



UFRJ

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA FINS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO

Alexandre da Silva Pinheiro de Souza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadora: Célia Maria Paiva

Rio de Janeiro

Agosto de 2011

Souza, Alexandre da Silva Pinheiro de.

Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo de irrigação/Alexandre da Silva Pinheiro de Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2011.

xiv, 70 f.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Célia Maria Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN
Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2011.

Referências Bibliográficas: f. 55-70.

1. Evapotranspiração de Referência. 2. Avaliação de Métodos. 3. Manejo da Irrigação. I. Paiva, Célia Maria. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Título.

*A Tilma Campagnoli do Nascimento, de
quem eu nunca me esquecerei e sei que ela estará sempre olhando por mim.*

AGRADECIMENTOS

Como sempre na minha vida, agradeço a Deus por me abençoar nessa caminhada.

A professora Célia Maria Paiva, pela grande oportunidade e por depositar bastante confiança em mim.

A minha esposa Solange, aos meus filhos Rafael e Mariana por acreditarem nesse meu objetivo.

Ao meu irmão Oduvaldo por todo apoio.

A todos os professores que estiveram presentes na minha vida e contribuíram para minha educação.

A CAPES pela bolsa de doze meses concedida para custear o meu curso durante a maior parte do trabalho e depois como complemento nove meses pela bolsa da FAPERJ.

À secretaria da pós-graduação, por toda a atenção.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA FINS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO

Alexandre da Silva Pinheiro de Souza

Orientadora: Célia Maria Paiva

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

O conhecimento da evapotranspiração das culturas é muito importante para o manejo da irrigação. A equação FAO56 Penman-Monteith tem sido recomendada pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) como método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Entretanto, esse método requer variáveis meteorológicas que em geral não são medidas nas estações meteorológicas no Brasil. Por isso, o objetivo deste estudo foi avaliar cinco métodos empíricos e comparar seus desempenhos com o de Penman-Monteith para as condições climáticas da região de Piraí do Sul no Estado do Paraná. Para tanto, foram utilizados dados meteorológicos registrados por uma plataforma de coleta de dados durante o período de 04/07/2008 a 12/10/2008 em uma cultura de trigo. Os resultados indicam que a ET_o pode ser estimada adequadamente pelos métodos da Radiação Solar, Jensen-Haise e Makkink.

Palavras chave: (Agrometeorologia; Evapotranspiração de Referência; Avaliação de Métodos; Manejo da Irrigação).

Rio de Janeiro

Agosto/2011

ABSTRACT

EVALUATION OF METHODS FOR ESTIMATION REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR IRRIGATION WATER MANAGEMENT

Alexandre da Silva Pinheiro de Souza

Advisors: Célia Maria Paiva

Abstract da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

Knowledge of the evapotranspiration of the cultures is very important regarding activities connected to water management of the irrigated agriculture. The equation of Penman-Monteith FAO-56 has been recommended by FAO, the Food and Agriculture Organization of the United Nations, as the standard for estimating reference evapotranspiration (ET_o). But this equation requires many variables that are not available at most weather stations in Brazil. Therefore, the aim of this study was to analyze the five empirical methods to estimate reference evapotranspiration (ET_o) and compare with the Penman-Monteith FAO-56 for the climatic conditions in the city of Pirai do Sul, Paraná state, Brazil. The meteorological data were measured for the period 04/07/2008 to 12/10/2008 for an automatic weather station during the growing season of wheat crop. The results shows that, for the climatic conditions of the studied location, the best methods to estimate reference of evapotranspiration were: Radiação Solar, Jensen-Haise and Makkink. The worst performance were presented by the method of Hargreaves-Samani, followed by the method of Camargo.

Key words: (Agrometeorology; Reference Evapotranspiration; Irrigation Water Management).

Rio de Janeiro

Agosto/2011

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTARCT.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Motivação e justificativas.....	1
1.2.Objetivos e metas.....	4
1.3.Escopo do trabalho.....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Considerações iniciais.....	6
2.2. Conceitos teóricos sobre evapotranspiração.....	7
2.2.1. A física da evapotranspiração.....	7
2.2.2. Importância da evapotranspiração para o manejo de irrigação.....	10
2.2.3. Medida da evapotranspiração.....	11
2.2.4. Estimativa da evapotranspiração.....	12
2.2.5. Evapotranspiração e produtividade agrícola.....	14
2.3. A cultura do trigo.....	15
2.4. Estado da arte na determinação da evapotranspiração.....	16
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	30
3.1. Área de estudo e dados utilizados.....	30
3.2. Estimativa da evapotranspiração.....	32
3.2.1. Evapotranspiração de referência pelo método FAO56 Penman-Monteith.....	32
3.2.2. Evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves.....	33
3.2.3. Evapotranspiração de referência pelo método de Camargo.....	33
3.2.4. Evapotranspiração de referência pelo método de Jensen-Haise.....	34
3.2.5. Evapotranspiração de referência pelo método da Radiação Solar.....	34
3.2.6. Evapotranspiração de referência pelo método de Makkink.....	35
3.3. Avaliação da influência das variáveis meteorológicas no fenômeno da ET_o	35
3.4. Avaliação das estimativas da evapotranspiração real.....	35

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1. Evapotranspiração de referência.....	38
4.2. Comparação entre as estimativas da ET_o por FAO56 Penman-Monteith e as variáveis meteorológicas.....	38
4.3. Avaliação da estimativa da evapotranspiração de referência.....	44
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	54
Referências Bibliográficas.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização da Fazenda Cambará em Piraí do Sul, Estado do Paraná	31
Figura 3.2 - Plataforma de coleta de dados instalada na Fazenda Cambará, Piraí do Sul – PR	31
Figura 3.3 – Etapas para a avaliação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência	32
Figura 4.1 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a umidade relativa do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo	41
Figura 4.2 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a temperatura mínima do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo	41
Figura 4.3 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a temperatura média do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo	42
Figura 4.4 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a temperatura máxima do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo	42
Figura 4.5 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a radiação solar global durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo	43
Figura 4.6 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a intensidade do vento durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo	43
Figura 4.7 – ET_o estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Hargreaves para todo o ciclo da cultura de trigo no campo	45
Figura 4.8 – ET_o estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Camargo para todo o ciclo da cultura de trigo no campo	45
Figura 4.9 – ET_o estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Makkink para todo o ciclo da cultura de trigo no campo	46
Figura 4.10 – ET_o estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Jensen-Haise para todo o ciclo da cultura de trigo no campo	46
Figura 4.11 – ET_o estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Radiação Solar para todo o ciclo da cultura de trigo no campo	47
Figura 4.12 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Hargreaves	50
Figura 4.13 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Camargo	50

Figura 4.14 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Makking	51
Figura 4.15 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Jensen-Haise	51
Figura 4.16 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Radiação Solar	52

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 - Tendência da ET em função dos fatores que a influenciam	10
Tabela 3.1 – Valores do coeficiente de confiança e sua classificação	36
Tabela 3.2 – Valores do coeficiente de correlação e sua classificação	37
Tabela 4.1 – Coeficientes de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2) entre a ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e as variáveis meteorológicas que a governam	39
Tabela 4.2 – Valores do desvio médio absoluto (DMA), Desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2)	49
Tabela 4.3 – Coeficientes de determinação (r) entre os métodos de estimativa da ET_o avaliados	52
Tabela 4.4 – Valores de ET_o total durante o ciclo da cultura e seus desvios absolutos e relativos em relação ao método FAO56 Penman-Monteith	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

c	Coefficiente de Confiança
CA	Condições Agronômicas
Cfb	Clima Temperado
CO ₂	Dióxido de Carbono
d	Índice de Concordância ou Índice de Willmott
Δ	Tangente à Curva de Pressão de Vapor
DMA	Desvio Médio Absoluto
DMR	Desvio Médio Relativo
e_a	Pressão de Vapor Atual
EF	Estádio Fenológico da Cultura
ET	Evapotranspiração
ET _o	Evapotranspiração de uma Cultura de Referência
ET _{o_CM}	Evapotranspiração de Referência pelo Método de Camargo
ET _{o_HG}	Evapotranspiração de Referência pelo Método de Hargreaves
ET _{o_JH}	Evapotranspiração de Referência pelo Método de Jasen-Haise
ET _{o_MK}	Evapotranspiração de referência pelo Método de Makkink
ET _{o_FPM}	Evapotranspiração de referência pelo Método FAO56 Penman-Monteith
ET _{o_RS}	Evapotranspiração de referência pelo Método da Radiação Solar
e_s	Pressão de Vapor de Saturação
ET _r	Evapotranspiração Real da Cultura no Campo
F	Fator de Ajuste do Método de Camargo
f	Função de
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (<i>Food and Agriculture Organization</i>)
γ	Constante Psicrométrica
K _c	Coefficiente da Cultura
K _s	Coefficiente de Água no Solo
L	Calor Latente de Evaporação
LE	Fluxo de Calor Latente
N	Número de Estimativas
O	Evapotranspiração Estimada pelo Método de FAO-56 Penman Monteith
O ₂	Oxigênio

P	Evapotranspiração Estimada pelo Método em Avaliação
PC	Porte da Cultura
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
r	Coefficiente de Correlação
r^2	Coefficiente de Determinação
R_a	Radiação Solar no Topo da Atmosfera Total Diária
R_g	Radiação Solar Global
R_l	Saldo de Radiação
S	Fluxo de Calor Sensível para o Solo
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
T	Temperatura
T_{ar}	Temperatura do Ar
T_{max}	Temperatura do Ar Máxima Diária
T_{min}	Temperatura do Ar Mínima Diária
TAS	Teor de Água no Solo
U	Intensidade do Vento
U_2	Intensidade do Vento Média Diária Medida a 2 Metros
UR	Umidade Relativa do Ar

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.4. Motivação e justificativas

Em pleno século XXI, a humanidade depara-se com problemas em relação à escassez da água, um recurso indispensável à vida no planeta Terra. Ao contrário das gerações passadas, na atual, o conceito de que água é um recurso renovável não se aplica mais. Como tal deve ser bem utilizada, bem distribuída e aplicada.

A água é um recurso estratégico para a humanidade, sendo essencial para manter a vida no planeta Terra, sustentar a biodiversidade e para a produção de alimentos. A água, portanto, tem importância ecológica, econômica e social. Nenhuma civilização terá sua sobrevivência, seu desenvolvimento cultural, social e econômico garantidos sem esse recurso natural.

Segundo Tundisi e Tundisi (2005), em termos quantitativos, tem-se que 97,5% da água do planeta encontra-se nos oceanos, portanto água salgada. Dos 2,5% de água doce: 68,9% estão congeladas nas calotas polares e geleiras; 29,9% são águas subterrâneas; 0,3% estão nos rios e lagos; e 0,9% em outros reservatórios. Assim, as águas doces, que constituem os rios e lagos nos continentes, e as águas subterrâneas são relativamente escassas, sendo uma pequena fração dos recursos hídricos disponíveis do planeta. Além disso, a distribuição das águas doces no planeta é desigual, pois depende das relações entre evaporação e a precipitação e a capacidade da reserva de água na superfície (lagos e rios) e nas águas subterrâneas. O Brasil possui entre 12% e 16% das águas doces do planeta. No entanto, os volumes de água *per capita* variam bastante ao longo de seu território, tendo em vista a distribuição de água e a densidade da população diferenciada por região. Os usos múltiplos causam grandes impactos nas águas superficiais e subterrâneas em várias regiões, devido principalmente às atividades agrícolas (irrigação) e industriais.

