

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DETERMINAÇÃO DA ACURÁCIA DE INSTRUMENTOS DE
MEDIDAS PARA OBTER A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA COM ERROS FIXADOS**

Sandra Maria Sousa de Oliveira
Licenciatura em Matemática

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
AGOSTO DE 2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DETERMINAÇÃO DA ACURÁCIA DE INSTRUMENTOS DE
MEDIDAS PARA OBTER A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA COM ERROS FIXADOS**

Sandra Maria Sousa de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo).

**JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
AGOSTO DE 2011**

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

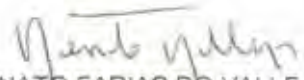
TÍTULO: DETERMINAÇÃO DA ACURÁCIA DE INSTRUMENTOS DE MEDIDAS PARA OBTER A
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM ERROS FIXADOS

AUTORA: SANDRA MARIA SOUSA DE OLIVEIRA

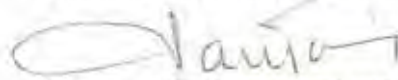
ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO

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. JOSE CARLOS SARTORI
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade de São Paulo / São Carlos/SP


Prof. Dr. LUIZ CARLOS PAVANI
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ADHEMAR PITELLI MILANI
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 10 de agosto de 2011

“Não teríamos ultrapassado o nível de pura adaptação ao mundo se não tivéssemos alcançado a possibilidade de, pensando a própria adaptação, nos servir dela para programar a transformação.”

Paulo Freire

\

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

SANDRA MARIA SOUSA DE OLIVEIRA - nascida em 30 de maio de 1954 na cidade de Conceição das Alagoas - MG. Filha de Atair José de Sousa e Natália Bessa de Sousa, casada com Marco Antônio de Oliveira, tendo três filhos: Rogério Sousa de Oliveira, Ronaldo Sousa de Oliveira e Maira Sousa de Oliveira e, duas netas Maria Clara Maciel de Oliveira e Júlia Maranhão de Oliveira. Iniciou seus estudos na Escola Rural José Bento de Sousa na Fazenda São José do Capão da Onça, em 1962. Concluiu o Curso Técnico em Magistério em janeiro de 1972, pela Escola Estadual Imaculada Conceição em Conceição das Alagoas - MG. Licenciada em Matemática pela Faculdade de Filosofia Ciências e Letras "Santo Tomaz de Aquino" na cidade de Uberaba-MG em 1976, em Supervisão escolar, pelas Faculdades Claretianas José Olímpio de Batatais-SP, em 1984 e Administração Escolar pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ituverava-SP em 1991. Especializou-se em Metodologia do Ensino da Matemática pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras José Olímpio de Batatais, SP em 1988. Obteve o título de Mestre em Educação Agrícola pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 2005. Atua como docente efetivo no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM) desde 1996 até a presente data. Foi funcionária pública da rede municipal de Ensino de Uberaba de 1993 a 2007. Fez parte da Equipe Pedagógica da Secretaria Municipal de Educação, de 1989 a 2000, exercendo o cargo de Diretora de Departamento Pedagógico durante seis anos. Atuou como Diretora Geral da Secretaria Municipal de Educação de Uberaba em 2005 e, em 2006 assumiu a Subsecretaria de Educação. De 2007 a 2008 assumiu a Diretoria de Desenvolvimento Educacional do CEFET- Uberaba e, de 2009 a 2010, a Pró Reitoria de Ensino do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro.

Dedico

A DEUS, que guiou meus passos para a conquista de mais esta etapa.

Aos meus filhos Rogério, Ronaldo, Maira, minhas noras Cinthia e Sicília e netas Maria Clara e Júlia por ser a minha inspiração.

Ao meu esposo Marco Antônio pelo incentivo e compreensão nesta caminhada.

Ao meu pai Atair e minha mãe Natália pela dedicação, dignidade, ensinamentos e, ser a luz do meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre lutaram arduamente para minha formação, dando-me como exemplo o amor ao próximo e respeito pelos direitos humanos.

Aos meus irmãos, Regina, Lena, Renato e Célio pela amizade, companheirismo e incentivo souberam me ajudar e me guiar para as melhores escolhas.

Aos meus sobrinhos pela amizade, sugestões, estímulos constantes e ajuda durante a elaboração desta tese.

Aos amigos e companheiros do curso, por cada sorriso, cada dica e incentivo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus Jaboticabal - UNESP, pela oportunidade oferecida para a realização deste curso.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), que nos apoiou, uma vez que tem como missão promover a construção, divulgação e aplicação de conhecimentos nas mais diversas áreas.

À coordenação do Programa de Pós Graduação pela atenção e conselhos durante o desenvolvimento do curso.

À CAPES pelo incentivo financeiro para a realização deste projeto.

Ao Professor Dr. José Eduardo Pitelli Turco, que acreditou na minha proposta de trabalho aceitando orientar-me com atenção, paciência, dedicação e amizade;

Aos Professores da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias /UNESP - Jaboticabal, Dr. Luiz Carlos Pavani, Dr. João Antonio Galbiati, Dr. José Eduardo P. Turco, Dr. José Carlos Barbosa, Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, Dra. Teresa Cristrina Tarlé Pissarra, Dr Manoel Evaristo Ferreira, Dr. Ely Nahas, este trabalho leva um pouco de cada um de vocês.

Às amigas Maria Amélia e Vera Abdala pela amizade, sugestões, estímulos constantes e revisão desta tese.

Aos Colegas do IFTM, Prof. M. Sc. Paulo Victorio Biulchi, Prof. Dr. Othon Carlos da Cruz, Prof. M. Sc. Olegário Pinheiro de Souza, Prof. Dr. Paulo Roberto Ribeiro e Prof. Dr. Juvenal Caetano de Barcelos pelo apoio, sugestões apresentadas e agradável convivência.

Aos colegas de Pró Reitoria de Ensino do IFTM Tânia Mára, Luciana, Márcia de Freitas, Ana Maria, Raquel, Lívia, Magali, Vicente e Gabriel que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Às minhas netas Maria Clara e Júlia que souberam dividir comigo o tempo, mesmo que às vezes revoltadas, deletando meus trabalhos.

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

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Renato Farias do Valle Junior, Prof. Dr. José Carlos Sartori, Prof. Dr. Luiz Carlos Pavani e Prof. Dr. Adhemar Pitelli Milani pelas sugestões importantes à melhoria desta tese.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	I
RESUMO	III
SUMMARY	IV
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	4
2.1.1 Método de Penman Monteith (PM)	6
2.1.2 Método da Radiação Solar (RS)	7
2.1.3 Método de Hargreaves (HG)	9
2.2 OTIMIZAÇÃO DA IRRIGAÇÃO	11
III. MATERIAL E MÉTODO	13
3.1 CONSIDERAÇÕES CLIMÁTICAS E GEOGRÁFICAS DA REGIÃO DE UBERABA, MG	13
3.1.1 Localização e Caracterização Climática	13
3.1.2 Topografia	14
3.1.3 Hidrografia	14
3.1.4 Solo e Cobertura vegetal	14
3.2 ADEQUAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ET_o	15
3.2.1 Método de Hargreaves (HG)	16
3.2.2 Método da Radiação Solar (RS)	17
3.2.3 Método do Penman-Monteith	19
3.3 TÉCNICA PARA DETERMINAÇÃO DE ERROS	22
3.3.1 APLICAÇÃO DA TÉCNICA PARA DETERMINAÇÃO DE ERROS NOS MÉTODOS DE HARGREAVES, RADIAÇÃO SOLAR E PENMAN-MONTEITH	24
IV. RESULTADOS	25
4.1 APLICAÇÃO NO MÉTODO DE HARGREAVES (HG)	25
4.2 APLICAÇÃO NO MÉTODO DA RADIAÇÃO SOLAR (RS)	27
4.3 APLICAÇÃO NO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (PM-FAO)	30
V. DISCUSSÃO	33
5.1 MÉTODO DE HARGREAVES (HG)	33
5.2 MÉTODO DA RADIAÇÃO SOLAR (RS)	33
5.3 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (PM-FAO 56)	34
VI. CONCLUSÕES	35
VII. REFÊRENCIAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Perspectiva da área em estudo.	17
----------	--------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores da constante C para cálculo de $ET_o = C W Q$, segundo DOORENBOS & KASSAM(1979).	17
Tabela 2.	Valores do fator de ponderação (W) para o efeito de radiação solar sobre ET_o a diferentes temperaturas e altitudes, segundo DOORENBOS & KASSAM(1979).	18
Tabela 3.	Acurácia dos instrumentos de medidas da temperatura do ar, considerando o fundo de escala igual 40 °C, para o método de Hargreaves.	25
Tabela 4.	Acurácia dos instrumentos de medidas da radiação líquida, considerando o fundo de escala igual a $1.000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o método de Hargreaves.	26
Tabela 5.	Acurácia dos instrumentos de medidas da temperatura do ar, considerando o fundo de escala igual 40 °C, para o método da Radiação Solar.	27
Tabela 6.	Acurácia dos instrumentos de medidas da velocidade do vento, considerando o fundo de escala igual 10 m s^{-1} , para o método da Radiação Solar.	28
Tabela 7.	Acurácia dos instrumentos de medidas da umidade relativa do ar, considerando o fundo de escala igual a 100%, para o método da Radiação Solar.	28
Tabela 8.	Acurácia dos instrumentos de medidas da radiação solar, considerando o fundo de escala igual a $1.000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o método da Radiação Solar.	29
Tabela 9.	Acurácia dos instrumentos de medidas da temperatura do ar, considerando o fundo de escala igual 40 °C, para o método de Penman-Monteith.	30
Tabela 10.	Acurácia dos instrumentos de medidas da velocidade do vento, considerando o fundo de escala igual 10 m s^{-1} , para o método de Penman-Monteith.	31
Tabela 11.	Acurácia dos instrumentos de medidas da velocidade do vento, considerando o fundo de escala igual 10 m s^{-1} , para o método de Penman-Monteith.	31

