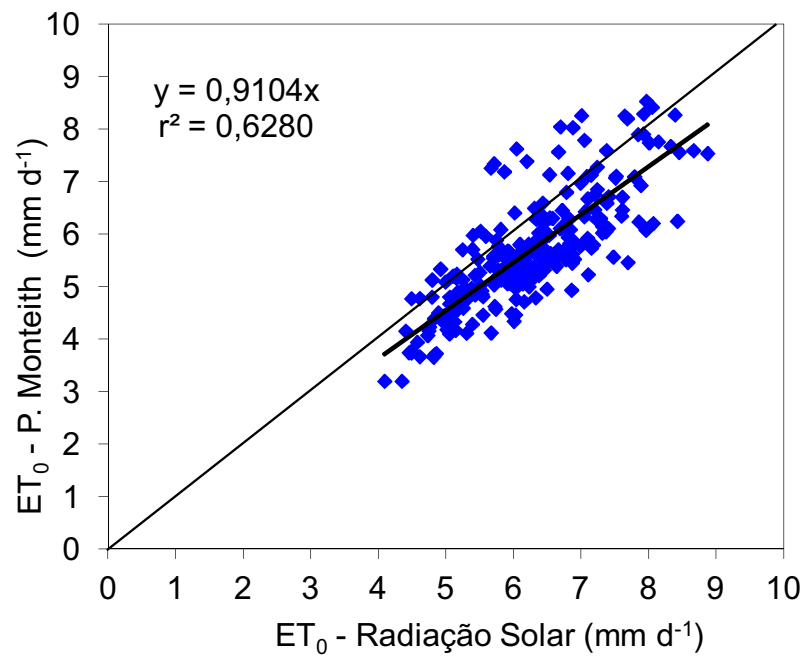


Figura 11. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Uberlândia-MG.

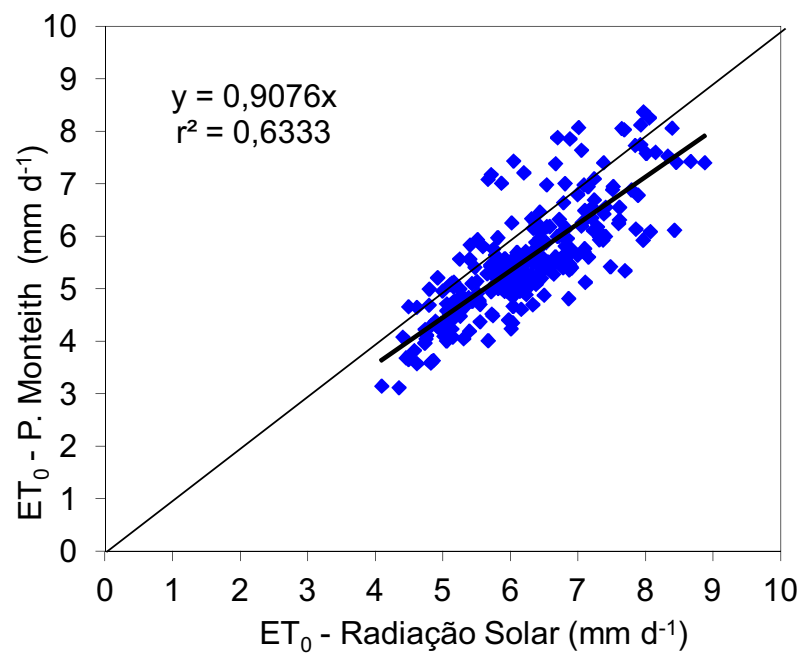


Figura 12. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Araxá-MG.

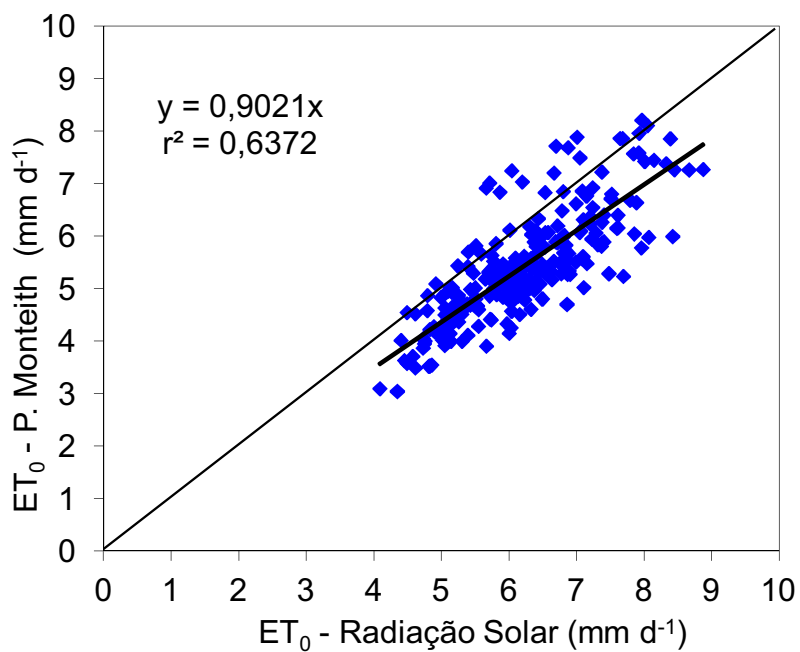


Figura 13. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Patrocínio-MG.

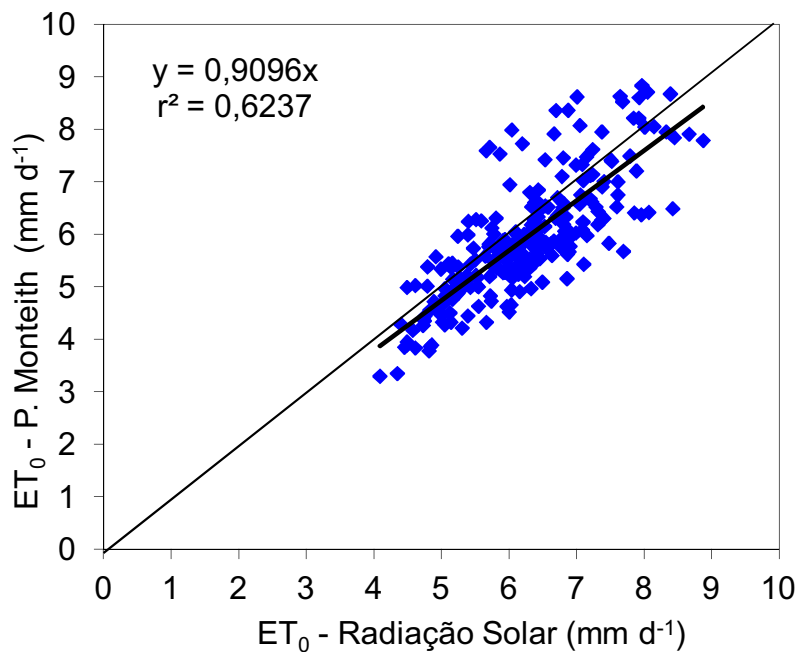


Figura 14. Valores médios diários da  $ET_0$  obtidos pelo método RS, no ano de 2010, em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG.