As fontes de água doce têm sofrido nos últimos cem anos em razão de um conjunto de atividades humanas sem precedentes na história. Diversos fatores têm produzido crises de abastecimento e crises na qualidade das águas (desmatamento, ocupação de bacias hidrográficas, construção de hidrovias, urbanização acelerada, usos intensivos das águas superficiais e subterrâneas na agricultura e na indústria, etc.). O aumento intenso de demanda diminui a disponibilidade de água líquida e, coloca em perigo os usos múltiplos, a expansão econômica e a qualidade de vida das populações.

Esse conjunto de problemas levou à atual situação da água, uma crise que demanda ações de curto, médio e longo prazo. Em função disso, a últimas resoluções das Nações Unidas sobre o problema da água implementou a Década Mundial da água a partir de 2005, visando o gerenciamento dos recursos hídricos integrado ao nível de bacias hidrográficas, que promova uma alteração substancial na demanda e diminuam desperdícios.

A crescente demanda por água doce, devido a um maior desenvolvimento econômico e populacional mundial, tanto na agricultura como para outros fins, e sua potencial escassez, exigem um uso racional desse recurso. Sendo esse um recurso finito, pode ocorrer, em alguns locais, uma tendência à exaustão das reservas de água de boa qualidade, inviabilizando determinados usos essenciais, como o abastecimento humano e a produção de alimentos (Carmo *et al.*, 2005).

Aperfeiçoar a gestão dos recursos hídricos é o primeiro passo para sua conservação. Nesse sentido, a evapotranspiração, como uma das componentes do balanço de água, é de grande utilidade em climatologia, para a quantificação das disponibilidades hídricas regionais (Cardoso e Marcelino, 2005). A estimativa das perdas por evaporação e transpiração é de grande importância para atividades como projetos de irrigação, gerenciamento de reservatórios e planejamento de uso e outorga de recursos hídricos, entre outras (Borges e Mendiondo, 2005).

Hoje, a demanda hídrica para a agricultura é um fator crítico. De acordo com Christofidis (2001), calcula-se que 70% do consumo de água das atividades humanas seja destinado para a prática de irrigação no setor agrícola. Inevitavelmente, o uso intensivo da água para a agricultura afeta negativamente as reservas hídricas. O conhecimento da oferta hídrica e o manejo adequado da irrigação permite um maior aproveitamento dos recursos hídricos e o retorno econômico dos investimentos (Araújo *et al.*, 2005).

O consumo de água pelas culturas é expresso na forma de evapotranspiração. Segundo Borges e Mendiondo (2005), evapotranspiração é a perda de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade do solo. Essa é uma variável de extrema importância para a modelagem hidrológica e para a racionalização do uso da água na agricultura.

A determinação da evapotranspiração em condições de campo não é uma tarefa fácil, uma vez que sua medida depende de métodos pouco adequados para fins operacionais de manejo de irrigação. Dentre tais métodos pode-se citar o lisímetro, a

razão de Bowen, a correlação turbulenta, a determinação da umidade do solo, entre outros. Entretanto, além de pouco práticos, envolvem custos elevados para sua implementação e manutenção, o que torna tal aplicação muitas vezes proibitiva.

Objetivando a simplificação de tais cálculos, definiu-se o conceito de evapotranspiração de referência (Allen *et al.*, 1998), que necessita apenas de dados meteorológicos para sua quantificação, podendo ser ajustada posteriormente às condições específicas de vegetação e umidade do solo (Mantovani, 1993). Para a quantificação dessa grandeza, utilizam-se modelos empíricos ou ditos determinísticos com embasamento físico (Soares *et al.*, 2003, citados por Borges e Mendiondo, 2005). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization* –FAO) recomenda o uso do método de Penman-Monteith para a estimativa de evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998). Entretanto, esse modelo apresenta um nível de exigência de dados de entrada que dificultam sua aplicação, uma vez que tais elementos meteorológicos nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões. Carmo *et al.* (2005) mencionam que dados e informações são insuficientes ou não acessíveis para se promover uma adequada avaliação dos recursos hídricos, tornando os problemas mais graves nessa área. Nesses casos, a alternativa, seria o uso de equações simplificadas ou empíricas, que, conseqüentemente, perdem muito da realidade física, que é compensada ou substituída por relações estatísticas oriundas de experimentos de campo. Essas equações empíricas são razoavelmente boas para o local onde foram calibradas. No entanto, para fornecerem estimativas precisas fora das condições em que foram definidas, precisam ser avaliadas e ajustadas regionalmente (Mantovani, 1993).

Por outro lado, o que se observa em âmbito nacional é o uso inadequado de equações empíricas. Vale ressaltar que tal prática é motivada, muitas vezes, pela falta de dados para avaliação e calibração local dessas equações, antes de sua utilização. Vepraskas *et al.* (2006) mencionam que os erros de estimativa da evapotranspiração são uma das maiores fontes de erros para os modelos hidrológicos. Nesse sentido, fazem-se necessários estudos que determinem os erros médios de tais equações empíricas para diferentes condições climáticas, tendo em vista que a evapotranspiração é uma variável crucial para a modelagem hidrológica.

1.5. Objetivos e metas

Este trabalho é parte de um projeto mais amplo cujo objetivo é avaliar intensivamente e extensivamente, em todo o território nacional, diferentes métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência, que diferem entre si em complexidade e necessidades de dados meteorológicos. O intuito é determinar, paulatinamente, para as mais variadas condições climáticas do território nacional, uma classificação e ordenamento dos métodos mais confiáveis e os níveis de erro que se comete ao utilizá-los em diferentes condições, comparando-os à equação FAO56-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), em princípio, a que melhor explica a realidade física do processo em questão. Essa classificação poderá fornecer subsídios importantes aos pesquisadores na escolha do método mais adequado às condições de campo.

Mas especificamente, a análise do presente estudo abordará equações empíricas, com diversos graus de complexidade, que terão suas estimativas de evapotranspiração de referência confrontadas com a equação FAO56-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para a região agrícola de Piraí do Sul no Estado do Paraná. Os métodos avaliados serão: Hargreaves, Camargo, Makkink, Jessen-Haise e Radiação Solar.

Para tanto as seguintes metas deverão ser alcançadas:

- 1.1) Determinar a evapotranspiração de referência pelo método padrão FAO56-Penman-Monteith.
- 1.2) Determinar a evapotranspiração de referência pelos métodos empíricos Hargreaves, Camargo, Makkink, Jessen-Haise e Radiação Solar.
- 1.3) Avaliar o desempenho dos métodos empíricos em relação ao método padrão por meio de índices estatísticos.
- 1.4) Classificar os métodos em ordem de desempenho para a região de estudo.

1.6. Escopo do trabalho

De acordo com a presente abordagem, a determinação da evapotranspiração é fundamental para uma gestão eficiente dos recursos hídricos na agricultura. Em consequência disso, este estudo abordará questões relativas à quantificação da evapotranspiração, contemplando os problemas envolvidos e as soluções viáveis para esse fim. Para tanto, o documento foi organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 versa sobre a motivação, caracterização do problema, justificativa e objetivos envolvidos no tema. Em seguida, no Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda os conceitos teóricos e o estado da arte no que se refere à descrição do fenômeno da evapotranspiração e de sua estimativa. No capítulo 3, descreve-se a região de estudo, os dados e métodos utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência. Por fim, nos Capítulos 4 e 5, são apresentados e discutidos os resultados e as conclusões advindas deste estudo, respectivamente.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações iniciais

Existem dois processos naturais no ciclo hidrológico pelos quais a água faz o caminho de volta para a atmosfera. O primeiro processo é a evaporação de corpos d'água e da água estocada nos solos. O segundo é a transpiração dos vegetais, processo semelhante ao que ocorre com os seres humanos. Para fins de manejo da irrigação, em que se faz necessário a determinação do balanço de água no solo, ou seja, mensurar as entradas e saídas de água nesse reservatório hídrico natural para plantas, a combinação desses dois processos é denominada evapotranspiração. Nesse contexto, a evapotranspiração é definida como a soma da perda de água pela evaporação do solo e pela transpiração da cobertura vegetal, sendo, portanto, uma grandeza que entra no cálculo da quantidade de água a ser aplicada em culturas irrigadas.

Segundo a literatura (Ferri, 1985; Larcher, 2000; Mavi e Tupper, 2004; Pereira *et al*, 1997; Rosenberg, 1983), a importância da evapotranspiração para planta está associada ao processo de diminuição de sua temperatura e à absorção de nutrientes do solo. A transpiração evita que as folhas sofram superaquecimento pela incidência direta da radiação solar, pois parte da energia absorvida é utilizada na evaporação da água (cerca de $2450 \text{ J.g}^{-1} = 245 \text{ J.mm}^{-1}$). No caso de haver deficiência hídrica na planta, essa energia não é dissipada havendo aumento da temperatura da folha, que pode chegar a níveis prejudiciais. A água do solo contendo nutrientes dissolvidos é absorvida pelas raízes e transportada por toda a planta. Os nutrientes são utilizados no interior das plantas juntamente com uma porção mínima de água. Praticamente toda a água absorvida, depois de percorrer toda a planta levando nutrientes, chega à cavidade estomática onde transforma-se em vapor. O vapor na cavidade estomática é transferido para a atmosfera através dos estômatos abertos.

Segundo Silva e Amaral (2008), a Evapotranspiração (ET), extremamente importante no computo do Balanço Hídrico para fins de irrigação, é um processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera através da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas. O conhecimento da evapotranspiração real é fundamental para a outorga de água, para dimensionar e manejar a irrigação de uma cultura. Assim, a evapotranspiração de qualquer cultura é uma das principais

informações necessárias para o manejo racional da irrigação e para fins de planejamento do uso da água.

2.2. Conceitos teóricos sobre evapotranspiração

2.2.1. A física da evapotranspiração

Os conceitos teóricos (Allen *et al*, 1998; Burman e Pochop, 1994; Jessen *et al.*, 1990; Pereira *et al*, 1997) definem os processo físicos de interesse neste estudo da seguinte forma:

Evaporação é o processo pelo qual a água líquida é transformada em vapor (vaporização) e removido da superfície evaporante. É um fenômeno que exige o suprimento de energia externa sendo, portanto, um processo de transformação de calor latente em calor sensível.

Transpiração é a evaporação da água que foi utilizada nos diversos processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Essa evaporação se dá através dos estômatos que são estruturas de dimensões microscópicas (< 50 µm) que ocorrem nas folhas (de 5 a 200 estômatos mm⁻²) por onde se efetuam as trocas gasosas - CO₂, O₂ e vapor de água - entre a planta e a atmosfera e, que na maioria das plantas, permanecem abertos durante o dia e fechados durante a noite e nas condições de acentuado estresse hídrico. Fisicamente é um processo idêntico à evaporação.

Por sua vez, a evapotranspiração é o processo combinado de evaporação na superfície do solo e de transpiração da superfície da planta.