Tabela 12.	Acurácia dos instrumentos de medidas da radiação líquida, considerando o fundo de escala igual a $1.000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o método de Penman-Monteith.	32
------------	--	----

DETERMINAÇÃO DA ACURÁCIA DE INSTRUMENTOS DE MEDIDAS PARA OBTER A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM ERROS FIXADOS

RESUMO – A evapotranspiração de referência (ET_o) é mais frequentemente obtida em diferentes situações e locais por meio de métodos de estimativa. A não verificação do erro da ET_o, devido ao uso de instrumentos de medidas, pode conduzir os trabalhos de pesquisa a resultados não confiáveis e inconsistentes. Utilizando os Métodos de Hargreaves; Radiação Solar e Penman-Monteith, com os erros da ET_o fixados em 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10%, determinou-se as acurácias dos instrumentos de medidas necessárias para obter a estimativa da ET_o, com os erros citados. Os dados foram coletados em uma Estação Meteorológica Automatizada, modelo Vaisala, da Usina Hidroelétrica de Nova Ponte, de propriedade da CEMIG, localizada no Rio Araguari. Estes valores foram registrados por meio da média diária de cada informação. A obtenção da ET_o com erros propostos neste trabalho requer instrumentos de medidas com acurácias para os Métodos: de Hargreaves com temperatura do ar de $\pm 0,2645\%$ a $\pm 2,6335\%$ e radiação líquida de $\pm 0,0331\%$ a $\pm 0,3315\%$; de radiação solar com temperatura do ar de $\pm 0,15\%$ a $\pm 1,47\%$, velocidade do vento de $\pm 0,01\%$ a $\pm 0,04\%$, umidade relativa do ar de $\pm 0,14\%$ a $\pm 0,1,43\%$ e radiação líquida de $\pm 0,02\%$ a $\pm 0,23\%$ e o de Penman-Monteith com Temperatura do ar de $\pm 0,33\%$ a $\pm 3,2\%$, Velocidade do vento de $\pm 0,10\%$ a $\pm 1,00\%$, de Umidade Relativa do ar de $\pm 0,06\%$ a $\pm 0,58\%$ e de Radiação Líquida entre $\pm 0,02\%$ a $\pm 0,17\%$. As acurácias obtidas permitirão selecionar instrumentos de medidas para determinação da ET_o, pelos métodos de Penman-Monteith, Hargreaves e Radiação Solar com erros máximos pré-estabelecidos. O método da Radiação Solar apresentou uma maior acurácia dos equipamentos meteorológicos utilizados em relação aos métodos PM (FAO 56) e Hargreaves.

Palavras-chave: balanço hídrico, determinação de erro, irrigação.

DETERMINATION OF THE ACCURACY FOR MEASURING INSTRUMENTS USED TO OBTAIN THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION WITH FIXED ERRORS

SUMMARY – The reference evapotranspiration (ET_o) is most often obtained in different situations and locations through estimation methods. The failure to find the error of ET_o, due to the use of measuring instruments, can conduct research work to unreliable and inconsistent results. Using Hargreaves, Solar Radiation and Penman-Monteith methods, with ET_o errors fixed in 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% and 10%, determined the accuracy of the instruments necessary to acquire the estimated ET_o with the errors cited. The data were obtained in an Automated Weather Station, Vaisala model, of Nova Ponte Hydroelectric Plant, owned by Cemig, located in Araguari River. These values were recorded by the daily-average of each information. The attainment of ET_o with errors proposed in this work requires measurement instruments with accuracies for the methods: Hargreaves with air temperature $\pm 0.2645\%$ to $\pm 2.6335\%$ and Net Radiation $\pm 0.0331\%$ to $\pm 0.3315\%$ of solar radiation in air temperature $\pm 0.15\%$ to $\pm 1.47\%$, wind speed $\pm 0.01\%$ to $\pm 0.04\%$, Relative Humidity $\pm 0.14\%$ of the $\pm 0.1, 43\%$ and Net Radiation $\pm 0.02\%$ to $\pm 0.23\%$ and the Penman-Monteith with air temperature $\pm 0.33\%$ to $\pm 3.2\%$, wind speed ± 0 , $\pm 10\%$ to $\pm 1.00\%$ RH air $\pm 0.06\%$ to $\pm 0.58\%$ and net radiation between $\pm 0.02\%$ to $\pm 0.17\%$. The accuracy obtained will allow the selection of measurement instruments to determine the ET_o by the Penman-Monteith, Hargreaves and Solar Radiation methods with pre-established maximum errors. The solar radiation method showed a greater accuracy of meteorological equipment used in the methods PM (FAO 56) and Hargreaves

Keywords: irrigation, determination of error, water balance

I. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade dos sistemas agrícolas passa obrigatoriamente pelo manejo racional e conservacionista dos recursos edáficos e hídricos. O solo e a água são ainda, os pilares da sustentação da produção de alimentos para a população mundial que alcança hoje, cerca de seis bilhões de pessoas. Este aumento gerou uma necessidade de produção de alimentos cada vez maior, principalmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil.

O Brasil é um dos países com grande capacidade territorial para a produção de alimentos. Sem dúvida, a agricultura brasileira é uma das atividades que pode se beneficiar dos vários avanços tecnológicos alcançados pelo homem. A busca de novas tecnologias para a obtenção do aumento da produtividade de grãos motivou o interesse para a prática de irrigação.

Sendo a água um recurso natural limitado e estratégico para o crescimento econômico da nação, sua racionalização é de suma importância. Para isso, a utilização de métodos para estimar a quantidade ideal de água a ser utilizada em irrigação tem sido frequentemente requerida.

Os recursos hídricos, por possuírem características dinâmicas, dentro da bacia hidrográfica, sofrem as consequências das atividades desenvolvidas pelo homem, e a sua qualidade resulta das influências do clima, geologia, fisiografia, solos, vegetação e, principalmente, do manejo dos sistemas produtivos agrícolas e do desenvolvimento urbano. Nas áreas onde atividades antrópicas são desenvolvidas, como a agricultura, o uso do solo contribui consideravelmente nas características físicas, químicas e biológicas da água (PISSARRA et al, 2008).

As principais atividades econômicas na bacia do Rio Grande são a pecuária leiteira, a olericultura, as culturas da soja, do feijão, do milho e da cana. Importante ressaltar que uma das características da área irrigada nesta região é a policultura, plantando-se tanto as culturas com elevado índice de mecanização (soja, milho e feijão), como as com elevado índice de utilização de mão de obra (o tomate e o feijão). Deste modo, fica claro que é a combinação da tecnologia de

irrigação com o produto cultivado a responsável pelo maior número de empregos gerados na região.

A irrigação, na região da bacia do Rio Grande, ajudou a contornar o problema da sazonalidade do trabalho rural, na medida em que conseguiu assegurar a produção no inverno, ampliando a oferta de emprego nesta época.

Isso tem motivado um olhar especial sobre os municípios que compõem o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba, sobretudo, os investimentos em vários projetos de pesquisa, que visam a propor políticas públicas e medidas que promova o controle da degradação ambiental, recuperação dos níveis de base dos cursos d'água, a revitalização das nascentes, a melhoria da qualidade de vida da população e, conseqüentemente, a minimização do êxodo rural.

Nesse contexto, apesar de vários esforços terem sido vislumbrados recentemente, observa-se ainda uma lacuna nas informações e dados para uma efetiva viabilização da produção agrícola. E a fim de viabilizar uma gestão consciente e consistente, que supra a necessidade de informações mais precisas que possam respaldar o trabalho de controle e busca de soluções na utilização da água durante o processo produtivo, necessário se faz estudar métodos de estimativa que permitam a preservação dos recursos hídricos e evitem o desgaste de reservas naturais.

Existem vários métodos para o cálculo da ETo em que os mesmos variam desde os mais simples que requerem poucos dados como temperatura do ar até os mais complexos que necessitam de minuciosas correlações com os valores medidos.

Os métodos que utilizam quantidade significativa de variáveis têm uma aplicação trabalhosa, não só pela complexidade do cálculo, mas também por exigir grande número de elementos meteorológicos fornecidos por estações meteorológicas específicas.

Neste sentido, há que se eleger o método mais adequado a ser utilizado para a estimativa proposta. Portanto os métodos escolhidos foram: Penman Monteith (PM- FAO), Hargreaves (HG) e Radiação Solar (RS). Entretanto a escolha dos

métodos se deve às condições de complexidade e da disponibilidade de se obter dados meteorológicos utilizados para desenvolver pesquisas científicas para se obter o grau de precisão dos equipamentos.