Tendência semelhante foi encontrada por Alencar et al. (2011) para três localidades do norte de Minas Gérias quando a estimativa feita pelo método RS superestimou a  $ET_0$  em relação ao método PM. Em Frederico Westphalen e Palmeira das Missões no Rio Grande do Sul (PILAU et al., 2012), observaram que o método RS superestimou a  $ET_0$  em relação ao método PM na maior parte do ano. Na avaliação de sete métodos de estimativa diária da  $ET_0$  para uma região semiárida da Espanha, na província de Albacete, López-Urrea et al. (2006) observaram que o método RS superestimou a  $ET_0$  obtida pelo método PM em 5% para condições de semiaridez. Para a região de Araraquara, SP, Vescove e Turco (2005), comparando métodos de estimativa da  $ET_0$  observaram que o método RS superestimou a  $ET_0$  para o período verão-outono mais do que para o inverno primavera.

Para os municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba localizados na mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba o resultado da avaliação dos métodos de estimativa da  $ET_0$  em comparação com o método padrão PM, utilizando a análise de regressão com o modelo linear sem intercepto, mostrou ajuste mais eficiente para o método Hargreaves seguido dos métodos de Makkink e Radiação Solar. A metodologia da análise de regressão não considera os erros da estimativa da  $ET_0$  devido à combinação dos erros das variáveis que entram nas equações de estimativa.

### 4.3 Métodos de estimativa da $ET_0$ considerando os erros

A metodologia de Vuolo (1996) permite obter, para cada  $\nu$ , um intervalo de confiança  $P = 98\%$ , para os valores de  $\chi_{\text{red}}^2$ .

Os valores do grau de liberdade ( $\nu$ ) no gráfico (Figura 15) vão até 160, entretanto, neste trabalho,  $\nu = 246$  para o município de Uberlândia,  $\nu = 245$  para o município de Araxá,  $\nu = 244$  para o município de Patrocínio e  $\nu = 243$  para o município de Ituiutaba.

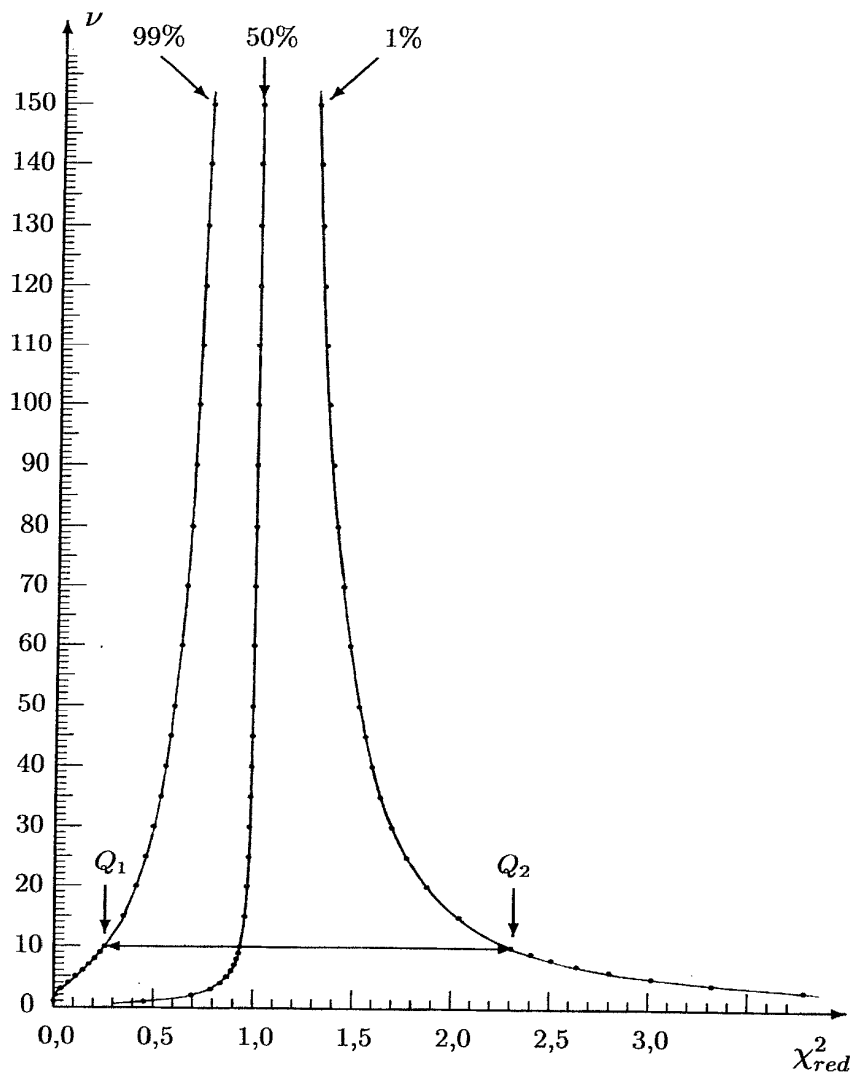


Figura 15. Gráfico que relaciona  $\nu$  com  $\chi^2_{red}$  (VUOLO, 1996).

Foram feitos os seguintes procedimentos para determinar o  $\chi^2_{red}$  (1% e 99%).

PROGRAMA MICROSOFT EXCEL / FUNÇÃO ESTATÍSTICA / INV.QUI para  $\nu = 246$ , para  $\nu = 245$ , para  $\nu = 244$  e para  $\nu = 243$  (Tabela 6).