A mudança de estado das moléculas de água líquida para vapor requer uma quantidade de energia denominada de Calor Latente de Evaporação (L) ou a quantidade de energia necessária para evaporar a massa de 1 grama de água estando esta a temperatura T:

$$L = 2497 - 2,37 \times T \quad [\text{J.g}^{-1}] \quad (2.1)$$

Essa energia é fornecida pela radiação solar direta e pela temperatura ambiente do ar. A força motriz que remove o vapor de água da superfície evaporante é a diferença

de pressão de vapor entre essa superfície evaporante e a atmosfera. A medida que esse processo vai ocorrendo o ar torna-se gradualmente mais úmido e a velocidade com que o vapor de água é transferido para atmosfera diminui, podendo cessar, caso o ar fique saturado e não seja renovado. A substituição do ar saturado por ar seco depende fortemente da intensidade do vento. Portanto, a radiação solar, a temperatura e umidade do ar e intensidade do vento são variáveis meteorológicas que afetam o processo de evaporação.

Evaporação e transpiração ocorrem simultaneamente, não sendo fácil distinguir um processo do outro. Em um solo vegetado, a água evaporada de sua superfície é controlada principalmente pela porção de radiação solar que atinge essa superfície. Essa fração de radiação que atinge o solo diminui à medida que a vegetação cresce e cobre gradativamente todo o solo. Quando a vegetação é pequena a água é perdida principalmente por evaporação, mas quando a vegetação está na fase adulta cobrindo todo o solo, a transpiração torna-se predominante. A transpiração, assim como a evaporação, depende:

- i) De um suprimento de energia para ocorrer;
- ii) Da existência de um gradiente de vapor de água entre a superfície evaporante e a atmosfera;
- iii) Da quantidade de água no solo;
- iv) Das características, estágio de desenvolvimento e condições agronômicas da cultura.

Pode-se expressar o processo físico da evapotranspiração como uma função dos fatores que influenciam sua intensidade, a saber, segundo Allen *et al.* (1998), Burman e Pochop (1994), Jessen *et al.* (1990), Pereira *et al.* (1997):

$$ET = f(\text{ATMOSFERA, PLANTA, CONDIÇÕES AGRONÔMICAS, TEOR DE ÁGUA NO SOLO})$$

onde,

ET: evapotranspiração [mm.dia^{-1}];

ATMOSFERA: representa o conjunto de condições atmosféricas que influenciam a ocorrência da evapotranspiração, ou seja, a radiação solar global (R_g) e a temperatura do ar (T_{ar}) que cumprem o papel de suprimento de energia para o processo; a umidade

relativa do ar (UR) e a intensidade do vento (U) que expressam a capacidade da atmosfera em receber vapor de água e de remover o ar úmido sobre a superfície evaporante para que o ar não sature e dessa forma o processo possa ter continuidade. Em síntese, esse fator representa a demanda atmosférica ou a capacidade da atmosfera em absorver vapor d'água. PLANTA: representa o porte (PC) e o estágio fenológico (EF) da cultura. Esses aspectos influenciam o processo na medida em que uma planta de pequeno porte transpira menos que uma planta de médio porte, que por sua vez transpira menos que uma de grande porte. Assim, nas mesmas condições ambientais, por exemplo, uma planta de alface consome menos água que uma planta de milho que consome menos que uma árvore. Para uma mesma planta, o seu estágio fenológico irá contribuir no consumo de água na medida em que uma planta jovem e pequena, em crescimento, irá transpirar menos que uma planta da mesma espécie na fase adulta, quando alcançou seu tamanho definitivo.

CONDIÇÕES AGRONÔMICAS (CA): representa as condições de sanidade da cultura e de nutrientes no solo. Nesse sentido, uma planta acometida por praga ou doença, em geral tem suas folhas danificadas e sua capacidade de transpirar reduzida, uma vez que as folhas são o aparato por onde as plantas transferem, através dos estômatos, vapor d'água para a atmosfera. Da mesma forma, a deficiência de determinados nutrientes no solo pode levar a uma alteração prejudicial da transpiração, fazendo com que a planta transpire menos ou mais que suas reais necessidades na tentativa de compensar tal condição desfavorável.

TEOR DE ÁGUA NO SOLO (TAS): representa a quantidade de água disponível para a evapotranspiração. Se o solo estiver seco ou com um teor insuficiente de água, mesmo que as condições atmosféricas e da cultura estejam favoráveis ao processo, a evapotranspiração se anula ou se reduz drasticamente.

Portanto, a taxa em que o processo da evapotranspiração ocorrerá no campo será uma combinação das intensidades dos fatores que a governam. Entretanto, pode-se analisar a influência isolada de cada fator para um melhor entendimento do fenômeno. Nesse sentido, será apresentado a seguir um quadro em que a tendência de cada fator que influencia a intensidade (taxa) da evapotranspiração é analisada isoladamente. Por esse quadro observa-se que entre os fatores atmosféricos, o aumento em magnitude da radiação solar global (R_g), da temperatura do ar (T_{ar}) e do vento (U) tendem a aumentar a demanda atmosférica e, portanto, taxa de evapotranspiração, sendo que a sua diminuição tende a reduzi-la. Por outro lado, a taxa de ET tem um comportamento

inverso ao da umidade relativa do ar (UR). Em relação à planta, uma cultura de pequeno porte ou ainda jovem transpira menos e vice-versa. Boas condições agronômicas serão favoráveis a uma adequada taxa da ET para a cultura, o contrário não. Um solo úmido permite que a evapotranspiração responda à tendência favorável dos demais fatores à ET, já um solo seco não. Isso significa que se os fatores atmosféricos, da planta e agronômicos tenderem a aumentar a ET, isso só ocorrerá se houver um teor suficiente de água no solo.

Quadro 2.1 - Tendência da ET em função dos fatores que a influenciam.

Fator	R _g	T _{ar}	UR	U	PC	EF	CA	TAS	Interpretação
Tendência do fator	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↓↑	↓↑	↑↓	↑↓	↑: aumento na magnitude do fator ou condição ótima do mesmo. ↓: diminuição na magnitude do fator ou condição limitante do mesmo.
Tendência da ET	↑↓	↑↓	↓↑	↑↓	↓↑	↓↑	↑↓	↑↓	↑: aumento na intensidade da ET. ↓: diminuição na intensidade da ET.

2.2.2. Importância da evapotranspiração para o manejo de irrigação

A importância e vantagens do uso da técnica de irrigação na agricultura está amplamente documentada na literatura. A seguir será dada uma síntese de sua importância com base nos principais especialistas da área (Allen *et al*, 1998; Burman e Pochop, 1994; Doorenbos e Kassam, 1979; Jessen *et al.*, 1990; Pereira *et al*, 1997; Ramos *et al*, 2000, Salassier *et al.*, 2006).

A irrigação é uma técnica de manejo agrícola que propicia o aumento da produtividade reduzindo os riscos de perdas ocasionados por períodos de estiagem. No entanto, muitas vezes, o agricultor pensa que adquirir um sistema de irrigação é

suficiente para obter níveis elevados de produtividade, esquecendo-se que é preciso adotar técnicas que possibilitem aplicar a água no momento certo e na quantidade necessária às plantas. O manejo da irrigação consiste em monitorar e quantificar, periodicamente, o consumo de água pelas plantas. Sua adoção poderá trazer benefícios como economia de água e energia, com melhor aproveitamento dos recursos hídricos, preservando o ambiente, reduzindo conflitos de uso de água, além de aumentar a renda do produtor.

2.2.3. Medida da evapotranspiração

De acordo com Pereira *et al.* (1997), a taxa de evapotranspiração é normalmente expressa em milímetros (mm) por unidade de tempo. Essa taxa expressa a quantidade de água perdida por uma superfície vegetada em unidade de altura de água. A unidade de tempo pode ser em hora, dia, decênio, mês ou todo o período de crescimento da cultura ou ano. As unidades utilizadas são descritas a seguir:

$$1 \text{ hectare (ha)} = 10.000 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$$

$$1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

$$1 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1} = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$$

A altura de água pode ser expressa também em termos de energia recebida por unidade de área. Essa energia refere-se à quantidade necessária de energia ou calor requerida para evaporar a água, denominada de calor latente de vaporização (L), que é função da temperatura da água. Para evaporar 1,0 mm de água é necessário uma quantidade de energia igual a 2,45 MJ.m⁻². A taxa de evapotranspiração expressa em unidades de MJ.m⁻².dia⁻¹ é representada pelo fluxo de calor latente (LE).

$$1 \text{ mm} = 2,45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$$

A determinação da evapotranspiração no campo pode ser efetuada por métodos de medida direta como a utilização de lísimetro que computa o balanço de água no solo ou por medida indireta com a aplicação de métodos micrometeorológicos tais como o da correlação turbulenta/balanço de massa e razão Bowen/balanço de energia (Allen *et al.*,

1998; Burman e Pochop, 1994; Jessen *et al.*, 1990; Pereira *et al.*, 1997; Salassier *et al.*, 2006). No entanto, tais medidas não são de fácil realização, sendo necessário operadores treinados para sua exatidão. Esses métodos são bastante onerosos e impróprios para medidas rotineiras, sendo, portanto, interessante a estimativa da ET por meios mais práticos. Para atender a essa necessidade, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization – FAO*), vem promovendo durante décadas pesquisas direcionadas à elaboração de métodos de estimativa da evapotranspiração para fins de manejo de irrigação que sejam práticos e de fácil aplicação por parte dos agricultores. Nesse processo, diferentes métodos foram desenvolvidos e serão comentados a seguir.

2.2.4. Estimativa da evapotranspiração

Os métodos desenvolvidos pela FAO estimam a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o). Ou seja, a ET_o é definida como a evapotranspiração de uma superfície com grama batatais adulta saudável, cobrindo totalmente o solo, sem limitações de água e nutrientes no solo, isto é, em ótimas condições hídricas e agronômicas. Nesse caso, só falta a informação sobre as condições da atmosfera para se calcular a evapotranspiração da grama. Como a ET_o só depende das condições atmosféricas para ser calculada, isso significa que ela representa a demanda evaporativa da atmosfera, ou seja, a quantidade máxima de água que a grama adulta em ótimas condições hídricas e agronômicas poderia perder para a Atmosfera. Dessa forma, segundo Allen *et al.*, (1998), Burman e Pochop (1994), Doorenbos e Kassam (1979), Jessen *et al.* (1990):

$$ET_o = f(\text{ATMOSFERA})$$

Porque nas equações já estão embutidas as demais informações, a saber:

- * A Planta (espécie, variedade e estágio fenológico): grama batatais adulta.
- * Condições Hídricas do solo: solo com ótimas condições hídricas para a cultura.
- * Condições Agronômicas: solo fértil e planta saudável sem pragas ou doenças.

Para se ter a evapotranspiração da cultura real no campo, é necessário ajustar a ET_o . Esse ajuste se faz embutindo no cálculo as informações sobre a cultura real e as

condições hídricas e agronômicas reinantes no campo, ou seja, de acordo com Allen *et al.* (1998), Burman e Pochop (1994), Doorenbos e Kassam (1979), Jessen *et al.* (1990):

$$ET_r = ET_o \times K_c \times K_s \quad (2.2)$$

onde,

ET_r : é a evapotranspiração real, representando a evapotranspiração da cultura no campo [mm.dia⁻¹].