A escolha adequada dos instrumentos de medidas para obter a ETo com erros pré-estabelecidos contribuirá para o processo de sustentabilidade produtiva do município em estudo.

Diante do exposto justifica-se determinar a acurácia dos instrumentos de medidas para escolher as estações meteorológicas automatizadas adequadas para o município de Uberaba/MG.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é aplicar uma técnica para determinação de erros, nos Métodos de estimativa da ETo de Hargreaves (H), da Radiação Solar (RS) e de Penman-Monteith (PM), com os erros fixados em 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10%, determinando-se a acurácia que deveriam ter os instrumentos de medidas para obter ETo com os erros citados, para a região do município de Uberaba.

II. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

A Evapotranspiração é a transferência da água das superfícies cultivadas para a atmosfera e é controlada pela disponibilidade de energia e pelo suprimento hídrico do solo (PENMAN, 1948,1956).

Para COELHO et al (2000), a evapotranspiração consiste em um componente do balanço de energia, e é representada pelo calor latente de evaporação (evaporação da água do solo e transpiração de água das plantas) resultante da transformação do saldo de radiação solar (R_n) em calor sensível e latente do ar e aquecimento do solo.

De acordo com TURCO et al (2005), a evapotranspiração pode ser definida como um processo combinado de transferência de água do solo para atmosfera, incluindo evaporação da água do solo diretamente e o processo de transpiração através dos tecidos vegetais. Devido à necessidade de conhecer a perda d'água de superfícies vegetadas, vários pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa da evapotranspiração. Informações sobre a evapotranspiração de referência são fundamentais tanto para o planejamento, quanto para o manejo da irrigação.

O consumo de água pelas culturas é denominado de evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a ocorrência simultânea de dois processos importantes no cultivo das plantas, a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas. Na ausência de equipamentos de medidas diretas de evapotranspiração da cultura, os pesquisadores, muitas vezes, lançam mão de estimativas baseadas na ET_o e no coeficiente de cultura (K_c).

FERREIRA (2006) enfatiza que na agricultura, informações quantitativas da ET_o são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição, frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem.

Segundo MANTOVANI (2001), a escolha de qualquer método de irrigação depende de uma série de fatores, destacando-se o tipo de solo, a topografia e o tamanho da área, os fatores climáticos, os fatores relacionados ao manejo da cultura, o déficit hídrico, a capacidade de investimento do produtor e o custo do sistema de irrigação.

Dessa forma, principalmente em condições tropicais e subtropicais, onde os solos se apresentam mais intemperizados e mais sujeitos aos processos erosivos, a adoção de técnicas racionais de manejo conservacionista do solo e da água é de fundamental importância para a sustentabilidade (WUTKE et al, 2000). Mantendo-se economicamente, ao longo do tempo esses recursos com quantidade e qualidade suficientes para a manutenção de níveis satisfatórios de produtividade.

BERNARDO et al (2005) relatam em seus estudos que existem vários métodos para determinar a ETo. Estes autores evidenciam a classificação de BURMAN et al (1983) em dois grandes grupos: os diretos e os indiretos. O primeiro grupo inclui os métodos em que a evapotranspiração potencial pode ser determinada a partir de medidas diretas como os lisímetros, balanço hídrico e controle de umidade no solo. No segundo grupo estão os métodos determinados através de dados climáticos, também chamados de métodos indiretos.

VANZELA et al (2007) afirmam que os métodos diretos, por apresentarem custos elevados, têm ficado restrito a instituições de pesquisas e sua utilização justificada na calibração regional de métodos indiretos. Afirmam, ainda, que os métodos indiretos necessitam de conhecimento das variáveis climáticas por meio de modelos que estimam a ETo como os baseados na temperatura do ar (Hargreaves) até os mais complexos, que envolvem o balanço de energia como o de Penman-Monteith.

2.1.1 Método de Penman Monteith (PM)

MONTEITH (1965) adaptou na equação de Penman a resistência aerodinâmica e a resistência ao fluxo de vapor pela folha. A equação combinada com os termos de resistência aerodinâmica e da superfície passou a ser chamada de equação de Penman-Monteith.

Conforme PEREIRA et al (1995) o método de Penman-Monteith é considerado o método de estimativa mais utilizado para se obter a ETo. É preconizado pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) e de utilização mundial.

SILVA et al (2003) constataram que o método de Penman-Monteith estimou de forma consistente a ETo diária e teve boa correlação com os dados obtidos em lisímetro de pesagem hidráulica na região de Petrolina-PE.

VESCOVE & TURCO (2005) utilizando dados de uma estação meteorológica automatizada instalada em área experimental plantada com cultura de citrus comparou diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração de referência. Observou que o método do Tanque Classe A superestimou a evapotranspiração de referência em 26% no período verão/outono e 24% no período inverno/primavera em relação ao método de Penman-Monteith, padrão FAO.

ABTEW & OBEYSEKERA (1995) estudaram a evapotranspiração de taboa (*Typha domingensis*) no sul da Flórida e compararam os resultados obtidos pelo método do lisímetro, com os seguintes métodos de estimativa: Penman-Monteith, Penman e Priestley-Taylor. Verificaram que o método de Penman-Monteith apresentou melhor correlação com os dados medidos.

CHIEW et al (1995) compararam a ETo estimada usando os métodos de Penman-Monteith e Tanque Classe A com dados de dezesseis localidades da Austrália. Observaram que o método para determinação da ETo de Penman (FAO-24) foi de 20 a 40% maior que o de Penman-Monteith. A estimativa diária da ETo

pelo método da radiação (FAO-24) e Penman-Monteith foram similares. A correlação entre os métodos do Tanque Classe A e Penman-Monteith foi satisfatória.

DANTAS NETO (1999) avaliou métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró, RN. Os valores diários da ETo obtidos foram comparados com a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith. Verificou que o valor médio da ETo obtido pelo método de Penman-Monteith foi próximo ao da ETo do Tanque Classe A.

RIBEIRO et al (2008) avaliaram e compararam a estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu, SP usando o método de PM (FAO-56 com saldo radiômetro medido por diferentes sensores. Observaram que a estimativa da ETo diária pela equação de PM (FAO-56) obtida a partir de Rn medido por sensor REBS Q-7.1, com 5 anos de uso contínuo, com cúpulas novas e constante de calibração original, foi a que mais se aproximou dos valores encontrados de ETo em função do Rn medido pelo CNR1, usado como referência. Observaram, ainda, que após a recalibração dos mesmos as medidas ficaram mais acuradas.

De acordo com PEREIRA et al (2002) e POPOVA et al (2006) o principal problema da utilização do método de Penman-Monteith é que requer medidas acuradas de muitas variáveis meteorológicas, como: umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento e, analisando-se os trabalhos citados, observa-se que pouca atenção tem sido dada ao erro da grandeza calculada (ETo) que, em geral, pode ocasionar resultados inconsistentes aos trabalhos de pesquisa.

2.1.2 Método da Radiação Solar (RS)

A radiação solar caracteriza-se como um conjunto de ondas eletromagnéticas que incidem sobre a superfície terrestre e cujo comprimento de onda predominante é de 500nm. A mesma radiação pode também ser caracterizada por pacotes energéticos denominados fótons, cuja energia varia de

acordo com o comprimento de onda (λ) e da frequência (f) (CASAROLI et al, 2011).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é constituída da radiação solar direta e radiação solar difusa. A radiação direta é a parcela da energia radiante que chega diretamente na superfície do solo, e a radiação difusa é a outra parcela de energia radiante proveniente das demais direções que, em dias de céu limpo, atinge apenas 15% do total da radiação que chega à superfície terrestre. A energia radiante total na superfície terrestre, que é a soma da radiação direta e difusa, é a radiação solar global (VIENELLO & ALVES et al, 1991).

De acordo com DORNELAS et al (2006) a radiação solar global é um elemento importante para o cálculo da evapotranspiração, realização de zoneamentos agroclimáticos, utilização de modelos de crescimento e produção na agricultura. O grande problema para medir o saldo de radiação solar, nas estações meteorológicas, é o alto custo dos instrumentos a serem instalados e sua manutenção, que requer calibrações contínuas.

Os métodos que empregam a radiação solar são recomendados para regiões onde estão disponíveis observações de insolação (ou irradiância solar) e temperatura do ar, não estando aquelas de umidade do ar e ventos (CONCEIÇÃO et al, 2005).

FARIA et al (2000) estudaram a ETo diária em nove estações meteorológicas situadas na bacia do Rio Grande, ao Norte do estado de MG. Compararam a ETo estimada pelas equações ajustadas para os métodos de Hargreaves, Penman e Radiação Solar em relação ao método de Penman-Monteith. Observaram ajustes satisfatórios com r^2 superiores a 80%, com exceção do método de Hargreaves que obteve r^2 inferiores a 50% em duas localidades.

VESCOVE & TURCO (2005) compararam a estimativa de ETo pelo método da Radiação Solar em relação ao método de Penman-Monteith na cultura de citrus em Araraquara/SP em dois períodos distintos – verão/outono e primavera/inverno. Observaram que o método da Radiação Solar superestimou a evapotranspiração no período verão/outono mais do que no período primavera/inverno.