Tabela 6. Determinação dos valores de  $\chi^2$  e  $\chi_{red}^2$  para os municípios estudados

Município	$\nu$	$\chi^2_{0,01}$	$\chi_{red}^2_{0,01}$	$\chi^2_{0,99}$	$\chi_{red}^2_{0,99}$
Uberlândia	246	197,29	0,802	352,03	1,431
Araxá	245	197,47	0,806	351,82	1,436
Patrocínio	244	197,40	0,809	348,68	1,429
Ituiutaba	243	197,32	0,812	342,39	1,409

Pode-se afirmar com 98% de confiança que:  $0,802 < \chi_{red}^2 < 1,431$  para o município de Uberlândia.

Pode-se afirmar com 98% de confiança que:  $0,806 < \chi_{red}^2 < 1,436$  para o município de Araxá.

Pode-se afirmar com 98% de confiança que:  $0,809 < \chi_{red}^2 < 1,429$  para o município de Patrocínio.

Pode-se afirmar com 98% de confiança que:  $0,812 < \chi_{red}^2 < 1,409$  para o município de Ituiutaba.

Considerando os erros associados a  $ET_0$  em função da utilização de instrumentos de medida, utilizou-se a técnica de determinação de erros de Turco et al. (1994). Com a utilização desta técnica determinou-se o desvio padrão (erro) diário associado à estimativa da  $ET_0$  pelo método PM, no período de janeiro a dezembro de 2010. Da mesma forma, foram obtidos os desvios padrão diários ( $\pm\Delta ET_0MK$ ,  $\pm\Delta ET_0HG$ ,  $\pm\Delta ET_0RS$ ) associados às estimativas da  $ET_0$  pelos métodos, MK, HG e RS. Por meio dos desvios padrão obtidos foi aplicada a metodologia de Vuolo (1996), para avaliação dos métodos de estimativa da  $ET_0$  estudados em relação ao método padrão PM.



### 4.3.1 Método de Hargreaves

Nas Figuras 16, 17, 18 e 19 mostram-se as retas  $y = ax$  ajustadas aos pontos experimentais, obtidos diariamente pelos métodos estudados, em relação ao método padrão PM e respectivas incertezas, para os municípios de Uberlândia, Araxá, Patrocínio e Ituiutaba.

No ajuste da reta das Figuras 16, 17, 18 e 19, correlação entre os valores diários da  $ET_0$  obtidos pelo método HG em relação ao método PM,  $\nu = 246$  e  $\chi_{red}^2 = 0,901$  para o município de Uberlândia,  $\nu = 245$  e  $\chi_{red}^2 = 0,887$  para o município de Araxá,  $\nu = 244$  e  $\chi_{red}^2 = 0,872$  para o município de Patrocínio e  $\nu = 243$  e  $\chi_{red}^2 = 0,939$  para o município de Ituiutaba. Observa-se, na Figura 15, que os valores de  $\chi_{red}^2$  estão dentro das faixas de valores aceitáveis para  $\chi_{red}^2$  e os ajustes podem ser considerados bons. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos Penman-Monteith e Hargreaves não são distintos, portanto, podem ser comparados.

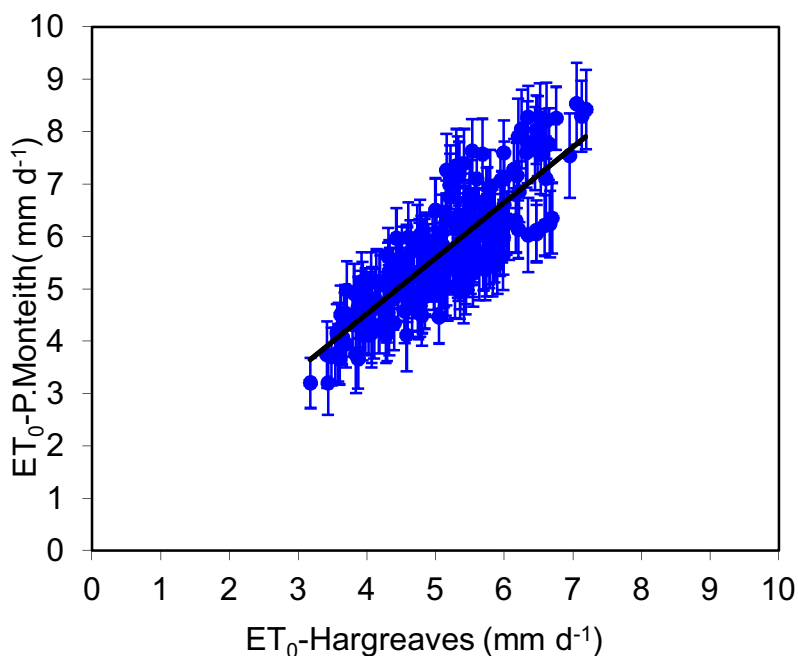


Figura 16. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Uberlândia–MG.

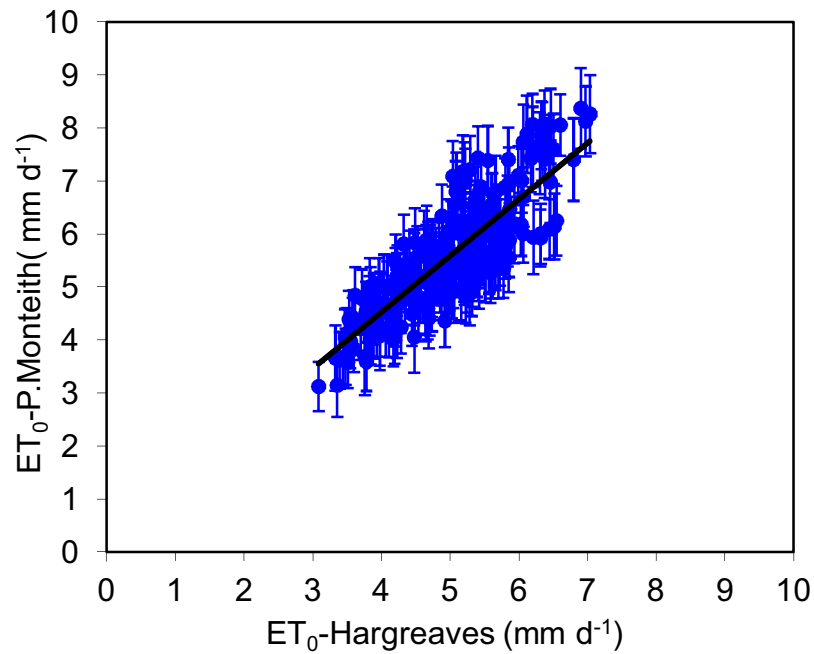


Figura 17. Retas  $y = ax$  ajustadas aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Araxá-MG.