ET_o : é a evapotranspiração de referência, representando a demanda atmosférica [mm.dia⁻¹].

K_c : é o coeficiente da cultura real no campo, representando a espécie, variedade, estágio fenológico, ocorrência ou não de doenças e pragas e as condições de nutrientes no solo (Allen *et al.*, 1998; Doorenbos e Kassam, 1979; Jessen *et al.*, 1990; Ramos *et al.*, 2000).

K_s : é o coeficiente de água no solo que pode variar de zero a 1,0 para condição de solo seco até solo saturado, respectivamente (Allen *et al.*, 1998; Jessen *et al.*, 1990).

Entre os métodos de estimativa de ET_o , encontram-se os denominados físicos matemáticos que representam com mais fidelidade a física envolvida na evapotranspiração e aqueles intitulados empíricos que não possuem uma significação física, representando uma relação puramente matemática ou estatística entre a ET_o e as variáveis atmosféricas medidas localmente (Allen *et al.*, 1998; Burman e Pochop, 1994; Doorenbos e Kassam, 1979; Jessen *et al.*, 1990; Salassier *et al.*, 2006). Assim, os métodos com embasamento físico representam bem o processo da ET_o em qualquer região e condições climáticas. Já os métodos empíricos, desenvolvidos especificamente para uma determinada condição climática, podem não funcionar bem para regiões distintas daquela para a qual foi desenvolvido. Diante desse fato, faz-se necessário avaliar o desempenho dos diferentes métodos empíricos antes de utilizá-los em uma determinada região para fins de manejo de irrigação. Assim, pode-se estabelecer os erros associados a cada método e ter-se a definição do mais indicado para a região de interesse em função da magnitude de seus erros.

A FAO recomenda o uso do método de FAO56 Penman-Monteith, um método físico matemático, para a estimativa da ET_o (Allen *et al.*, 1998). Entretanto, esse método apresenta um nível de exigência de dados de entrada que dificultam sua aplicação, uma

vez que tais elementos meteorológicos nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões. Nesses casos, a alternativa seria utilizar métodos empíricos com uma menor exigência em termos de dados meteorológicos e que tenham sido avaliados regionalmente. Para proceder tal avaliação, a FAO indica como método padrão o FAO56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) utilizado amplamente para esse fim.

2.2.5. Evapotranspiração e produtividade agrícola

Embora, contabilize apenas 5% da nutrição da planta, os nutrientes do solo tem um papel importante no metabolismo vegetal e, conseqüentemente, no crescimento, desenvolvimento e produtividade agrícola. A cultura só consegue absorver esses nutrientes, se eles estiverem dissolvidos em água, ou seja, na forma de uma solução nutritiva. Através do processo da evapotranspiração, a planta absorve tal solução nutritiva e a distribui por todo o seu organismo. Quando a água alcança as folhas, estando os estômatos abertos (poros), ela passa para a atmosfera na forma de vapor. Caso haja restrição de água no solo, a planta tende a fechar os estômatos para evitar um estresse hídrico. Com o fechamento dos estômatos, a solução nutritiva cessa de circular pela planta. Adicionalmente, as trocas gasosas entre a planta e a atmosfera, envolvidas na fotossíntese, também cessam devido a esse fechamento. Perdurando tal condição, a produtividade da cultura pode ser afetada, tendo em vista que os processos envolvidos em sua nutrição e formação de biomassa (fotossíntese e evapotranspiração) pararam de ocorrer.

Assim, a produção de uma cultura depende fortemente da realização da evapotranspiração pela planta, que para ocorrer necessita de um suprimento adequado de água no solo. A deficiência hídrica fica caracterizada sempre que a evapotranspiração real for menor que a evapotranspiração máxima da cultura, ou seja, em condições agronômicas ótimas e de água no solo. Portanto, toda vez que essa relação for inferior a um há deficiência hídrica, e quanto menor for essa relação, maior será a deficiência e seu efeito sobre a produtividade. Em geral, as culturas são mais sensíveis ao déficit hídrico durante a emergência, a floração, e a fase inicial de formação da colheita (frutificação), do que durante o período de crescimento vegetativo e a maturação (Pereira *et al.*, 1997).

2.3. A cultura do trigo

Segundo Castro e Kluge (1999), o trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma planta anual da família das gramíneas e pertence ao grupo dos chamados cereais. A cultura do trigo é bastante flexível quanto às condições climáticas, pelo alto potencial de adaptação (melhoramento genético). As regiões de maior produção de trigo estão concentradas entre os paralelos 30 e 55 dos dois hemisférios, em clima moderadamente seco e temperado. O clima favorável ao trigo é o que apresenta invernos suaves, verões quentes, com alta radiação solar, sem chuvas fortes, com suprimento de água ocasionado principalmente pela umidade do solo. Pode ser cultivado nas regiões subtropicais, desde que haja correção dos excessos de temperatura por meio da altitude.

Os autores relatam que consideram-se no Brasil três regiões distintas, segundo o ciclo vegetativo do trigo: a do ciclo de inverno-primavera; a do ciclo outono-inverno; e a do ciclo de inverno. A primeira região apresenta o inverno mais pronunciado, muito úmido, e o verão quente e moderadamente úmido: Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e sul do Paraná. A segunda região compreende partes da região sul e centro-sul, ao norte das áreas da primeira. O outono e o inverno são frios e úmidos o suficiente para permitirem uma cultura satisfatória. A terceira região corresponde às zonas frias áridas e semi-áridas no nordeste, onde as deficiências hídricas anuais são superiores a 600 mm e a temperatura média dos meses frios é inferior a 24°C. Nessa região, é necessário adotar a irrigação e utilizar variedades tolerantes ao calor. A presença de geadas fora de época, temperaturas demasiadamente altas, a falta de chuvas no início do ciclo ou o excesso de chuvas na formação das espigas são fatores que causam sérios prejuízos à cultura, devendo ser considerados dentro do mapa de aptidão climática.

A seguir serão descritos os principais efeitos de fatores ecológicos sobre a planta de trigo de acordo com Castro e Kluge (1999):

Temperatura - Normalmente, temperaturas maiores de 20°C aceleram o crescimento, enquanto inferiores a 15°C retardam. As consequências serão positivas ou negativas para a produção de grãos, dependendo da fase de desenvolvimento da planta. Temperaturas entre 20°C e 25°C, no início do ciclo, têm efeito positivo no rendimento, por possibilitarem rápido e adequado crescimento da planta. É importante que as temperaturas não sejam superiores a 25°C. A ocorrência dessas temperaturas, associadas à escassez de água disponível, pode resultar em severo estresse,

comprometendo o rendimento do trigo. O trigo é sensível às geadas, cujos danos tomam diferentes formas, dependendo do estágio de desenvolvimento da planta e da temperatura registrada.

Radiação solar - a interceptação da radiação solar pela planta depende do tamanho, da forma, do ângulo e da orientação azimutal das folhas. A radiação solar durante o alongamento do colmo determina o número de espigas por planta e o desenvolvimento das espiguetas (Lazzarotto, 1992; citado por Castro e Kluge, 1999).

Relações hídricas – (Lomas, 1976; citado por Castro e Kluge, 1999), ao revisar as respostas do trigo ao suprimento de água nos diferentes estádios do crescimento, resumiu-as da seguinte forma:

- existe uma acentuada sensibilidade durante a formação dos órgãos reprodutivos e durante a floração. A falta de água nessa época pode diminuir o rendimento, devido à redução do número de grãos por espiga;
- quando as flores começam a se desenvolver, o crescimento das raízes diminui, ou mesmo cessa, exigindo um alto conteúdo de umidade do solo;
- o estágio crítico do desenvolvimento, para a planta, frequentemente coincide com pouca disponibilidade de água no solo e máxima demanda transpiratória, em especial sob condições de baixa umidade atmosférica;
- a irrigação tem o máximo benefício para o rendimento.

2.4. Estado da arte na determinação da evapotranspiração

Neste tópico será abordado o cenário atual do uso de métodos de estimativa da evapotranspiração encontrados na literatura, com o intuito de se ter um panorama recente relativo ao tema.

Pereira *et al.* (1997) mencionam que os métodos de obtenção da evapotranspiração real estão divididos em métodos diretos e indiretos. Os diretos determinam diretamente a evapotranspiração por meio de lisímetros, balanço hídrico e controle da umidade do solo. Sentelhas (2001) inclui os métodos micrometeorológicos na determinação direta da evapotranspiração, sendo métodos difíceis, complexos e onerosos. Essa complexidade baseia-se nas incertezas da representatividade das

medidas, nas dificuldades operacionais e também na variabilidade espacial da superfície. Os indiretos estimam a evapotranspiração real por meio da evapotranspiração de referência (ET_0) e do coeficiente de cultivo (K_c), necessitando de dados meteorológicos para o cálculo da ET_0 . Esses métodos podem ser dos mais simples, que só consideram a temperatura do ar, até os mais complexos que envolvem o balanço de energia. Por sua vez o K_c depende do tipo e do estágio fenológico da cultura. Essa abordagem para a estimativa do consumo de água pelas plantas, as metodologias e os procedimentos de cálculo têm sido apresentados e recomendados pela FAO (Doorembos & Pruitt, 1977; Doorembos & Kassam, 1979; Allen *et al.*, 1998).

Os lisímetros têm sido utilizados por décadas para estudos das relações entre água, solo e plantas. Segundo Kirkham *et al.* (1984; citado por Carvalho *et al.*, 2007), os lisímetros são estruturas destinadas a medir, de maneira precisa, eventos de precipitação, evaporação e drenagem. Campeche (2002) comenta que, inicialmente, os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos. Os lisímetros, quando bem instalados, possibilitam medidas precisas da evapotranspiração (ET), principalmente quando os mesmos são preenchidos corretamente, pois, dessa forma, as camadas de solo no seu interior assemelham-se o máximo possível às camadas de solo da área externa (Silva, 2003). No entanto, Pereira *et al.* (2001) comentam que tais estruturas se justificam apenas em condições experimentais com observações rigorosas das condições de contorno que visam a minimizar os efeitos advectivos principalmente em época de deficiência hídrica.

Sediyama (1996) já alertava das dificuldades em se manter as condições internas e externas dos lisímetros com as mesmas características, pois, normalmente, as plantas tendem a crescer mais no interior do mesmo ou além dos limites de sua borda. Assim, visualmente, a presença do lisímetro deve ser pouco perceptível, constatando que tais efeitos se minimizem. Segundo o autor, as diferenças no crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, provocam perturbação maior no movimento horizontal do ar e aumentam o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, provocando aumento da transpiração do vegetal e maior interceptação da radiação solar incidente. Sentelhas (2001) também chama atenção para esse fato afirmando que, para obter medidas precisas da evapotranspiração, a vegetação no interior do lisímetro deve apresentar as mesmas condições (altura e área foliar semelhantes) da área de contorno.