ALENCAR et al (2011) compararam três métodos de estimativa da ETo (Blaney Criddle, Radiação Solar e Hargreaves-Samani) com o método padrão para as condições climáticas do município de Uberaba, MG. Os métodos foram avaliados para duas estações do ano, uma de baixa demanda evaporativa, nos meses de abril a setembro, e a outra de alta demanda evaporativa, de outubro a março. Observaram que o método da Radiação Solar apresentou bons índices de concordância e desempenho para o período anual de outubro a março, porém este método apresenta os maiores erros no período de baixa demanda evaporativa.

2.1.3 Método de Hargreaves (HG)

O método de Hargreaves (HG) estima a ETo baseado na temperatura do ar e na radiação solar. A calibração da ETo estimada pelo método de HG permite proceder à disponibilização de informação sobre a ETo recorrendo apenas a informação referente à temperatura do ar.

A estimativa de radiação global é feita com base na diferença entre as temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar, uma vez que a redução de radiação global, como ocorre na presença de nuvens, faz com que a diferença entre T_{max} e T_{min} apresente a tendência de também ser menor.

CONCEIÇÃO & MARIN (2007) verificaram que, em diferentes regiões do Brasil, o método de Hargreaves foi o que proporcionou os melhores resultados na estimativa de radiação solar global (Q), quando comparados aos valores medidos em estações meteorológicas.

Comparando equações empíricas de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves, Hamon, Kharrufa e Thornthwaite para estimativa da ETo na bacia do Rio Jacupiranga, SP com o método de Penman-Monteith, BORGES et al, (2007) verificaram que a equação de HG apresentou o menor erro de estimativa.

No nordeste brasileiro, especificamente no Ceará, o método de estimativa de ETo proposto por HARGREAVES (1974), vem sendo empregado para determinação de ET_c , apesar de não ser o mais adequado, por resultar em

superestimativas nas condições de semiaridez do nordeste (SOUZA & YODER, 1994).

De acordo com OLIVEIRA et al (2008) o método que mais superestimou a ETo, independente do intervalo de comparação, foi o de HG, para a localidade de Viçosa, MG. Resultados semelhantes também foram encontrados por ARAÚJO et al (2007), que testaram alguns métodos de evapotranspiração para a região de Boa Vista, RR.

RODRIGUES & FERNANDES (2011) avaliaram o método de HG para estimativa de ETo para os municípios de Aquidauana e Corumbá, região pantaneira do Estado do Mato Grosso do Sul. Concluíram que o método de HG superestima os valores de ETo quando comparados com os valores obtidos pelo método de PM.

TRAJKOVIC (2005) citado por RODRIGUES & FERNANDES (2011) conduziu um estudo para avaliar a confiabilidade de alguns métodos de estimativa de ETo baseados em valores de temperatura com o método de PM, para condições úmidas, na Sérvia (sudeste de Europa). Os autores concluíram que os resultados obtidos com o método de HG tiveram bons resultados para locais úmidos, esses resultados também foram relatados por ITENFISU et al (2003) e TEMESGEN et al (2005).

TURCO et al (2008) avaliaram quatro métodos de estimativa da ETo, Makkink, Hargreaves, Tanque Classe A e Radiação Solar comparando-os com o método de Penman-Monteith para Jaboticabal, SP. Concluíram que o resultado da avaliação dos métodos, considerando os erros da ETo devido a utilização dos instrumentos de medida, indica um melhor ajuste para estimativa da ETo, considerando o método de Penman-Monteith como padrão, para o método de Hargreaves.

2.2 Otimização da Irrigação

MUSTAFA (1995), citado por PEITER et al. (1999) relatam que existem três aspectos que devem ser considerados na programação das estratégias de irrigação: o momento apropriado da aplicação, a quantidade necessária em cada aplicação e o consumo total de água da cultura durante o seu ciclo vital. De acordo com FERREIRA (2006) durante o manejo de irrigação chega-se a aplicar 50% a mais do que a quantidade de água necessária. Em um programa de manejo de uma área irrigada, seja ela de pequeno, médio ou grande porte, (pequeno até 50 ha, entre 50 e 200 ha médio e acima de 200 ha grande) deve-se procurar maximizar a produtividade da cultura explorada com eficiência do uso da água e da energia, mantendo-se as condições físicas, químicas e biológicas do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura irrigada que são de grande importância para se obter a máxima produção econômica (FERNANDES & MANTOVANI, 2006).

BAUSCH (1990) enfatiza que a popularização das estações meteorológicas tem proporcionado maior precisão e rapidez na coleta de dados, facilitando o seu uso nas estimativas da ETo.

Ley et al. (1994a e 1994b) citam que, quando a medição dos elementos meteorológicos é feita por estações meteorológicas automáticas, é comum a ocorrência de erros decorrentes da calibração dos sensores dos equipamentos utilizados para essas medições comprometendo, desta forma, a determinação dos componentes necessários à estimativa da evapotranspiração. Segundo os autores, quando as medições advêm de estações meteorológicas convencionais, os erros são ainda maiores pois se acrescentam, aos erros instrumentais, os erros devidos ao observador.

TURCO et al (1994) desenvolveram uma técnica matemática para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, que possibilita a escolha adequada de instrumentos de medidas para

determinação da ETo, com um erro pré-estabelecido e, a quem já possuir instrumento de medida determinar o erro da ETo.

Estudos sobre evapotranspiração têm-se desenvolvido muito rapidamente nos últimos anos em função do progresso na coleta de dados, em decorrência da informática como ferramenta útil nesse campo. Entretanto, CARVALHO et al. (2002) comentam que embora haja essa facilidade, a aquisição de instrumentação elaborada é ainda onerosa e envolve metodologia geralmente sofisticada e laboriosa.

Analisando-se os trabalhos citados, observa-se que pouca atenção tem sido dada ao erro da grandeza calculada (ETo) que, em geral, pode ocasionar resultados inconsistentes aos trabalhos de pesquisa e de campo. O referencial bibliográfico utilizado serviu como subsídio para a pesquisa uma vez que foi encontrado apenas o trabalho desenvolvido por TURCO e seus colaboradores (1994), sobre o assunto abordado.

III. MATERIAL E MÉTODO

3.1 Considerações climáticas e geográficas da região de Uberaba, MG

3.1.1 Localização e Caracterização Climática

A área em estudo é o município de Uberaba, que se encontra localizado na micro-região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais, balizado entre as coordenadas: 19° 44' e 19° 37' e 48° 19' e 47° 34' longitude oeste (Norte/Sul do município); 20° 06' e 19° 05' latitude sul e 47° 54' e 47° 51' longitude oeste (Oeste/Leste do município) e a uma altitude que varia de 991 a 493 m do nível do mar na qual abrange uma área de 4524 km².

Para compreender o clima de uma determinada região torna-se necessário considerar fatores fundamentais, tais como a circulação geral da atmosfera, resultado do aquecimento diferencial entre o equador e os pólos, bem como da distribuição dos continentes e oceanos (UBERABA EM DADOS, 2011).

Segundo BARCELOS (1994), de acordo com a classificação de KÖPPEN, Uberaba/MG apresenta clima tropical, com verões quentes, chuvas no verão e inverno seco, do tipo Cwa, situado na região marginal da área de clima Cwb com temperatura média anual varia entre 20 a 24°C, sendo que os meses mais quentes do ano são outubro e fevereiro, com temperaturas variando entre 21 e 25°C e julho o mês mais frio, com temperatura variando de 16 a 18°C.

A região possui dois regimes climáticos: inverno, classificado como frio e seco e verão, como quente e chuvoso. O período chuvoso estende de outubro a abril, e uma estação seca que vai de maio a setembro.

Até mais de 80% das chuvas caem entre os meses de outubro a março, intercalados por dois a três meses praticamente sem nenhuma precipitação com umidade relativa média anual de 64%.

Segundo FELTRAN FILHO (1997), no inverno o tempo fica instável com céu limpo e intensa radiação solar e a umidade do ar baixa, contudo com os dados climatológicos do 5º DISME, EPAMIG/MG / SAGRI / SIA Rural a umidade média

relativa do ar entre 1931 a 1994 ficou em torno de 50% (UBERABA EM DADOS, 2011). Os dias são quentes e as noites frias.

A precipitação média anual é de 1584,2 mm, sendo o trimestre mais chuvoso, de dezembro a fevereiro, com precipitação entre 42,8 e 541 mm /mês, para uma série histórica de sessenta e dois anos (SILVA et al, 2003).

3.1.2 Topografia

O relevo de Uberaba/MG faz parte do Planalto Arenítico da Bacia do Paraná. Varia de plano ligeiramente ondulado na maioria absoluta até fortemente ondulado em pequenas manchas de solos podzólicos e chapadas (UBERABA EM DADOS, 2011).

3.1.3 Hidrografia

Está situada entre as bacias dos rios Grande e Paranaíba, formadores do rio Paraná. Possui área irrigada total de 22 mil ha (UBERABA EM DADOS, 2011).