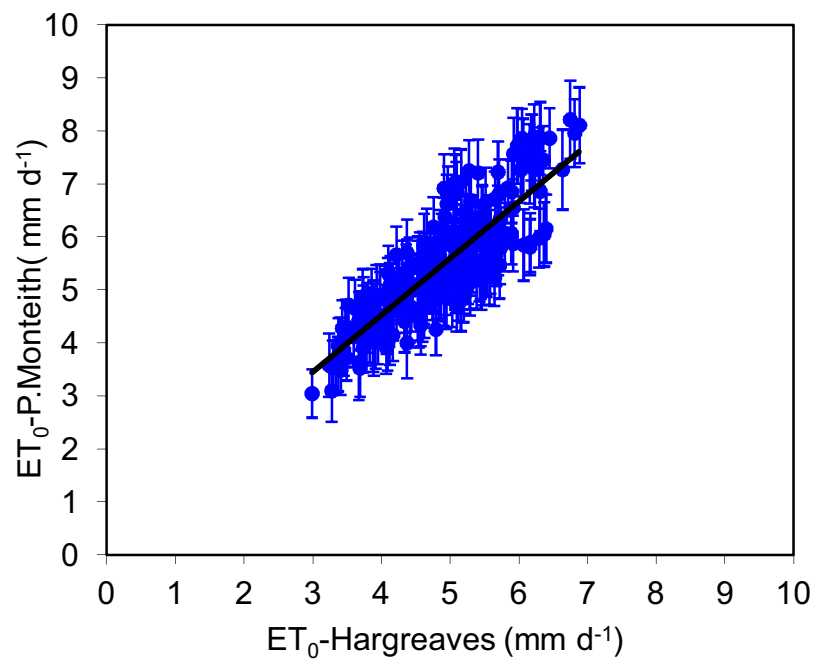


Figura 18. Retas  $y = ax$  ajustadas aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Patrocínio-MG.

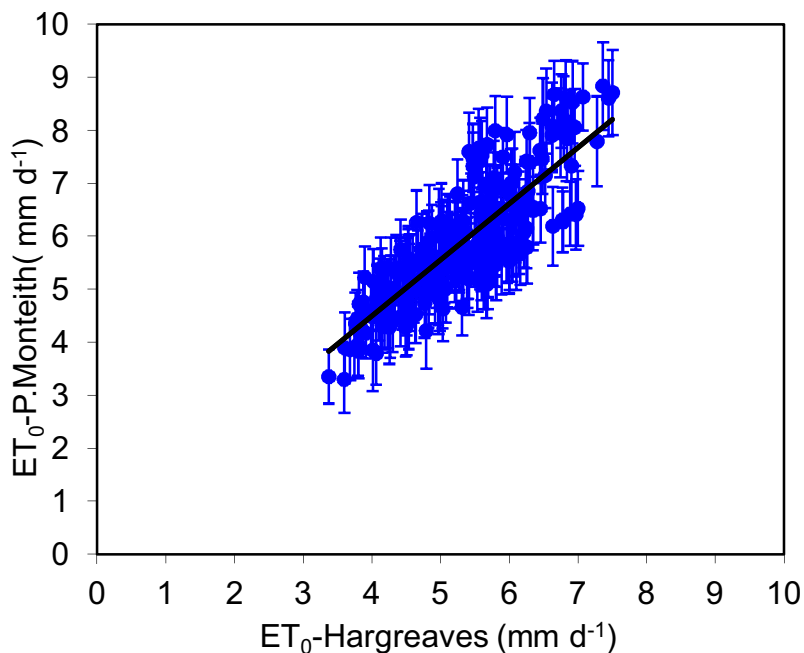


Figura 19. Retas  $y = ax$  ajustadas aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método HG em relação ao método PM, para Ituiutaba–MG.

#### 4.3.2 Método de Makkink

A correlação entre os valores diários da  $ET_0$  obtidos pelo método MK em relação ao método PM, no ajuste da reta das Figuras 20, 21, 22 e 23,  $\nu = 246$  e  $\chi_{\text{red}}^2 = 1,038$  para o município de Uberlândia,  $\nu = 245$  e  $\chi_{\text{red}}^2 = 1,111$  para o município de Araxá,  $\nu = 244$  e  $\chi_{\text{red}}^2 = 1,234$  para o município de Patrocínio e  $\nu = 243$  e  $\chi_{\text{red}}^2 = 1,322$  para o município de Ituiutaba. Observa-se, na Figura 15, que os valores de  $\chi_{\text{red}}^2$  estão dentro da faixa de valores aceitáveis para  $\chi_{\text{red}}^2$  e os ajustes podem ser considerados. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos Penman-Monteith e Makkink não são distintos, portanto, podem ser comparados.

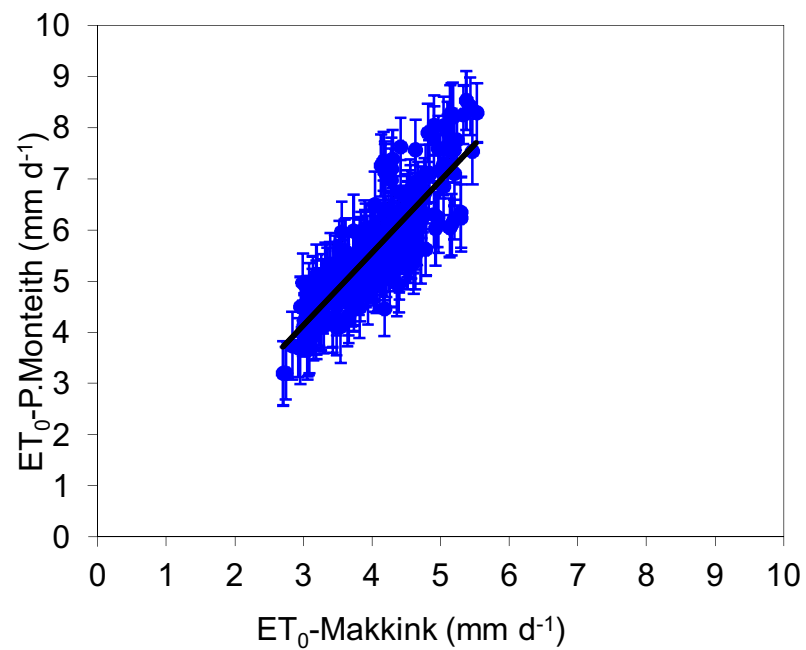


Figura 20. Retas  $y = ax$  ajustadas aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Uberlândia-MG.