Os lisímetros equipados com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos (Silva *et al.*, 1999b) e permitem a realização de medidas automatizadas com células de carga instaladas sob a caixa impermeável e são geralmente acopladas a um sistema de aquisição de dados, fornecendo resultados mais confiáveis, e possibilitam a obtenção de medidas em escala horária, representando grande vantagem em relação aos demais tipos de lisímetros (Allen *et al.*, 1991; citado por Carvalho *et al.*, 2007). Conforme Aboukhaled *et al.* (1982; citado por Carvalho *et al.*, 2007), dentre os principais fatores que influenciam nas medições da evapotranspiração nos lisímetros, além dos já citados, destacam-se as suas dimensões, o regime de umidade do solo no interior do mesmo, a espessura das paredes e a altura de suas bordas. Howell *et al.* (1985) afirmam que, para minimizar os efeitos das paredes do lisímetro sobre a evapotranspiração medida, essas devem ser construídas com a menor espessura possível e deve-se reduzir ao máximo a abertura existente entre as paredes interna e externa. Apesar de precisos, os lisímetros de pesagem apresentam alguns problemas que dificultam sua operação em escalas de tempo muito reduzidas. Pereira *et al.* (2001) comentam que dificuldades operacionais são verificadas em dias com chuvas intensas, em sequência de dias com chuvas intermitentes e também em dias sem chuvas, mas com ventos intermitentes. Os autores concluíram que medidas de ET em intervalos inferiores a 60 minutos nem sempre são tão exatas quanto se espera de um sistema admitido como padrão.

Na escolha de um método para a determinação da evapotranspiração, devem ser levados em consideração praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, apresentam limitações, principalmente quanto à instrumentação, o que pode restringir a utilização (Berlato & Molion, 1981; citado por Vescove e Turco, 2005).

Amorim *et al.* (2007) citam que no Brasil, o instrumento que mede a ET mais comum é o lisímetro de lençol freático constante. Para o lisímetro, é fato real a grande inconsistência nas medições da ET_o , devido a problemas instrumentais e operacionais, como por exemplo salinização. Os autores reportam que o modelo Penman Monteith, proposto por Monteith em 1965, é uma alternativa para estimar a ET de uma cultura agrícola. Este modelo foi padronizado pela FAO para estimar evapotranspiração de referência (ET_o), denominado FAO56 Penman-Monteith, e vários pesquisadores comprovaram a eficácia.

Em 1990, os métodos recomendados pela FAO em 1977 (Doorenbos e Pruitt, 1977) foram submetidos a uma revisão feita por especialistas em evapotranspiração, chegando-se à conclusão de que o método de Penman-Monteith apresentava melhores resultados, passando a ser recomendado pela FAO como método-padrão FAO56 Penman-Monteith para estimativa da ET_o (Smith *et al.*, 1990; citado por Vescove e Turco, 2005).

Segundo Mendonça (2008), a FAO sugere fortemente o uso do método FAO56 Penman-Monteith para a estimativa da ET_o por este ser físico e ter sido amplamente avaliado em diferentes condições climáticas com bons resultados. Entretanto, seu uso fica limitado pela exigência de um grande número de variáveis meteorológicas, que em geral não estão disponíveis por não serem medidas operacionalmente. Como alternativa, tem-se os métodos empíricos, os quais, por serem desenvolvidos e calibrados localmente, não podem ter aplicação universal.

De acordo com Silva e Amaral (2008), A evapotranspiração pode ser representada de duas maneiras: a evapotranspiração de referência (ET_o) e a evapotranspiração real (ET_r). A ET_o representa a demanda evaporativa da atmosfera em função das condições climáticas locais, podendo ser estimada facilmente por meio de fórmulas desenvolvidas e testadas para várias condições climáticas. A evapotranspiração real (ET_r) é a quantidade de água realmente utilizada pela cultura no campo, sendo uma componente de saída do balanço hídrico, podendo ser obtida através da ET_o , uma vez que sua medida direta é extremamente difícil e onerosa. Os valores de ET_o podem ser estimados a partir de elementos medidos na estação meteorológica, existindo vários métodos. O critério para adoção de um dos métodos de estimativa de evapotranspiração de referência está na dependência de uma série de fatores, entre os quais: a disponibilidade de dados meteorológicos, a escala de tempo requerida, as condições climáticas para as quais o método foi desenvolvido.

Vescove e Turco, 2005 reportam que atualmente, ocorre tendência à utilização de estações meteorológicas automatizadas que auxiliam na determinação da evapotranspiração de referência, diminuindo, assim, erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura. Quando programadas, as estações podem utilizar o método FAO56 Penman-Monteith para a determinação da ET_o , porém a maior parte dos citricultores utiliza outros métodos e não dispõe desses equipamentos, impossibilitando-os de determinar a ET_o pelo método-padrão. Portanto, equações de correção em relação ao

método de FAO56 Penman-Monteith (método-padrão da FAO) são desejáveis para que se possa minimizar os erros cometidos no cálculo da ET_o .

A seguir serão citados alguns estudos realizados com diferentes métodos de obtenção da evapotranspiração:

- Estudando a correlação da ET_o estimada pelo método de Penman-Monteith e medida em lisímetro de drenagem, em Campinas, Ribeirão Preto e Pindamonhangaba, Estado de São Paulo, Peres *et al.* (1995) concluíram que a correlação entre os dados medidos foi coerente em relação aos dados estimados.
- Volpe e Cunha (2007) estimaram a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO56) em Jaboticabal, SP.
- Amorim *et al.* (2007) calcularam diariamente a ET_o , adotando o modelo de Penman-Monteith (FAO56) no município de Viçosa.
- Carvalho *et al.* (2007) obtiveram medidas de evapotranspiração com lisímetros em concordância com estimativas realizadas pelo método de Penman-Monteith, na região de Seropédica – RJ.
- Silva e Amaral (2008) estimaram a evapotranspiração e os coeficientes de cultivo do amendoim, na região do Cariri, no estado do Ceará, durante suas fases fenológicas, utilizando o método do balanço hídrico no solo. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de FAO56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).
- Carvalho *et al.* (2011) avaliaram a resposta da cultura da beterraba cultivada na Baixada Fluminense, sob diferentes coberturas do solo e lâminas de irrigação. A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) e Tanque Classe A.
- Silva *et al.* (2011) determinaram a evapotranspiração de referência para a Bacia do Rio Itapemirim que fica localizada no Sul do Estado do Espírito Santo. Estimou-se a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, a partir de regressão linear dos dados obtidos pelos métodos de Camargo e Thornthwaite. Uliana *et al.* (2011) fizeram o mesmo para interbacia do Rio Piraquê-Açu no mesmo Estado.

- Tagliaferre *et al.* (2011) estimaram a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith – FAO 56 para as condições climáticas da região do planalto de Vitória da Conquista – BA.
- Sousa *et al.* (2011) quantificaram a demanda hídrica da cultura do coentro (*Coriandrum sativum L.*) cultivar verão, mediante a utilização de lisímetros de lençol freático constante no município de Itabaiana/SE.
- Araújo *et al.* (2011) utilizaram o método FAO Penman Monteith para a determinação do consumo de água do Feijão Caupi em Pernambuco.
- Oliveira *et al.* (2011) utilizaram os método FAO Penman Monteith e Tanque Classe A para a estimativa da ET_o no município de Juazeiro no Estado Bahia.
- Silva *et al.* (2011) estimaram a evapotranspiração diária segundo o modelo de Penman-Monteith parametrizada pela FAO (Allen *et al.*, 1998) para Londrina-PR.
- Rabelo *et al.* (2011) analisaram os valores da evapotranspiração obtidos diretamente pelos lisímetros.
- Lyra *et al.* (2011) obtiveram a ET_o (mm dia⁻¹) através do método de Penman-Monteith-FAO 56.
- Fietz *et al.* (2011) avaliaram dois lisímetros dotados de diferentes sistema de pesagem. O experimento foi conduzido na Embrapa Agropecuária Oeste em Dourados, MS.
- Teixeira *et al.* (2011) conduziram um estudo em um cultivo comercial de mangueira durante dois ciclos produtivos. A evapotranspiração real foi obtida pelo método das correlações turbulentas, enquanto para a de referência, a equação de PenmanMonteith (FAO 56) foi aplicada.
- Silva *et al.* (2011) analisaram os efeitos dos cenários futuros de mudanças climáticas do incremento do dióxido de carbono, bem como das variáveis temperatura e umidade relativa do ar e da disponibilidade de água no solo sobre a evapotranspiração real da videira de vinho cultivada durante o primeiro e segundo semestres no Vale do Submédio São Francisco. Para o cálculo da ET_r foram usados o modelo original de Penman Monteith, o coeficiente da cultura (K_c).

Muitos trabalhos utilizam método empíricos de estimativa da ET_o . Entretanto, a não verificação da adequação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência às condições climáticas locais, a falta de precisão na estimativa, bem como o erro, devido ao uso de instrumentos de medidas inadequados, em geral, também conduzem ao manejo inadequado da água, afetando muitas vezes a produção agrícola. Aplicações de água insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo, dessa forma, a eficiência do uso de irrigação (Silva *et al.*, 1993). Segundo Silva e Amaral (2008) o método de Thornthwaite estima melhor a ET_o em escala mensal e aplica-se melhor a regiões de clima úmido. Já o método de Hargreaves-Samani foi desenvolvido para regiões semi-áridas, com elevado déficit de saturação (Oliveira & Carvalho, 1998; Fietz *et al.*, 2005).

Portanto, o uso de métodos empíricos deve ser antecedido por avaliações de desempenho regional. Para ilustrar o problema do uso de tais método, a seguir serão mencionados alguns estudos, entre diversos encontrados na literatura, que utilizaram métodos empíricos de estimativa da ET_o que não mencionam uma prévia avaliação dos mesmos para o local de interesse. Vale ressaltar que na maioria dos casos essa prática é motivada pela não disponibilidade de dados que permita tal avaliação ou a utilização do método FAO56 Penman-Monteith. Dessa forma, o intuito não é criticar os trabalhos, mas chamar a atenção para a necessidade de uma rede de dados meteorológicos que permitam o uso correto dos métodos empíricos mencionados.

- Carvalho e Stipp (2004; citado por Silva e Amaral, 2008) obtiveram a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite para o Estado do Paraná.
- O trabalho de Fernandes *et al.* (2004) teve como objetivos estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) dentro e fora de casa de vegetação, pelo método do Tanque Classe A. O experimento foi conduzido na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal - SP.
- Tagliaferre *et al.* (2006) estimaram a ET_o pelos métodos de Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, Tanque Classe A em Viçosa, MG.
- Kobiyama e Chaffe (2008) estimaram a ET_o por métodos empíricos: Thornthwaite, Hamon e Blaney-Criddle.

- Nunes *et al.* (2011) estimaram a evapotranspiração de referência através da metodologia proposta por Ivanov para o município de Palmas – TO.
- Silva *et al.* (2011) analisaram a resposta da evapotranspiração da caatinga aos cenários de mudanças climáticas. Utilizou-se o modelo original de Penman Monteith.
- Santana *et al.* (2011) utilizaram o tanque classe A para a quantificação da ET_o para a cultura do alho irrigado na região de Uberaba, MG.