3.1.4 Solo e Cobertura vegetal

Os solos sofreram intensa lixiviação e laterização e são predominantemente Latossolo Vermelho escuro Álico A, textura argilosa. A cobertura vegetal predominante é originária da ação antrópica. Na área cultivada predominam as culturas anuais de soja, milho, feijão e cana de açúcar e, as pastagens plantadas (UBERABA EM DADOS, 2011).

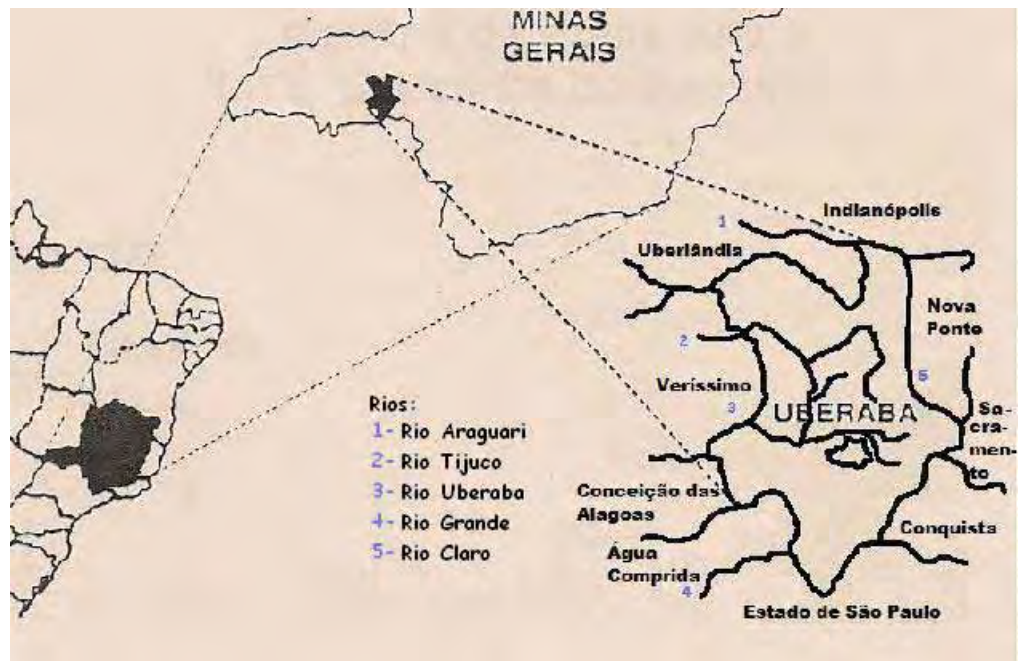


Figura 1 Perspectiva da área em estudo

Os dados diários referentes aos anos de 2000 a 2009, da temperatura média do ar (T), da umidade relativa média do ar (U), da radiação solar (Q) e da velocidade do vento (V) a 2m de altura foram coletados em intervalo de 15 em 15 minutos, na Estação Meteorológica Automatizada modelo Vaisala, ano de fabricação 1997. A estação foi instalada na Usina Hidroelétrica de Nova Ponte em 1º de julho de 1998. É de propriedade das Centrais Elétricas de Minas Gerais – CEMIG e localizada no Rio Araguari (Figura 1). Está balizada nas coordenadas $19^{\circ} 44' S$ e $48^{\circ} 19' W$ e altitude de 646m do nível do mar.

3.2 Adequação de Métodos de Estimativa de ET_o.

Foram utilizados os métodos de Hargreaves, da Radiação Solar e de Penman-Monteith padrão FAO para a aplicação da metodologia. Para isso, na equação de cada método foi realizado um tratamento matemático.

3.2.1 Método de Hargreaves (HG)

A equação original do método de estimativa da ETo utilizado e o tratamento matemático realizado estão descritos a seguir:

Seja,

$$E_{ToHG} = 0,0075 Q T$$

a equação proposta por HARGREAVES (1976) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, em que:

E_{ToHG} = evapotranspiração de referência, em gramado estimado com o m

T = temperatura média do ar ($^{\circ}F$), e

Q = radiação solar global medida ou estimada ($cal\ cm^{-2}\ dia^{-1}$).

Pode-se escrever a eq. (1) na seguinte forma:

$$E_{ToH} = 0,0075 \frac{Q}{59} T \quad (1)$$

em que,

E_{ToHG} = Evapotranspiração de referência, em gramado ($mm\ dia^{-1}$)

Q = radiação solar global recebida ($cal\ cm^{-2}\ dia^{-1}$), e

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

T = temperatura média do ar ($^{\circ}F$),

sendo

$$K_b = \frac{0,0075}{59}$$

tem-se:

$$E_{ToH} = K_b Q T \quad (2)$$

3.2.2 Método da Radiação Solar (RS)

A seguir, é descrita a equação original do método utilizado e o tratamento matemático realizado.

Seja,

$$EToRS = CWQ \quad (3)$$

a equação básica proposta DOORENBOS & PRUIT (1977) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, em que:

$EToRS$ = evapotranspiração de referência, em gramado estimada com o método ($mm \text{ dia}^{-1}$).

C = coeficiente angular da regressão $ETo \times W Q$, determinado em função da umidade relativa média do ar e da velocidade média do vento a 2 m de altura (Tabela 1);

W = fator que representa a parte fracional da radiação solar que é utilizada na ETo , para diferentes valores de temperatura e altitude (Tabela 2), e

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

Tabela 1. Valores da constante C para cálculo de $ETo = CWQ$, segundo DOORENBOS & KASSAM (1979).

Velocidade Média do Vento (m/s)	Umidade Relativa Média do Ar (%)			
	<40	40-55	55-70	>70
0-2	0,971	0,929	0,857	0,814
2-5	1,057	1,014	0,927	0,886
5-8	1,143	1,100	0,986	0,923
>8	1,229	1,172	1,043	1,00

Tabela 2. Valores do fator de ponderação (W) para o efeito de radiação solar sobre ETo a diferentes temperaturas e altitudes, segundo DOORENBOS & KASSAM (1979).

Temperatura ° C	Altitude (m)				
	0	500	1000	2000	3000
2	0,43	0,45	0,46	0,49	0,52
4	0,46	0,48	0,49	0,52	0,55
6	0,49	0,51	0,52	0,55	0,58
8	0,52	0,54	0,55	0,58	0,61
10	0,55	0,57	0,58	0,61	0,64
12	0,58	0,60	0,61	0,64	0,66
14	0,61	0,62	0,64	0,66	0,69
16	0,64	0,65	0,66	0,69	0,71
18	0,66	0,67	0,69	0,71	0,73
20	0,69	0,70	0,71	0,73	0,75
22	0,71	0,72	0,73	0,75	0,77
24	0,73	0,71	0,75	0,77	0,79
26	0,75	0,76	0,77	0,79	0,81
28	0,77	0,78	0,79	0,81	0,82
30	0,78	0,79	0,80	0,82	0,84
32	0,80	0,81	0,82	0,84	0,85
34	0,82	0,82	0,83	0,85	0,86
36	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88
38	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88
40	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89

Pode-se escrever a eq. (4) na seguinte forma:

$$ET_{oRS} = \frac{C W Q}{59} \quad (4)$$

Admitindo-se por hipótese que:

$$C = K_a U V \quad (5)$$

$$W = K_b T \quad (6)$$

em que,

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, (m/s), e

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

Substituindo as eq. (5) e (6) na (4) tem-se:

$$E_{To} = \frac{K_a K_b}{59} U V T Q \quad (7)$$

sendo,

$$K_c = \frac{K_a K_b}{59} \quad (8)$$

tem-se:

$$E_{To} = K_c U V T Q \quad (9)$$

3.2.3 Método do Penman-Monteith

Para atingir o objetivo deste trabalho foi aplicada a técnica descrita por TURCO et al (1994) no método de Penman-Monteith padrão FAO (PM FAO), (SMITH et al, 1990); para isto foi realizado um tratamento matemático na equação original deste método. A seguir, é descrita a equação original do método utilizado e o tratamento matemático realizado.

Para cálculo da evapotranspiração potencial SMITH et al (1990) propõe a seguinte equação:

$$ET_o = \frac{0,409 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (10)$$

em que,

$ET_{oPM-FAO}$ = evapotranspiração de referência, em gramado, $mm\ d^{-1}$;

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

G = fluxo de calor no solo, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ (adotado= 0);

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

U_2 = velocidade média do vento a 2m de altura, $m\ s^{-1}$ (adotado $U_2 = V$);

$(e_s - e)$ = deficit de pressão de vapor, kPa;

Δ = tangente da curva de pressão de vapor para a temperatura do ar, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$;

γ = constante psicrométrica, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ (adotado= 0,0667), e

900 = fator de conversão.

Não há necessidade de utilizar a medida do fluxo de calor do solo quando se calcula os valores diários de evapotranspiração, pois o balanço de energia no solo nesse período é próximo de zero (ITIER, 1981)

Segundo BRUNEL (1989), no caso de uma vegetação bem desenvolvida, o fluxo de calor no solo pode ser negligenciada, pois $G < 0,05\ RA$.