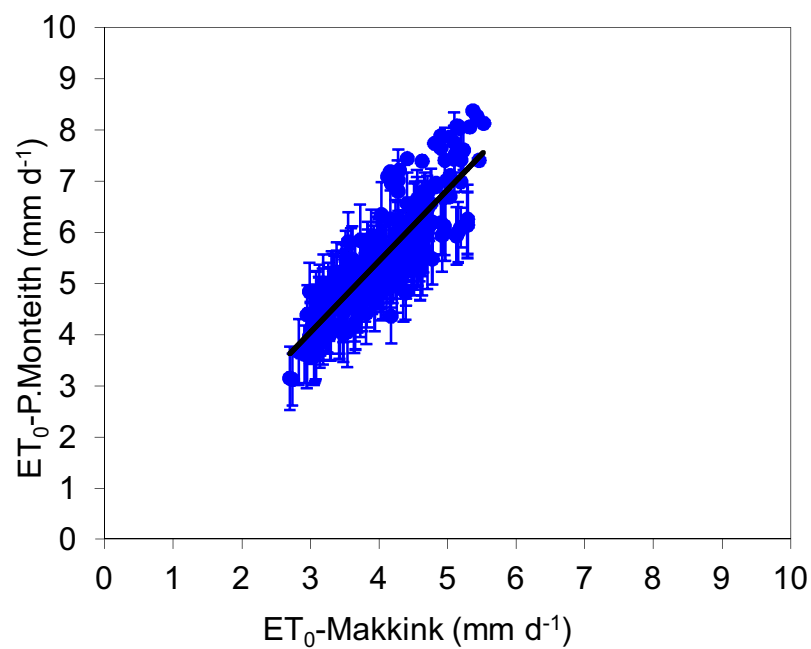


Figura 21. Retas  $y = ax$  ajustadas aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Araxá-MG.

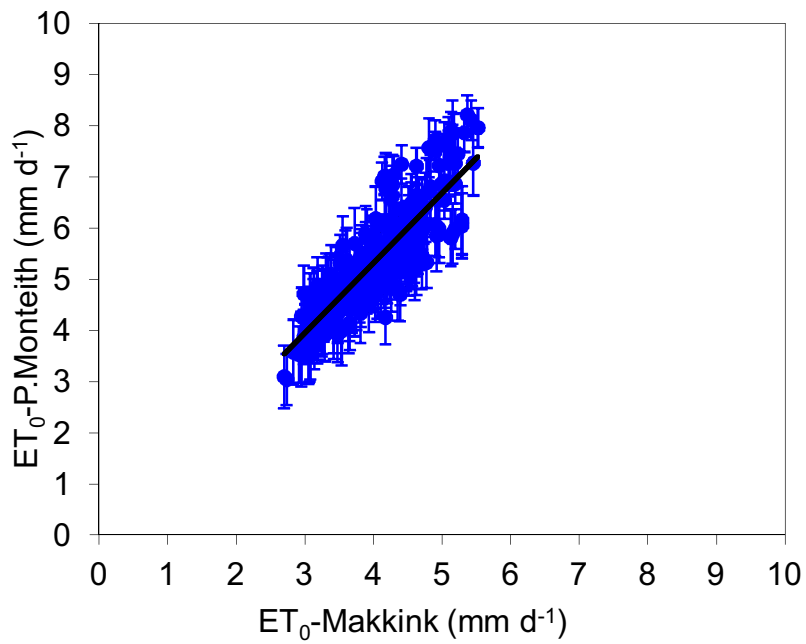


Figura 22. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Patrocínio–MG.

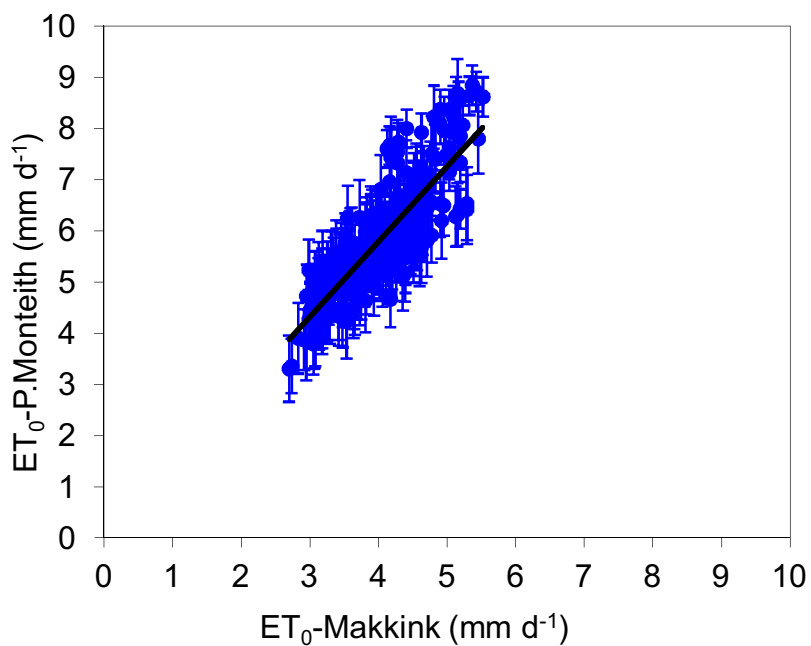


Figura 23. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método MK em relação ao método PM, para Ituiutaba–MG.

### 4.3.3 Método de Radiação Solar

No ajuste da reta das Figuras 24, 25, 26 e 27, correlação entre os valores diários da  $ET_0$  obtidos pelo método da Radiação Solar em relação ao método de Penman-Monteith,  $\nu = 246$  e  $\chi_{red}^2 = 0,161$  para o município de Uberlândia,  $\nu = 245$  e  $\chi_{red}^2 = 0,154$  para o município de Araxá,  $\nu = 244$  e  $\chi_{red}^2 = 0,148$  para o município de Patrocínio e  $\nu = 243$  e  $\chi_{red}^2 = 0,173$  para o município de Ituiutaba. Esses valores de  $\chi_{red}^2$  estão fora da faixa de valores aceitáveis para  $\chi_{red}^2$  (Figura 15), indicando que o ajuste é ruim. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e Radiação Solar são distintos, portanto, não podem ser comparados.