Por outro lado, encontram-se diversos trabalhos que avaliaram métodos empíricos de estimativa da ET_o para diferentes regiões do Brasil, demonstrando a importância do tema para o manejo correto da irrigação, a saber:

- Sentelhas e Folegatti (2003) correlacionaram dados do Tanque Classe A com medidas de um lisímetro de pesagem em Piracicaba, SP. Os resultados indicaram que o uso do Tanque Classe A é uma boa alternativa para o manejo da irrigação na região. O trabalho de Vescove e Turco (2005) teve por finalidade a comparação de três métodos de determinação da evapotranspiração de referência, método da Radiação Solar, método de Makkink e método do Tanque Classe A, com o método de Penman-Monteith, em dois períodos distintos, inverno-primavera (época de florescimento, crescimento do fruto e colheita) e verão-outono (época de crescimento do fruto e da colheita), em uma fazenda citrícola na região de Araraquara - SP. O método de Makkink subestimou a ET_o em relação à Penman-Monteith nos dois períodos analisados. Os dados médios mensais de ET_o de Turco (2002) concordam com os obtidos neste trabalho de que o método de Makkink subestima a ET_o em relação a Penman-Monteith. Nos dois períodos, o método da Radiação Solar superestima a evapotranspiração de referência em relação ao método-padrão de Penman-Monteith. Bezerra e Oliveira (1999) afirmaram que o método da Radiação Solar superestimou a ET_o e apresentou boa correlação com o método de Penman-Monteith. A evapotranspiração estimada pelo método do Tanque Classe A superestimaram os valores de ET_o calculados pelo método de Penman-Monteith, nos dois períodos. Dantas Neto (1999), avaliando métodos de estimativa da ET_o para Mossoró - RN, observou que os valores médios da ET_o obtidos pelo método do Tanque Classe A não apresentaram bom ajuste em relação ao método de

Penman-Monteith, ocorrendo dispersão dos dados, comportamentos esses semelhantes aos obtidos neste trabalho. Peres e Scardua (1991), trabalhando com dados diários, constataram que estimativas da ET_o obtidas pelo método do Tanque Classe A e Penman-Monteith não diferiram estatisticamente entre si, resultados diferentes dos obtidos neste experimento para os períodos avaliados. Em suma, os autores relatam que ótimos desempenhos foram obtidos pelos métodos de Makking e Radiação Solar no período verão-outono. O Tanque Classe A teve um bom desempenho nesse período. No período inverno-primavera, todos os métodos apresentaram uma queda de desempenhos, sendo bom para Makking e Radiação Solar e regular para o Tanque Classe A.

- O estudo realizado por Fernandes (2006) para as localidades de Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão, ambas no estado do Rio de Janeiro, investigou e avaliou o desempenho de nove equações empíricas de estimativa da evapotranspiração de referência comparadas com a equação FAO56 Penman-Monteith, a saber: Thornthwaite, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Tanque Classe A, Jensen-Haise, Hargreaves, Makking e Camargo. Os resultados indicaram que para Campos dos Goytacazes os métodos de Hargreaves, Priestley-Taylor e Makking apresentaram os melhores desempenhos. Para a Ilha do Fundão os melhores desempenhos foram alcançados pelos métodos de Priestley-Taylor, Hargreaves, Camargo e Makking. Nessas duas localidades, esses métodos apresentaram desvios médios anuais relativos inferiores a 20%. Depois da calibração regional, os métodos de Jensen-Haise, Hargreaves, Makking e Priestley-Taylor tiveram seus desvios reduzidos para valores inferiores a 13% e 8,3% em Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão, respectivamente. Os métodos de Hargreaves-Samani e Camargo tiveram seus desvios reduzidos para valores inferiores a 14% para a Ilha do Fundão.
- Henrique (2006) estimou a evapotranspiração de referência diária usando os métodos FAO Penman Monteith, Hargreaves e Linacre. Os resultados indicaram uma grande discordância entre o método de Penman Monteith e os demais métodos.
- Carvalho *et al.* (2006) comparam as estimativas da ET_o por métodos empíricos e pelo método padrão FAO56 Penman-Monteith com medidas de lisímetro em Seropédica, RJ. Os resultados indicaram desempenhos ótimo, muito bom e sofrível para os métodos FAO56 Penman-Monteith, Tanque Classe A e Hargreaves-Samani, respectivamente. O baixo desempenho do método de Hargreaves-Samani é

justificado pelo fato dele ter sido desenvolvido para regiões semi-áridas, com elevado déficit de saturação, condição climática diferente da observada em Seropédica, cujo clima é úmido (Oliveira & Carvalho, 1998; Fietz *et al.*, 2005).

- Fernandes (2007) utilizou o método do Tanque Classe A, que superestimou a evapotranspiração da cultura em relação ao FAO56 Penman-Monteith em Jaboticabal, SP.
- O objetivo do estudo realizado por Araújo *et al.* (2007) foi estimar a evapotranspiração de referência mensal por diferentes métodos, a saber: Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, FAO56 Penman-Monteith, Tanque Classe A e Makkink. O método FAO56 Penman-Monteith foi adotado como padrão. O método de Blaney-Criddle atendeu satisfatoriamente à estimativa da ET_0 na região de Boa Vista, RR, para o período mensal. Quando se dispõe somente de dados de temperatura (máxima e mínima), os métodos de Thornthwaite e Hargreaves-Samani podem ser usados, com a ressalva de superestimarem os valores de ET_0 ao longo do ano. O método do Tanque Classe A mostrou-se adequado somente durante o período seco.
- Vieira *et al.* (2007) avaliaram a performance dos modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) pelos métodos de Thornthwaite, Hargreaves e Samani, Makkink e Penman Original e comparou-os com os valores obtidos pelo método padrão de Penman Monteith, em Diamantina, MG. Os métodos de Makkink e de Penman Original geraram resultados satisfatórios, podendo, desta forma, serem empregados por técnicos, da área agropecuária, para o cálculo de ET_0 . Ressalta-se a vantagem do método de Makkink ser de mais fácil utilização, necessitando de menor número de variáveis de entrada.
- Barros *et al.* (2007) avaliaram a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) para a região de Seropédica, RJ, correlacionando medidas obtidas em lisímetros de pesagem com os métodos de Penman Monteith FAO 56, Hargreaves-Samani, Camargo, Priestley-Taylor e Makkink. Os valores de ET_0 estimados por Penman Monteith FAO 56, Priestley-Taylor e Makkink se mostraram bem correlacionados com aqueles determinados pelo lisímetro de pesagem. O método de Hargreaves-Samani não estimou satisfatoriamente a ET_0 e o método de Camargo não apresentou ajuste satisfatório com os dados do lisímetro para observações agrupados em pequenos períodos.

- Neves *et al.* (2011) analisaram o desempenho de sete métodos empíricos para estimar da evapotranspiração de referência, comparando-os com o método padrão Penman-Monteith FAO-56, para as condições climáticas do município de Ituporanga, SC, a saber: FAO-Penman corrigido, Penman 63, FAO-Radiação, FAO-Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Makkink. Todos os métodos apresentam altos índices de correlação “r” e índice de concordância “d”, para as condições climáticas de onde se realizou o trabalho, exceto para o método Makkink que ficou ligeiramente abaixo dos outros métodos utilizados.
- Fernandes *et al.* (2011), avaliaram, calibraram e validaram o método de estimativa da ET_o de Hargreaves para a cidade de Manaus. Tanto para a calibração, como para a validação, houve uma tendência em superestimar os valores de ET_o em relação aos valores obtidos pelo método padrão FAO56 Penman-Monteith. Essa tendência também foi observada por Mudrik *et al.* (2002) e França Neto *et al.* (2003) para outras localidades do Brasil. Estudos como o de Fooladmand *et al.* (2008) mostram que a calibração local para o método de Hargreaves tem mostrado bons desempenhos para regiões úmidas.
- Silva *et al.* (2011) avaliaram diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alegre de Minas – MG, a saber: Thornthwaite, Camargo, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani. Os valores estimados por esses métodos foram confrontados com aqueles obtidos pelo método FAO56 Penman-Monteith. O método de Priestley-Taylor apresentou o melhor resultado, porém, com índice de desempenho sofrível; o pior desempenho foi apresentado pelo método de Hargreaves-Samani, seguido pelos métodos de Thornthwaite e Camargo todos com índice de desempenho péssimo.
- Tagliaferre *et al.* (2011) estimaram a evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, Hargreaves-Samani, tendo como método padrão o de Penman-Monteith – FAO 56, para as condições climáticas do município de Guanambi – BA. Os melhores métodos para a estimativa da ET_o foram: Penman modificado – FAO 24 e Radiação – FAO 24.
- Costa *et al.* (2011) estimaram a ET_o pelos métodos de Hargreaves e Blaney-Criddle e comparam os resultados com os FAO56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), na bacia do Córrego Sujo, situada na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro em Teresópolis. Nesta bacia a atividade agrícola utiliza a irrigação de forma

indiscriminada para produção de olericultura. Nenhum dos métodos alternativos ao FAO apresentou resultado satisfatório, isto é com baixo erro, o que reforça a necessidade para ajuste regional dos mesmos. Todos os métodos apresentaram erros superiores a 30%.

- Hallal *et al.* (2011) analisaram a estimativa da ET_o para a cidade de Pelotas pelos métodos de Makkink, Hargreaves-Samani, Radiação Solar, Blaney-Criddle e Penman-Monteith considerado como padrão. Concluiu-se que o método de Blaney-Criddle apresentou o melhor desempenho, com índice ótimo, mas os demais métodos analisados também podem ser utilizados para estimar a ET_o pois apresentaram índices bom a muito bom.
- Martins *et al.* (2011) estimaram a ET_o utilizando as equações de Penman-Monteith FAO 56 e Blaney-Criddle FAO 24. Concluiu-se que a ET_o obtida pelo método de Blaney-Criddle FAO 24 foi subestimada em 7,73%, 7,68%; 7,71%; 7,67% e 7,71% para os intervalos de 1, 3, 5, 7 e 10 dias, respectivamente, em relação ao método Penman-Monteith FAO 56.
- Souza *et al.* (2011) avaliaram o desempenho de diferentes métodos de estimativas da ET_o em relação ao método padrão Penman-Monteith – FAO 56 para as condições climáticas do Município de Petrolina-PE. Foram analisados para a estimativa da ET_o os métodos de Penman-Monteith – FAO 56, Radiação – FAO 24, Blaney-Criddle – FAO 24, Turc, Makkink, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samanni, sendo o método de FAO56 Penman-Monteith adotado como padrão. Os métodos que melhor atenderam a estimativa da ET_o em Petrolina, PE, foram os da Radiação – FAO 24 e o de Blaney-Criddle, sendo uma boa alternativa para o manejo de irrigação na região.
- Miranda *et al.* (2011) avaliaram o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referencia (ET_o) na região do Sertão do Vale do Pajeú, PE, sendo os seus resultados comparados ao método de Penman Monteith, parametrizado no boletim 56 da FAO. Verificou-se que a maioria dos métodos superestimou a ET_o , apesar de em alguns casos terem sido observados valores de r elevados. Assim, recomenda-se realizar ajustes dos métodos a fim de se obter estimativas mais satisfatórias da evapotranspiração e, conseqüentemente, melhorias do manejo de água na região do Sertão do Vale Pajeú.