No método de Penman-Monteith a constante psicrométrica (γ) foi calculada por meio da equações apresentadas por e SMITH et al (1990).

$$\gamma = 0,00163 P / \lambda$$

P = pressão atmosférica [k Pa]

λ = calor latente [$MJ\ kg^{-1}$]

sendo,

$$e = (U/100).e_s \quad (11)$$

em que,

e = pressão atual do vapor da água do ar, kPa;

e_s = pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro de bulbo seco, kPa, e

U = umidade relativa média do ar, %.

A pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro de bulbo seco (kPa) é determinada pela equação:

$$e_s = 0,6108 \exp \frac{17,27 T}{T + 237,3} \quad (12)$$

A declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹) é determinada pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (13)$$

Substituindo a equação (11), (12) e (13) na (10) temos:

$$E_{To} = \frac{1021,247827 \frac{\exp 17,27 \frac{T}{T+237,3}}{(T+237,3)^2} Rn + 36,666324 \frac{V \exp 17,27 \frac{T}{T+237,3}}{T+273} \frac{1}{100} U \exp 17,27 \frac{T}{T+237,3}}{2503,0584 \frac{\exp 17,27 \frac{T}{T+237,3}}{(T+237,3)^2} + 0,0667 + 0,022678 V} \quad (14)$$

3.3 Técnica para determinação de erros

Seja uma quantidade E_{To} , em que E_{To} é uma função conhecida de x variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, isto é, $E_{To} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

As variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, são quantidades medidas com erros $\pm \Delta x_1, \pm \Delta x_2, \pm \Delta x_3, \dots, \pm \Delta x_n$, respectivamente. Esses erros combinados, resultam no erro ΔE_{To} .

Os erros Δx podem ser combinados de duas maneiras:

a) Limites Absolutos

Os Δx são obtidos considerando-se os limites absolutos dos mesmos, ou seja, com 100% de confiança.

$$E_{To} \pm \Delta E_{To} = f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n)$$

Para se obter ΔE_{To} pode-se desenvolver a equação em série de Taylor.

$$\begin{aligned} f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} + \frac{1}{2} (\Delta x_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} + \dots + \dots \end{aligned}$$

Como os Δx são pequenos despreza-se todos os termos onde Δx_i está elevado a uma potência igual ou maior a 2, ou há produtos $\Delta x_i \Delta x_j$ e pode-se concluir que o erro absoluto é:

$$E_a = \Delta E_{To} = \left| \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \left| \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| + \dots + \left| \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \quad (15)$$

O erro porcentual relativo E_r , fica, então:

$$E_r = \frac{\Delta E_{To}}{E_{To}} \cdot 100 = \frac{100 E_a}{E_{To}}$$

b) Limites Estatísticos

Os Δx são obtidos por processos estatísticos tais como $\pm 2s$ (95% de confiança), $\pm 3s$ (99,7% de confiança), sendo s o desvio padrão. Nesse caso a maneira de se calcular o erro é diferente. Usa-se a fórmula de raiz da soma dos quadrados (rsq).

$$E_{rsq} = \sqrt{\Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1}^2 + \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2}^2 + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n}^2} \quad (16)$$

O erro E_{rsq} tem o mesmo significado estatístico dos erros individuais. Se os Δx são de $\pm 2s$, também E_{rsq} será com 95% de confiança.

Quando se pretende obter um erro para a grandeza procurada (evapotranspiração potencial ou de referência) e necessita-se saber o erro com que cada variável x_i deve ser medida, procede-se da seguinte forma:

$$\Delta E_{To} = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right|$$

Admite-se por hipótese que:

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| = \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| = \dots = \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| = \frac{\Delta E_{To}}{n}$$

Portanto:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = \frac{\Delta ETo}{n}$$

ou

$$\Delta x_i = \frac{\Delta ETo}{n \frac{\partial f}{\partial x_i}} \quad (17)$$

Analogamente para erros estatísticos obtém-se:

$$\Delta x_i = \frac{\Delta ETo}{\sqrt{n} \frac{\partial f}{\partial x_i}} \quad (18)$$

3.3.1 Aplicação da técnica para determinação de erros nos métodos de Hargreaves, Radiação Solar e Penman-Monteith

Utilizando-se as equações 2, 9 e 14, aplicou-se a equação (18) diariamente no período de dez anos e, com os erros da grandeza ETo fixados em $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 5\%$, $\pm 6\%$, $\pm 7\%$, $\pm 8\%$, $\pm 9\%$ e $\pm 10\%$, determinaram-se quais deveriam ser os erros estatísticos diários com 95% de confiança das variáveis (temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar).

Para todos os métodos a acurácia do instrumento foi feita dividindo-se os menores erros encontrados pelo valor do fundo de escala definido.

IV. RESULTADOS

4.1 Aplicação no Método de Hargreaves (HG)

Os valores dos menores erros diários para as grandezas T e Q, respectivamente, para os erros de $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 5\%$, $\pm 6\%$, $\pm 7\%$, $\pm 8\%$, $\pm 9\%$ e $\pm 10\%$ de ETo, bem como a acurácia dos instrumentos de medidas de T e Q, sendo esses analógicos, para um dado fundo de escala estão apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Acurácia dos instrumentos de medidas da temperatura do ar, considerando o fundo de escala igual 40 °C, para o método de Hargreaves.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para T (°C)	Acurácia do Instrumento (%)
± 1	$\pm 0,1058$	$\pm 0,26$
± 2	$\pm 0,2101$	$\pm 0,53$
± 3	$\pm 0,3161$	$\pm 0,64$
± 4	$\pm 0,4217$	$\pm 0,79$
± 5	$\pm 0,5275$	$\pm 1,05$
± 6	$\pm 0,6318$	$\pm 1,32$
± 7	$\pm 0,7376$	$\pm 1,58$
± 8	$\pm 0,8433$	$\pm 1,84$
± 9	$\pm 0,9476$	$\pm 2,11$
± 10	$\pm 1,0534$	$\pm 2,63$

Tabela 4. Acurácia dos instrumentos de medidas da radiação solar, considerando o fundo de escala igual a $1.000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o método de Hargreaves.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para Q ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,331	±0,03
±2	±0,663	±0,07
±3	±0,994	±0,10
±4	±1,063	±0,11
±5	±1,658	±0,17
±6	±1,989	±0,20
±7	±2,322	±0,23
±8	±2,653	±0,27
±9	±2,984	±0,30
±10	±3,315	±0,33

Verifica-se por meio das Tabelas 3 e 4 que, para a região de Uberaba, MG a obtenção da ETo com erros de ±1%, ±2%, ±3%, ±4%, ±5%, ±6%, ±7%, ±8%, ±9% e ±10% requer instrumentos de medidas com acurácias de:

- ✓ Temperatura do ar: ±0,26% a ±2,63%.
- ✓ Radiação solar: ±0,03% a ±0,33%;

Para se obter ETo com erro de ±1% pelo Método de Hargreaves, para a região do município de Uberaba, MG, seriam necessários instrumentos de medidas de temperatura do ar e radiação solar, com acurácias de ±0,2645 e ±0,0331, respectivamente.

Para obter ETo com erros de 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% e 10% são necessários instrumentos de medidas de temperatura do ar e radiação solar, com acurácias de 0,26 a 0,03; 0,52 a 0,07; 0,64 a 0,09; 0,79 a 0,11; 1,05 a 0,16; 1,32 a 0,19; 1,58 a 0,23; 1,84 a 0,26; 2,11 a 0,29 e 2,63 a 0,33, respectivamente.

4.2 Aplicação no Método da Radiação Solar (RS)

Nas tabelas 5, 6, 7 e 8 estão apresentados os menores erros diários nos anos citados para as grandezas T, V, U e Q, respectivamente, para os erros de $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 5\%$, $\pm 6\%$, $\pm 7\%$, $\pm 8\%$, $\pm 9\%$ e $\pm 10\%$ de E_{To} , bem como a acurácia dos instrumentos de medidas de T, V, U e Q, sendo estes analógicos, para um dado fundo de escala.

Tabela 5. Acurácia dos instrumentos de medidas da temperatura do ar, considerando o fundo de escala igual 40 °C, para o método de Radiação Solar.