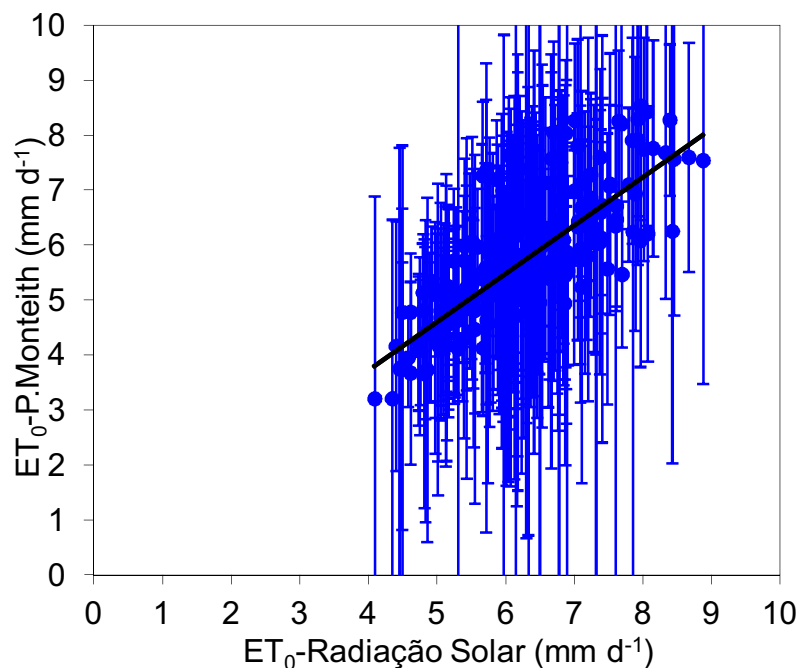


Figura 24. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Uberlândia–MG.

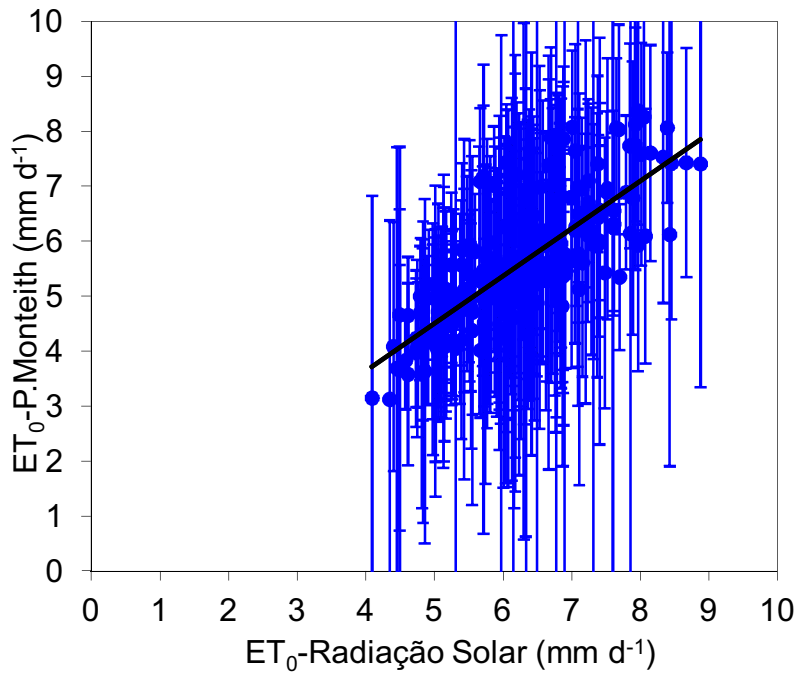


Figura 25. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Araxá-MG.

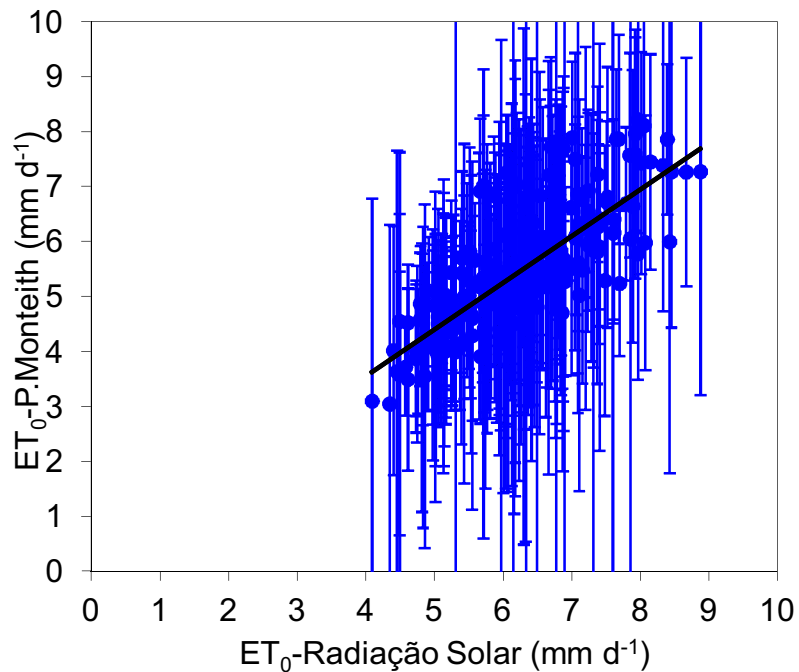


Figura 26. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Patrocínio-MG.