- Queiroz *et al.* (2011) analisaram o desempenho da estimativa dos valores diários da evapotranspiração de referência obtidos por meio do método de Penman Monteith, parametrizado no boletim 56 da FAO e do método de Hargreaves-Samani para o semiárido pernambucano. Os autores concluíram que o método de Hargreaves-Samani pode ser empregado pelos produtores rurais da região.
- Amorim *et al.* (2011) utilizaram como padrão o modelo de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO-56 para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) e avaliaram a eficiência de estimativa da ET_o por métodos de dados mínimos climáticos para cinco estações meteorológicas do estado de Alagoas. Os métodos avaliados foram Hargreave-Samani, Camargo e Thornthwaite, nas escalas de dez dias e mensal. As estações localizam-se na região do litoral (Maceió e Porto de Pedras) e no Agreste (Palmeira dos Índios) e Sertão do estado (Água Branca e Pão de Açúcar). Os resultados indicam que para a região de Água Branca, todos os métodos podem ser utilizados; Maceió somente Hargreaves-Samani e Camargo; para Palmeiras dos Índios todos os métodos; para Pão de Açúcar todos os métodos; e para Porto de Pedras somente Camargo.
- Vários outros trabalhos reportam o desempenho de diferentes métodos empíricos de estimativa da ET_o para regiões distintas do território brasileiro. Todos eles demonstram a necessidade da avaliação de tais métodos antes de sua aplicação numa região diferente daquela para onde foram desenvolvidos (Faria *et al.*, 2000; Batista *et al.*, 2007; Faccioli *et al.*, 2007; Ferronato *et al.*, 2007; Vanzela *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2011).

A evapotranspiração para fins de manejo da irrigação tem sido largamente estimada por técnicas de sensoriamento remoto. Uma das vantagens da determinação da evapotranspiração através de imagens de satélite é a obtenção deste valor tomado pixel a pixel, ou seja, os valores de evapotranspiração poderão ser extrapolados para uma área maior ou até uma região, diferentemente do que ocorre com dados locais. Outra grande vantagem do emprego de imagens de satélites na estimativa da evapotranspiração em escala regional reside no fato de que, a água utilizada no processo de evapotranspiração, pode ser obtida diretamente sem a necessidade de quantificar outros parâmetros hidrológicos de difíceis determinações, como a umidade por exemplo.

Internacionalmente podem-se citar diversos estudos para esse fim, com resultados promissores (Allen *et al.*, 2002; Bastiaanssen, 1995; Bastiaanssen *et al.*, 1998a; Bastiaanssen *et al.*, 1998b; Bastiaanssen, 2000; Galleguillos *et al.*, 2011; Jin *et*

al., 2011; Maeda *et al.*, 2011; Mu *et al.*, 2011; Tasumi *et al.*, 2003; Trezza, 2002; Vinukollu *et al.*, 2011).

No Brasil, o principal algoritmo utilizado para a estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto tem sido o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) desenvolvido por Bastiaanssen (1995) com aplicações nas diferentes regiões de seu território (Bezerra, 2006; Ferreira *et al.*, 2011; Giacomoni e Mendes, 2008; Hernandez *et al.*, 2011; Leivas *et al.*, 2011; Meireles, 2007; Menezes *et al.*, 2011; Nicácio, 2008; Paiva, 2005; Paiva *et al.*, 2011a; Paiva *et al.*, 2011b).

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1. Área de estudo e dados utilizados

A Fazenda Cambara localiza-se no município de Pirai do Sul, Estado do Paraná, cuja área total do talhão compreendia 121,03 hectares, com ponto central nas coordenadas geográficas iguais a 24°25'13,86" S e 50°05'14,37" O. Segundo a classificação de Koppen, as condições climáticas desta região se enquadram ao tipo climático Cfb, clima temperado, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C e no mês mais quente abaixo de 22°C, com precipitação média anual entre 1600 mm e 1800 mm. O talhão de 121 hectares foi semeado com trigo no dia 03 de junho e colhido no dia 27 de outubro de 2008. Neste local e safra foi praticada a agricultura de sequeiro, ou seja, sem irrigação e, portanto, as condições foram apropriadas para uma avaliação da necessidade da aplicação dessa prática visando o aumento de produtividade.

Os dados meteorológicos foram coletados através de uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD), programada para registro de informações em intervalo de 30 minutos, durante o período de 04 de julho a 12 de outubro de 2008. Os dados coletados correspondem as seguintes grandezas: intensidade do vento (ms^{-1}), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar global (Wm^{-2}), saldo de radiação (Wm^{-2}), fluxo de calor no solo (Wm^{-2}) e precipitação (mm).

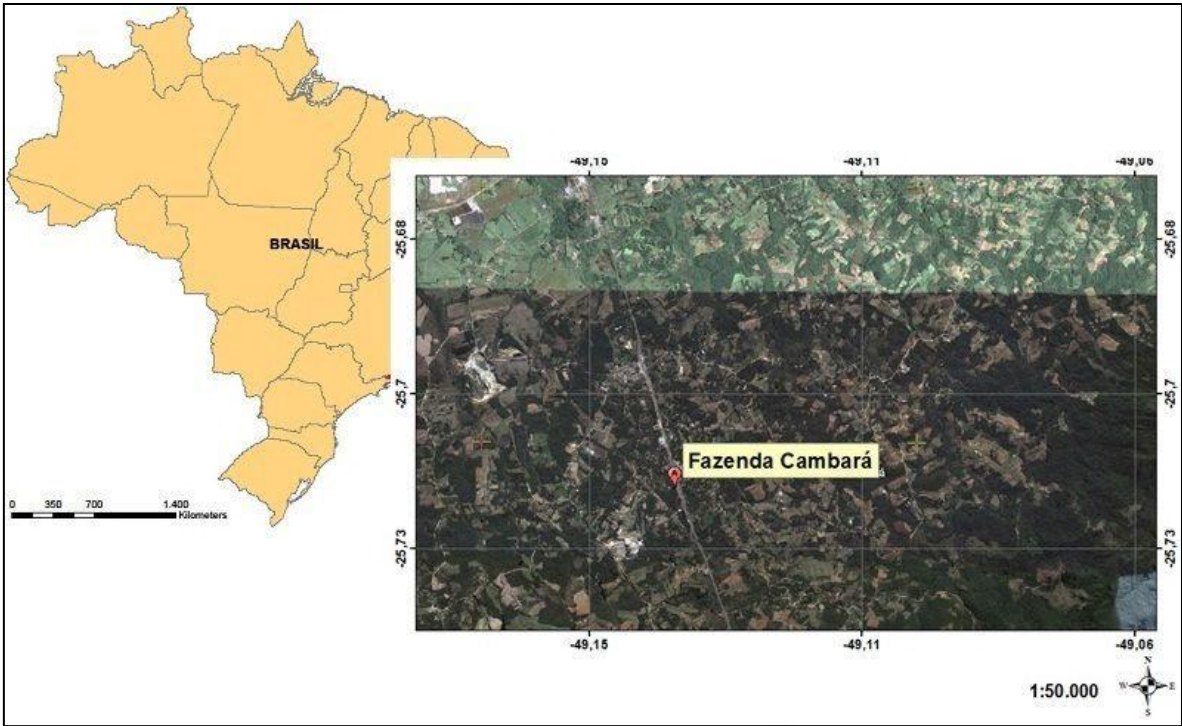


Figura 3.1 – Localização da Fazenda Cambará em Piraí do Sul, Estado do Paraná.

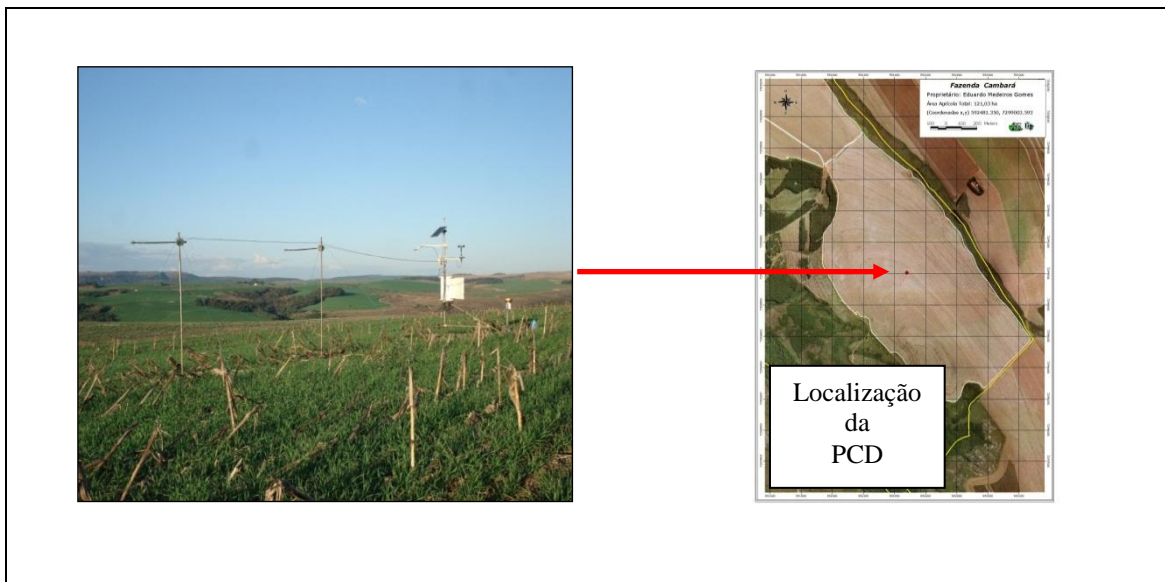


Figura 3.2 - Plataforma de coleta de dados instalada na Fazenda Cambará, Piraí do Sul – PR.

3.2. Estimativa da evapotranspiração

Neste tópico serão descritos os passos para a estimativa da evapotranspiração de referência, conforme o fluxograma apresentado a seguir:

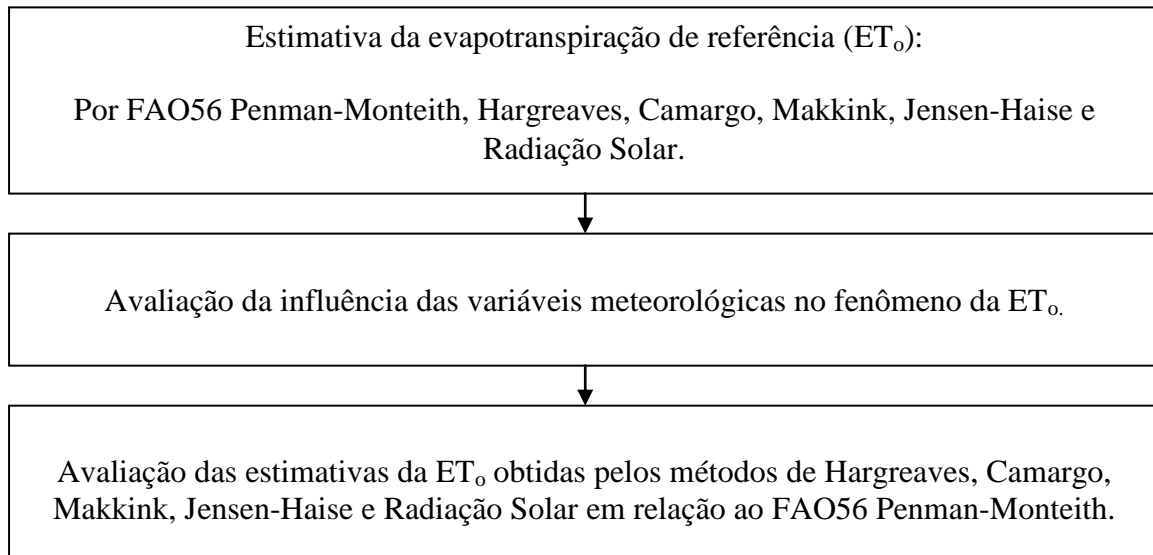


Figura 3.3 – Etapas para a avaliação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.