Erro E_{To} (%)	Menor Erro Para T (°C)	Acurácia do Instrumento (%)
± 1	$\pm 0,0587$	$\pm 0,147$
± 2	$\pm 0,1174$	$\pm 0,296$
± 3	$\pm 0,1762$	$\pm 0,441$
± 4	$\pm 0,2349$	$\pm 0,587$
± 5	$\pm 0,2936$	$\pm 0,734$
± 6	$\pm 0,3523$	$\pm 0,881$
± 7	$\pm 0,4110$	$\pm 1,026$
± 8	$\pm 0,4697$	$\pm 1,174$
± 9	$\pm 0,5285$	$\pm 1,321$
± 10	$\pm 0,5872$	$\pm 1,468$

Tabela 6. Acurácia dos instrumentos de medidas da velocidade do vento, considerando o fundo de escala igual 10 m s^{-1} , para o método da Radiação Solar.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para V (m s^{-1})	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,0001	±0,001
±2	±0,0009	±0,009
±3	±0,0013	±0,013
±4	±0,0017	±0,017
±5	±0,0022	±0,022
±6	±0,0026	±0,026
±7	±0,0031	±0,031
±8	±0,0036	±0,04
±9	±0,0039	±0,039
±10	±0,0044	±0,044

Tabela 7. Acurácia dos instrumentos de medidas da umidade relativa do ar, considerando o fundo de escala igual a 100% , para o método da Radiação Solar.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para U (%)	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,143	±0,143
±2	±0,286	±0,286
±3	±0,430	±0,430
±4	±0,573	±0,573
±5	±0,716	±0,716
±6	±0,859	±0,859
±7	±1,002	±1,002
±8	±1,146	±1,146
±9	±1,289	±1,289
±10	±1,432	±1,432

Tabela 8. Acurácia dos instrumentos de medidas da radiação solar, considerando o fundo de escala igual a $1.000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o método da Radiação Solar.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para Q ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,231	±0,023
±2	±0,463	±0,046
±3	±0,694	±0,069
±4	±0,926	±0,092
±5	±1,157	±0,115
±6	±1,386	±0,138
±7	±1,620	±0,162
±8	±1,851	±0,185
±9	±2,081	±0,208
±10	±2,310	±0,231

Verifica-se por meio das Tabelas 5 a 8 que, para a região do município de Uberaba, MG, a obtenção da ETo com erros de ±1%, ±2%, ±3%, ±4%, ±5%, ±6%, ±7%, ±8%, ±9% e ±10% requer instrumentos de medidas com acurácias de:

- ✓ Temperatura do ar: ±0,147% a ±1,468%;
- ✓ Velocidade do vento: ±0,001% a ±0,044%;
- ✓ Umidade Relativa do ar: ±0,143% a ±1,432%;
- ✓ Radiação solar: ±0,023% a ±0,231%.

Para se obter ETo com erro de ±1%, para a região de Uberaba, MG, seriam necessários instrumentos de medidas de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar com acurácias de ±0,15; ±0,01; ±0,14 e ±0,023%, respectivamente.

4.3 Aplicação no Método de Penman-Monteith (PM-FAO)

Os valores dos menores erros diários no período de dez anos para as grandezas T, V, U e R_n , respectivamente, para os erros de $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 3\%$, $\pm 4\%$, $\pm 5\%$, $\pm 6\%$, $\pm 7\%$, $\pm 8\%$, $\pm 9\%$ e $\pm 10\%$ de E_{To} , bem como a acurácia dos instrumentos de medidas de T, V, U e R_n , considerando estes analógicos, para um dado fundo de escala, estão apresentados nas tabelas de 9 a 12.

Tabela 9. Acurácia dos instrumentos de medidas da temperatura do ar, considerando o fundo de escala igual 40 °C, para o método de Penman-Monteith-FAO.

Erro E_{To} (%)	Menor Erro Para T (°C)	Acurácia do Instrumento (%)
± 1	$\pm 0,13$	$\pm 0,33$
± 2	$\pm 0,26$	$\pm 0,64$
± 3	$\pm 0,38$	$\pm 0,95$
± 4	$\pm 0,51$	$\pm 1,27$
± 5	$\pm 0,64$	$\pm 1,60$
± 6	$\pm 0,77$	$\pm 1,92$
± 7	$\pm 0,89$	$\pm 2,22$
± 8	$\pm 1,02$	$\pm 2,55$
± 9	$\pm 1,15$	$\pm 2,87$
± 10	$\pm 1,28$	$\pm 3,20$

Tabela 10. Acurácia dos instrumentos de medidas da velocidade do vento, considerando o fundo de escala igual 10 m s^{-1} , para o método de Penman-Monteith-FAO.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para V (m s^{-1})	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,01	±0,10
±2	±0,02	±0,20
±3	±0,03	±0,30
±4	±0,04	±0,40
±5	±0,05	±0,50
±6	±0,06	±0,60
±7	±0,07	±0,70
±8	±0,08	±0,80
±9	±0,09	±0,90
±10	±0,10	±1,00

Tabela 11. Acurácia dos instrumentos de medidas da umidade relativa do ar, considerando o fundo de escala igual a 100%, para o método de Penman-Monteith-FAO.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para U (%)	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,06	±0,06
±2	±0,12	±0,12
±3	±0,17	±0,17
±4	±0,23	±0,23
±5	±0,29	±0,29
±6	±0,34	±0,34
±7	±0,40	±0,40
±8	±0,46	±0,46
±9	±0,52	±0,52
±10	±0,58	±0,58

Tabela 12. Acurácia dos instrumentos de medidas da radiação líquida, considerando o fundo de escala igual a $1.000 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o método de Penman-Monteith-FAO.

Erro ETo (%)	Menor Erro Para Rn ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ¹⁾	Acurácia do Instrumento (%)
±1	±0,23	±0,02
±2	±0,32	±0,03
±3	±0,46	±0,05
±4	±0,69	±0,07
±5	±0,83	±0,08
±6	±0,99	±0,10
±7	±1,16	±0,12
±8	±1,32	±0,13
±9	±1,50	±0,15
±10	±1,67	±0,17

Verifica-se que, para a região de Uberaba, MG, a obtenção da ETo com erros de ±1%, ±2%, ±3%, ±4%, ±5%, ±6%, ±7%, ±8%, ±9% e ±10% requer instrumentos de medidas com acurácias de:

- ✓ Temperatura do ar: ±0,33% a ±3,2%;
- ✓ Velocidade do vento: ±0,10% a ±1,00%;
- ✓ Umidade Relativa do ar: ±0,06% a ±0,58%;
- ✓ Radiação Líquida: ±0,02% a ±0,147%.

Para se obter, com o método PM (FAO), ETo com erro de ±1%, para a região de Uberaba, MG, seriam necessários instrumentos de medidas de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação líquida com acurácias de ±0,33; ±0,10; ±0,06 e ±0,02%, respectivamente.

A tabela 13 apresenta as diferenças entre os métodos de HG, RS e PM (FAO) com as acurácias para os devidos métodos observando temperatura, vento, radiação solar, radiação líquida e umidade.

V. DISCUSSÃO

5.1 Método de Hargreaves (HG)

Observou-se nas tabelas 3 e 4 apresentadas que há diferença na acurácia dos instrumentos de medidas para os erros fixados para ETo, sendo que a maior acurácia foi de $\pm 0,03\%$ e a menor de $\pm 2,63\%$.

A opção para instrumentos de medidas com acurácia de $\pm 0,03\%$ a $\pm 0,26\%$ pode representar um erro na ETo que não conduz a erros significativos em trabalhos de pesquisa e de campo.

Esses resultados mostram a importância da escolha de instrumentos de medidas para o Método de Hargreaves com acurácias adequadas para obter a evapotranspiração de referência com erros conhecidos.

5.2 Método da Radiação Solar (RS)

Observou-se nas tabelas 5, 6, 7 e 8 que há diferença na acurácia dos instrumentos de medidas para os erros fixados para ETo, sendo que a maior acurácia foi de $\pm 0,001\%$ e a menor de $\pm 1,468\%$.

A opção para instrumentos de medidas com acurácia de $\pm 0,001\%$ a $\pm 1,468\%$ pode representar um erro na ETo significativo em trabalhos de pesquisa e de campo.

Esses resultados mostram a importância da escolha de instrumentos de medidas para o método de Radiação Solar com acurácias adequadas para obter a evapotranspiração de referência com erros conhecidos.

TURCO et al (1997) aplicaram uma técnica para determinação de erros, para o Método de Radiação Solar, com os erros da ETo fixados em $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ para obter a acurácia dos instrumentos de medidas para obtenção da ETo, com os erros citados, para a região do município de Jaboticabal, SP. Assim, a conclusão deste método, para região de Uberaba, MG, corrobora a do trabalho desenvolvido pelos autores citados de que a maior acurácia foi de $\pm 0,001\%$ e a

menor encontrada foi semelhante a do trabalho mencionado, $\pm 1,468\%$ e $\pm 1,05\%$, respectivamente.

5.3 Método de Penman-Monteith (PM-FAO 56)

Observa-se nas tabelas 9, 10, 11 e 12 que há diferença na acurácia dos instrumentos de medidas para os erros fixados para ETo, sendo que a maior acurácia foi de $\pm 0,02\%$ e a menor de $\pm 3,20\%$.

A opção para instrumentos de medidas com acurácia de $\pm 0,02\%$ a $\pm 0,33\%$ pode representar um erro na ETo que não conduz a erros significativos em trabalhos de pesquisa e de campo.

TURCO & FERNANDES (2003) aplicaram uma técnica para determinação de erros, para o Método de Penman-Monteith, com os erros da ETo fixados em $\pm 1\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ para obter a acurácia dos instrumentos de medidas para obtenção da ETo, com os erros citados, para a região do município de Jaboticabal, SP. Assim, a conclusão deste método, para região de Uberaba, MG, corrobora a do trabalho desenvolvido pelos autores citados de que a maior acurácia foi de $\pm 0,02\%$ e a menor encontrada foi semelhante a do trabalho mencionado, $\pm 3,20\%$ e $\pm 2,87\%$, respectivamente.

Esses resultados mostram a importância da escolha de instrumentos de medidas para o método de Penman-Monteith com acurácias adequadas para obter a evapotranspiração de referência com erros conhecidos.