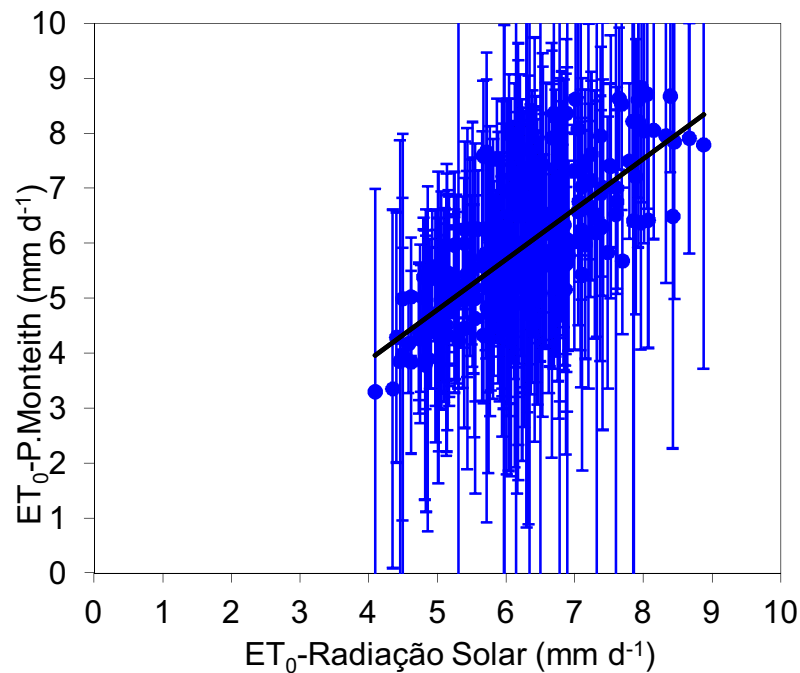


Figura 27. Reta  $y = ax$  ajustada aos pontos experimentais e respectivas incertezas, com o método RS em relação ao método PM, para Ituiutaba-MG.

Resultados similares foram encontrados por Turco, Perecin e Pinto Júnior (2008) na avaliação de métodos de estimativa da  $ET_0$  para Jaboticabal, SP, considerando os erros da  $ET_0$  devido à utilização de instrumentos de medida. Sendo que o melhor ajuste foi para a estimativa da  $ET_0$  com o método de Hargreaves em comparação ao método padrão PM. O método de Radiação Solar é diferente de Penman-Monteith e, não pode ser comparado com o método padrão PM. Pois, aplicando a metodologia de análise dos dados, considerando os erros da  $ET_0$  não se estabeleceu uma relação linear entre este método e o método padrão PM, não podendo ser comparados.



## 5 CONCLUSÕES

O método de Hargreaves apresentou melhor ajuste para estimativa da  $ET_0$  seguido pelo método de Makkink, considerando a análise de regressão e a metodologia que verifica a influência do desvio padrão diário da  $ET_0$ .

Os métodos de Hargreaves e Makkink podem ser utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência na região, uma vez que seus resultados apresentam correlação com o método padrão Penman-Monteith.

A influência do desvio padrão (erros) diários da  $ET_0$  na comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, mostrou que o método da Radiação Solar e o método padrão Penman-Monteith não podem ser comparados.

## 6 REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. **Geomorfologia**, São Paulo, v. 20, p. 1-26, 1970.

ADEBOYE, O. B.; OSUNBITAN, J. A.; ADEKALU, K. O.; OKUNDE, D. A. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration using complete and limited data, application to Nigeria. **Agricultural Engineering International**, Beijing, v. 11, n. 1, p. 1-25, 2009.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.19, n. 5, p. 437-449, 2011.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

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

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estúdio FAO Riego y Drenaje Paper, 56).

ALMEIDA, H. A.; SOUZA, J. A.; ALCÂNTARA, H. M. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 58-66, 2008.

ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MARTINS, C. A. S.; BARBOSA, V. S.; RODRIGUES, R. R. Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 2, p. 84-85, 2011.

ARAÚJO, W. F.; COSTA, A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativas da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para Boa Vista – RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.

BACK, A. J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 139-145, 2007.

BARROS, V. R.; SOUZA, A.P.; FONSECA, D.C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BAUSCH, W. C. Sensor height effects on calculated reference evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, p. 791-798, 1990.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM- Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BONOMO, R. **Análise da Irrigação na cafeicultura em áreas de cerrado de Minas Gerais**. 1999. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n. 12, p. 163-213, 1962.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CAVALCANTE JÚNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para condições do Semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrícolas**, Londrina, v. 32, p. 1699-1708, 2011. Suplemento 1.

CHAUHAN, S.; SHRIVASTAVA, R. K. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. **Water Resource Management**, New York, v. 23, n. 5, p. 825-837, 2009.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 619-626, 2010.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

CUENCA, R. H.; NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York, v. 108, n. 1, p. 13-23, 1982.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos obtidos em estações meteorológicas convencional e automática em Botucatu, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 103-111, 2004.

DANTAS NETO, F. S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró – RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 7, n. 1, p. 46-55, 1999.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de levantamento e Conservação dos Solos. **Levantamento e reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro, 1982. 526 p. (Boletim de Pesquisa, 1).

ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; KHABBA, S.; SIMONNEAUX, V.; JARLAN, L.; OULDBBA, A.; RODRIGUEZ, J. C.; ALLEN, R. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? **Journal of Arid Environments**, Amsterdam, v. 74, n. 12, p. 1587-1596, 2010.

FARIA, F. J.; CARVALHO, D. F.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, M. A. A. Influência do método de estimativa na demanda de irrigação suplementar para o milho (*Zea mays L.*), na bacia do rio Verde Grande –MG. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, p. 187-196, 2000.

FERNANDES, E. J. **Determinação da evapotranspiração real pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado**. 2001. 125 f. Tese (de Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

FERREIRA, R. J. F. Atuação do Polocentro e o desenvolvimento regional. In:\_\_\_\_\_. **Ocupação do Cerrado – Alguns Aspectos do Polocentro**. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2005, p. 3-17.

FOLHES, M.T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 10, p. 1398-1408, 2009.

FOOLADMAND, H.R.; AHMADI, S.H. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly  $ET_0$  in south of Iran. **Irrigation and Drainage**, Sidney, v. 58, n. 2, p. 234-245, 2009.

FRANÇA NETO, A.C.; MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R.; VIEIRA, G. H. S.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G. Comparação entre métodos simplificados de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para regiões produtoras de café brasileiras. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 159-171, 2011.

GALVANI, E. **Avaliação agrometeorológica do cultivo de pepino (*Cucumis sativus L.*) em ambientes protegidos e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão.** 2001. 124 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R.G. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on Penman-Monteith reference ET estimates in semiarid regions. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, v. 89, n. 3, p. 275-286, 2007.

GAVILÁN, P.; ESTÉVEZ, J.; BERENGENA, J. Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in southern Spain. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 134, n. 1, p. 1-12, 2008.

HARGREAVES, G.H.; **Climate and irrigation requirements for Brazil.** Logan, Utah State University, 1976. 44 p.

HSIAO, T. C.; STEDUTO, P.; FERERES, E. A. Systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. **Irrigation Science**, Sidney, v. 25, n. 3, p. 209-231, 2007.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Rede de estações meteorológicas automáticas.** Brasília, DF, 2011. 11 p. (Nota Técnica, 1).

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.

JENSEN, M. E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements.** New York: ASCE, 1973. p. 100-115.

KHOOB, A. R. Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 3, p. 253-259, 2008.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, Hoboken, v. 19, n. 3, p. 707-713, jun. 2005.

KUMAR, M.; BANDYOPADHYAY, A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Comparative study of conventional and artificial neural network-based estimation models. **Irrigation Science**, Sidney, v. 26, n. 6, p. 531-545, 2008.

KUMAR, M.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. **Irrigation Science**, Sidney, v. 29, n. 1, p. 11-25, 2010.

LANDERAS, G.; ORTIZ-BARRETO, A.; LÓPEZ, J.J. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 5, p. 553-565, 2008.

LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, n. 2, p. 298-306, 2010.

LÓPEZ-URREA, R.; MARTIN, S.O.F.; FABEIRO, C.; MORATALIA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a Semiarid Climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, n. 1, p. 15-26, 2006.

MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 193-197, 2000.

MAEDA, E. E.; WIBERG, D. A.; PELLIKKA, P. K. E. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. **Applied Geography**, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 251-258, 2011.

MAKKINK, G. H. Ekzameno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957.

MELLO, J. P. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO**. 1998. 79 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, MG, Viçosa, 1998.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MOHAWESH, O. E. Spatio-temporal calibration of Blaney-Criddle Equation in Arid and Semiarid environment. **Water Resources Management**, Amsterdam, v. 24, n. 10, p. 2187-2201, 2010.

NISHIYAMA, L. **Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análises e avaliações ambientais do meio físico, em escala 1:100.000**: aplicação no município de Uberlândia - MG. 1998. 135 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, A. D. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência utilizando dados de estação meteorológica convencional e automática**. 2003. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; CAVALCANTI JÚNIOR, E. G.; SOBRINHO, J. E.; VIEIRA, R. Y. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Jaboticabal – SP. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; SANTOS, F. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENGA, R.H. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, Sidney, v. 28, n.1, p. 1-13, 2009.

PEREIRA, A. R.; MANIERO, M. A.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. p. 17-47.

PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira – MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009.



PERES, J. G.; SCARDUA, R. Estudos de métodos agroclimatológicos para estimativa da evapotranspiração potencial de referência ( $ET_0$ ), segundo DOORENBOS & PRUITT. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 2, n. 2, p. 46-63, 1991.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 2, p. 283-290, 2012.

REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEZZOPANE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, Chile, v. 25, n. 3, p. 75-84, 2007.

SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; ANDRADE, M. J. B.; BRAGA, J. C.; GERVÁCIO, G. G. Coeficiente de cultura e análise do rendimento do feijoeiro sob regime de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 92-112, 2008.

SANTIAGO, A. V.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith-FAO nas escalas mensal e decenal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 57-66, 2002.

SANTOS, C.; LORITE, I. J.; TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; FERERES, E. Performance of an irrigation scheme using indicators determined with remote sensing techniques. **Irrigation Science**, New York, n. 28, p. 461-477, 2010.

SCARPARE, F. V.; OLIVEIRA, G. X. S.; SIMON, J.; PIEDADE, S. M. S.; ANGELOCCI, L. R. Comparação da uniformidade de dados meteorológicos de estação meteorológica convencional e automática – Piracicaba/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14. 2006. Florianópolis – SC, **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico. Lavras: UFLA, 2008. p. 89-102.

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

SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidades de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS, 1998, 181 p. Curso de especialização por tutoria à distância.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontário, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SENTELHAS, P. C.; MORAIS, S. O.; PIEDADE, S. M. S.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2008.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, K. M. G.; CARVALHO, L. G.; EVANGELHISTA, A. W. P. Estimate of reference evapotranspiration by FAO Penman-Monteith equation only having maximum and minimum temperatures in Lavras, Minas Gerais State, Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37, Foz do Iguaçu. 2008. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2008. 1 CD-ROM.

SILVA, V. P. R.; BELO, A. F.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.

SILVA, W. S.; GUIMARÃES, E. C.; TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba – MG. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 3, p. 665-674, 2003.

SULEIMAN, A. A.; HOOGENBOOM, G. Comparison of ASCE and FAO-56 reference evapotranspiration for a 15-min time step in humid climate conditions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 375, n. 3, p. 326-333, 2009.

TABARI, H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 24, n. 10, p. 2311-2337, 2010.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.; ROCHA, F.; SANTOS, L. Estudo Comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis- BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TANNER, B. D. Automated weather stations. **Remote Sensing Reviews**, Harwood, v. 5, n. 1, p. 73-98, 1990.

TANNER, C. B.; JURY, W. A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 2, p. 239-242, 1976.

THORNTHWAITTE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**: publications in climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Comparison of simplified pan-based equations for estimating reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 136, n. 2, p. 137-140, 2010.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 23, n. 14, p. 3057-3067, 2009.

TURCO, J. E. P.; FARIA, M. T.; FERNANDES, E. J. Influência da forma de obtenção do saldo de radiação na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 3, p. 215-228, 2005.

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JÚNIOR, D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 63-80, 2008.

TURCO, J. E. P.; PINOTTI, J. R.; PAVANI, L. C.; FERNANDES, E. J. Técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Engenharia Agrícola**, Joticabal, v. 14, p. 31-37, 1994.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara – SP. **Engenharia Agrícola**, Joticabal, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2005.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e Evapotranspiração. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH editora UFRJ, 1989. p. 97-145.

VUOLO, J. E. **Fundamentos da teoria de erros**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. p. 160-163, 176, 192-197.

WMO. **Automatic weather stations**. Geneva: World Meteorological Organization. 1967. 364 p. Technical Note, n. 82.

XU, C. Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 18, p. 3717-3734, 2005.

YIN, Y.; WU, S.; ZHENG, D.; YANG, Q. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 1, p. 77-84, 2008.

YODER, R. E. ; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.