VI. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido:

- ✓ evitará uma análise errada dos valores obtidos devido ao uso de instrumentos de medidas a quem utilizar os métodos de Hargreaves, Radiação Solar e Penman-Monteith na região de Uberaba, MG;
- ✓ possibilitará a determinação da acurácia que devem ter os instrumentos de medidas, para obter a estimativa da ETo com erros estabelecidos, pelos métodos de Hargreaves, Radiação Solar e Penman-Monteith, com 95% de confiança;
- ✓ a quem já possuir instrumentos de medidas com acurácias conhecidas, a obtenção do erro da ETo.

A utilização desta metodologia e, simultaneamente, dos métodos de estimativa, proporcionará a obtenção da ETo com erros conhecidos, possibilitando conclusões mais coerentes em trabalhos científicos.

VII. REFÊRENCIAS

ABTEW, W.; OBEYSEKERA, J. Lysimeter Study of Evapotranspiration of Cattails and Comparison of Three Estimation Methods. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v.38, n.1, p.121-29, 1995.

ALENCAR, L. A. de; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba-MG. **Revista Brasileira de Ciência Agrária**. Recife, v. 6, n. 2, p. 337-343, 2011

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

BARCELOS, J.H.; **Uberaba, Meio Ambiente e Cidadania. Prefeitura Municipal de Uberaba**: Uberaba, p. 6-9, 1994.

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

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 7 ed. Viçosa: UFV, 611p. 2005.

BORGES, A. C.; MEDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa de 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.

BRUNEL, J. P. Estimation of sensible heat flux from measurements of radiative temperature and air temperature at two meters: Application to determine actual evaporation rate. **Agricultural and Forest Meteorology**. 46, p. 179-191, 1989.

BURMAN, R.D.; NIXON, P. R.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W.O. Water requirements. In: JENSEN, M.E. (Ed.) Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph: ASAE, 1983. P. 189-232. (Monograph, 3).

CARVALHO, D.F.; FERNANDES, J.M.; CRUZ, E.S.; SILVA, W.A.; OLIVEIRA, L.F.C. Comparação entre diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência da demanda máxima suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Agronomia**. Seropédica, RJ, v.36, n.1/2, p.48-55, 2002.

CASAROLI, D. et al. **Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja - uma revisão**. Disponível em:

<<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fzva/article/viewFile/2502/1961>>

Acesso em 12 de junho de 2011

CHIEW, F.H.S.; KAMALADASA, N.N.; MALANO, H.M.; MCMAHON, T.A. Penman-Monteith, FAO-24 Reference Crop Evapotranspiration And Class-A Pan Data In Australia. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v.28, n.1, p.9-21, 1995.

COELHO, E. F. **Irrigação e fertirrigação da mangueira**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2000. 26 p. (Circular Técnica, 39).

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

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MARIN, F. R. Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários da radiação solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Piracicaba, v. 15, n.1, p. 103-108, 2007.

DANTAS NETO, F.S. Avaliação de Métodos para Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Mossoró – RN. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v.7, n.1, p.46-55, 1999.

DORNELAS. K.D.S.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. Coeficientes médios da equação de Angstrom-PreScott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.41, n.8, p. 1213-1219, ago. 2006.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO **Irrigation and Drainage Paper 24**. 2nd ed., Rome, 179p. 1977.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Yield Response to Water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

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* 1), na bacia do rio grande (MG). **Ciências e Agrotecnologia**. Lavras, v.24, p. 187-196, 2000. Edição Especial.

FELTRAN FILHO, A. A estruturação das paisagens nas chapadas do oeste mineiro. **Tese** (Doutorado em Geografia Física) – Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

FERREIRA, W.P.M. Estação Meteorológica – Monitora clima e diminui perda de insumos. **Revista Campo e Negócios**. Uberlândia, Ano IV nº 43,p.44-45, 2006.

FERNANDES, A.L.T.;Mantovani,A.C, Manejo da irrigação do cafeeiro- como utilizar de forma racional a água e a energia na cefeicultura irrigada. **Revista Campo e Negócios**. Uberlândia, Ano IV nº 39,p.72-75, 2006.

HARGREAVES, G.H. **Potencial evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil**. Logan: Utah State University, 1974. p. 123.

HARGREAVES, G.H. **Climate and Irrigation Requirements For Brazil**. Logan, Utah State University, 1976. 44p.

ITENFISU, D.; ELLIOTT, R. L.; ALLEN, R. G.; WALTEER, I. A. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. **Journal Irrigation Drain. Eng.**129(6), 440-448, 2003.

ITIER, B. Une méthode simple por la mesme de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle. **Agronomie**. v. 1, n.10, p. 869-876, 1981.

LEY, T. W.; HILL, R. W.; JENSEN, D. T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. **Transaction of ASAE**, v.37, n.6, p.1853-1861, 1994a.

LEY, T. W.; HILL, R. W.; JENSEN, D. T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: II. Effects of weather sensor measurement variability. **Transaction of ASAE**, v.37, n.6, p.1863-1870, 1994b.

MANTOVANI, E. C. A irrigação do Cafeeiro. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada, Araguari, MG, Universidade Federal de Viçosa – **Resumos Expandidos (Boletim Técnico n. 4)**. Viçosa, MG. 2001 p. 2-23.

MONTEITH, J. L. Evapotation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 6., Swansea, 1964. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. P. 205-234.

OLIVEIRA, R. A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G.C.; MATERAM, F. J. V.; CECON, P. R. Desempenho do irrigômetro na estimativa da evapotranspiração de

referência. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental**. v. 12, n. 2 p. 166-173, 2008. Crossref.

PEREIRA, A. B., VILA NOVA, N. A., TUON, R. L., BARBIERI, V. Estimativa da Evapotranspiração Máxima da Batata nas Condições Edafoclimáticas de Botucatu – SP, Brasil. **Rev. Bras. de Agrometeorologia**. Santa Maria. v.3, p.53-58, 1995.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Porto Alegre: Guaíba Agropecuária, 2002. 478 p.

PEITER, M.X.; CHAUDHRY, F.H.; CARLESSO, R. Programação do manejo da irrigação de milho via modelo de simulação. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 53-63, 1999.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**. Sér. A, London, 193: 120-45, 1948.

PENMAN, H.L. Evaporation: an Introductory Survey. Netherlands **J. Agric. Sci**, n. 4, p. 9 – 29. 1956.

PISSARRA, T. C.T et al. Análise das condições hidrológicas em bacias hidrográficas com diferentes uso e ocupação do solo. **IRRIGA**. Botucatu, v. 13, n.4.p. 552-565, out/dez 2008.

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L.S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data: application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, v. 55, n. 2, p. 201-215, Apr 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ird.228/pdf>>. Acesso em: 21 de mai. 2011.

RIBEIRO, A.C.; ALBERTO, C.V.; JOÃO, F.E. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) com saldo de radiação medido por diferentes sensores. **Agronomia Tropical**. v. 58 n.1, p. 81-84, 2008.

RODRIGUES, C. C. B.; FERNANDES, D. S. Comparação de metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência para Aquidauana e Corumbá, Mato Grosso do Sul, **IV Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia**, 21 de abril de 2011 Universidade Federal de Pelotas – UFPEL

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

SMITH, M.; ALLEN, R.; MONTEITH, J. L.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S.; SEGEREN, A. **Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1990. p. 59.

SOUZA, F. de; YODER, R. **ET estimation in the Northeast of Brazil: Hargreaves or Penman-Monteith equation**. St. Joseph: ASAE, 1994. 6p. (ASAE. Paper, 942545).

TEMESGEN, B.; ECHING, S.; DAVIDOFF, B.; FRAME, K. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. **Journal Irrigation Drain. Eng.** 131(1), 73-84, 2005.

TRAJKOVIC, S. Temperature – based approaches for estimating reference evapotranspiration, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 131, p. 316-323, 2005

TURCO, J.E.P., PINOTTI JR, M., PAVANI, L.C., FERNANDES, E.J. Técnica para Determinação de Erros em Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência. **Engenharia Agrícola**. Campinas. v.14, p.29-37, 1994.

TURCO, J.E.P., PINOTTI JÚNIOR, M., COELHO, R.L. Determinação da acurácia de instrumentos de medidas para obter a evapotranspiração de referência com erros fixados. **Engenharia Agrícola**. Botucatu, v.17, n.1, p.44-52, 1997.

TURCO, J.E.P.; FERNANDES, E.J. Construção e avaliação de um PSCrômetro de termopares. **Engenharia Agrícola**, v.23,n.3 p. 468-476, 2003.

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, agosto-outubro, 2005.

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

UBERABA EM DADOS. Caracterização do Município. **Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico e Turismo**. Disponível em

<http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/desenvolvimento_economico/arquivos/uberaba_em_dados/Edicao_2009/capitulo_01.pdf>. Acesso em 22 de jun. de 2011.

VANZELA, L.S.; HERNANDEZ, F.B.T.; FERREIRA, E.J.S. Desempenho da estimativa da evapotranspiração de referência em Ilha Solteira – SP. **In: XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Bonito – MS. 30/07 a 02/08/2007.

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**. Jaboticabal, v.25, n.3, p. 713-721, 2005.

VIENELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. p.133-200.

WUTKE, E.B.; ARRUDA, F.B.; FANCELLI, A.L.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G.M.B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.24, n.3, p.621-33, 2000.