3.2.1. Evapotranspiração de referência pelo método FAO56 Penman-Monteith

O método FAO56 Penman-Monteith é expresso pela seguinte equação (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_{o_FPM} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_l - S) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{ar} + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (3.1)$$

onde,

ET_{o_FPM} : evapotranspiração de referência [mm.dia⁻¹];

Δ : tangente à curva de pressão de vapor [kPa.°C⁻¹];

R_l : Saldo de radiação ou radiação líquida [MJ.m⁻².dia⁻¹];

S : fluxo de calor sensível para o solo [MJ.m⁻².dia⁻¹];

γ : constante psicrométrica [kPa.°C⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária medida a 2 metros [°C];

U_2 : intensidade do vento média diária medida a 2 metros [$m.s^{-1}$];

e_s : pressão de vapor de saturação [kPa];

e_a : pressão de vapor atual [kPa].

3.2.2. Evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves

O método de Hargreaves é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o_HG} = 0,0023 \cdot (T_{ar} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a \quad (3.2)$$

onde,

ET_{o_HG} : evapotranspiração de referência [$mm.dia^{-1}$];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [$^{\circ}C$];

T_{max} : temperatura do ar máxima diária [$^{\circ}C$];

T_{min} : temperatura do ar mínima diária [$^{\circ}C$];

R_a : radiação solar no topo da atmosfera total diária [$mm.dia^{-1}$].

3.2.3. Evapotranspiração de referência pelo método de Camargo

O método de Camargo é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o_CM} = F \cdot R_a \cdot T_{ar} \quad (3.3)$$

onde,

ET_{o_CM} : evapotranspiração de referência [$mm.dia^{-1}$];

F: fator de ajuste que varia com a temperatura média do local (valor utilizado $F = 0,01$);

R_a : radiação solar no topo da atmosfera total diária [$mm.dia^{-1}$].

T_{ar} : temperatura do ar média diária [$^{\circ}C$];

3.2.4. Evapotranspiração de referência pelo método de Jensen-Haise

O método de Jensen-Haise é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o-JH} = (0,0252 \cdot T_{ar} + 0,078) \cdot R_g \quad (3.4)$$

onde,

ET_{o-JH} : evapotranspiração de referência [mm.dia⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

R_g : radiação solar global total diária [mm.dia⁻¹].

3.2.5. Evapotranspiração de referência pelo método da Radiação Solar

O método da Radiação Solar é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o-RS} = c_o + c_1 \cdot W \cdot R_g \quad (3.5)$$

$$c_o = - 0,3 \text{ mm.dia}^{-1} \quad (3.6)$$

$$c_1 = 1,0656 - 0,0012795 \cdot UR + 0,044953 \cdot U_2 - 0,00020033 \cdot UR \cdot U_2 - 0,000031508 \cdot UR^2 - 0,0011026 \cdot U_2^2 \quad (3.7)$$

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 0 < T_{ar} < 16^\circ\text{C} \quad (3.8)$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 16,1 < T_{ar} < 32^\circ\text{C} \quad (3.9)$$

onde,

ET_{o-RS} : evapotranspiração de referência [mm.dia⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

R_g : radiação solar global total diária [mm.dia⁻¹];

U_2 : intensidade do vento média diária medida a 2 metros [m.s⁻¹];

UR: umidade relativa do ar [%];

3.2.6. Evapotranspiração de referência pelo método de Makkink

O método de Makkink é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_o\text{-MK} = 0,87 \cdot W \cdot R_g \quad (3.10)$$

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 0 < T_{ar} < 16^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 16,1 < T_{ar} < 32^\circ\text{C} \quad (3.12)$$

onde,

$ET_o\text{-MK}$: evapotranspiração de referência [$\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [$^\circ\text{C}$];

R_g : radiação solar global total diária [$\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$].

3.3. Avaliação da influência das variáveis meteorológicas no fenômeno da ET_o

Inicialmente as estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas pelo método FAO56 Penman-Monteith serão comparadas com as variáveis meteorológicas que governam o fenômeno da ET_o (radiação solar global, temperatura e umidade do ar e intensidade do vento), na tentativa de se apontar a participação de cada uma delas no fenômeno investigado. A comparação será feita com o método FAO56 Penman-Monteith pelo fato de ele ser um método físico, enquanto os métodos avaliados são empíricos. Para tanto, serão utilizados os coeficiente de correlação e o coeficiente de regressão descritos no próximo item deste capítulo.

3.4. Avaliação das estimativas da evapotranspiração real

Neste tópico será descrita a avaliação dos resultados dos métodos investigados em relação ao método FAO56 Penman-Monteith, considerado como referência. Os métodos avaliados serão classificados em relação aos seus respectivos desempenhos a partir do desvio médio absoluto (DMA), Desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e de determinação (r^2), como segue:

$$DMA = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{N}} \quad (3.13)$$

$$DMR = \sqrt{\frac{\sum \frac{(P_i - O_i)^2}{O_i}}{N}} \times 100 \quad (3.14)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right] \quad (3.15)$$

$$c = r \times d \quad (3.16)$$

P: evapotranspiração estimada pelo método em avaliação [mm.dia⁻¹];

O: evapotranspiração estimada pelo método de FAO-56 Penman Monteith [mm.dia⁻¹];

N: número de estimativas.

O coeficiente *c*, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), é interpretado de acordo com os referidos autores, a saber:

Tabela 3.1 – Valores do coeficiente de confiança e sua classificação.

Valores do coeficiente (<i>c</i>)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 e 0,65	Mediano
< 0,60	Ruim

O coeficiente de correlação pode variar de -1 a +1. Silva e Barros Silva (2003) sugerem o critério apresentado na tabela abaixo para classificação das correlações.

Tabela 3.2 – Valores do coeficiente de correlação e sua classificação.

Valores do coeficiente (r)	Classificação da correlação
1	Perfeita Positiva
0,70 a 0,99	Muito Forte Positiva
0,30 a 0,69	Moderada Positiva
0,01 a 0,29	Fraca Positiva
0	Nenhuma
-0,01 a -0,29	Fraca Negativa
-0,30 a -0,69	Moderada Negativa
-0,70 a -0,99	Muito Forte Negativa
-1	Perfeita Negativa

O índice de concordância, proposto por Willmott *et al.* (1985), pode variar entre 0 e 1 para nenhuma concordância e para uma concordância perfeita, respectivamente.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Evapotranspiração de referência

Os resultados serão apresentados na seguinte ordem: inicialmente as estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas pelo método FAO56 Penman-Monteith (FPM) serão comparadas com as variáveis meteorológicas que governam o fenômeno da ET_o (radiação solar global, temperatura e umidade do ar e intensidade do vento), na tentativa de se apontar a participação de cada uma delas no fenômeno investigado. A comparação será feita com o método FPM pelo fato de ele ser um método físico, enquanto os métodos avaliados são empíricos. Em seguida, o desempenho de cada método avaliado será analisado em função dos valores de ET_o obtidos pelo método FAO56 Penman-Monteith considerado uma referência pela própria FAO (Allen *et al.*, 1998). Dessa forma, os primeiros resultados auxiliarão a análise de desempenho de cada método, tendo em vista que se pode correlacionar o conjunto das variáveis meteorológicas utilizadas por cada um deles, e seu papel no fenômeno da ET_o , com seus respectivos desempenhos. Vale ressaltar, que em diferentes condições climáticas o fenômeno da ET_o pode ser relevantemente governado por distintas variáveis meteorológicas.

4.2. Comparação entre as estimativas da ET_o por FAO56 Penman-Monteith e as variáveis meteorológicas

Na tabela 4.1 são listados os coeficientes de correlação (r) entre a ET_o estimada pelo método FPM e as variáveis meteorológicas que influenciam essa grandeza. Em ordem decrescente de valores de r , observa-se que: a umidade relativa do ar (UR) é a variável meteorológica mais correlacionada com o fenômeno da ET_o , com um r igual a -0,86 ou correlação muito forte; em seguida, tem-se a temperatura máxima do ar (T_{max}) com r igual a 0,70 ou correlação muito forte; depois a temperatura média do ar (T_{ar}) e a radiação solar global (R_g) com r respectivamente iguais a 0,57 e 0,52 ou correlações moderadas; por fim, as menos correlacionadas são a temperatura mínima do ar (T_{min}), a radiação solar no topo da atmosfera (R_a) e a intensidade do vento (U) com valores de r iguais a 0,27, -0,12 e 0,07 ou correlações fracas, respectivamente. As correlações foram classificadas de acordo com a tabela 3.3 do capítulo 3 referente à metodologia. O valor

de r negativo indica que a umidade relativa do ar é inversamente correlacionada com a ET_o , o que está de acordo com o comportamento físico da atmosfera que promove o aumento da evapotranspiração com a diminuição da umidade relativa do ar e vice-versa. Os valores positivos de r indicam que a temperatura do ar (mínima, média e máxima), a radiação solar global e a intensidade do vento são diretamente correlacionadas com a ET_o . Isso significa que o aumento de magnitude dessas variáveis promove maiores taxas de ET_o , o que também está de acordo com a física do fenômeno que sob maiores regimes térmicos, radiativo ou energético e de intensidade do vento elevam a ET_o e vice-versa. O valor negativo de r para a radiação solar no topo da atmosfera não é um resultado esperado, mas deve-se considerar que essa grandeza não representa as condições de radiação na superfície, tendo em vista a interferência da atmosfera. Portanto, não tem um significado físico direto para a ET_o .

O coeficiente de determinação r^2 indica o quanto cada variável meteorológica pode influenciar ou explicar o fenômeno da ET_o nas condições atmosféricas reinantes. Por esses valores, observa-se que a umidade relativa explica 74%; a temperatura máxima do ar 50%; a temperatura média do ar 33%, a radiação solar global 27% e a temperatura mínima do ar, a radiação no topo da atmosfera e a intensidade do vento menos de 10%, respectivamente.

Tabela 4.1 – Coeficientes de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2) entre a ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e as variáveis meteorológicas que a governam.

	r	¹ Classificação de r	r^2
$ET_o_FPM_UR$	-0,86	muito forte	0,74
$ET_o_FPM_T_{max}$	0,70	muito forte	0,50
$ET_o_FPM_T_{ar}$	0,57	moderada	0,33
$ET_o_FPM_R_g$	0,52	moderada	0,27
$ET_o_FPM_T_{min}$	0,27	fraca	0,07
$ET_o_FPM_R_a$	-0,12	fraca	0,02
$ET_o_FPM_U$	0,07	fraca	0,01

O comportamento das variáveis meteorológicas e da ET_o durante o ciclo da cultura de trigo no campo é apresentado nas figuras 4.1 a 4.6. Pode-se observar que a ET_o apresenta uma tendência contrária somente em relação à UR, acompanhando, portanto, a tendência das demais variáveis (T_{min} , T_{ar} , T_{max} , R_g e U).

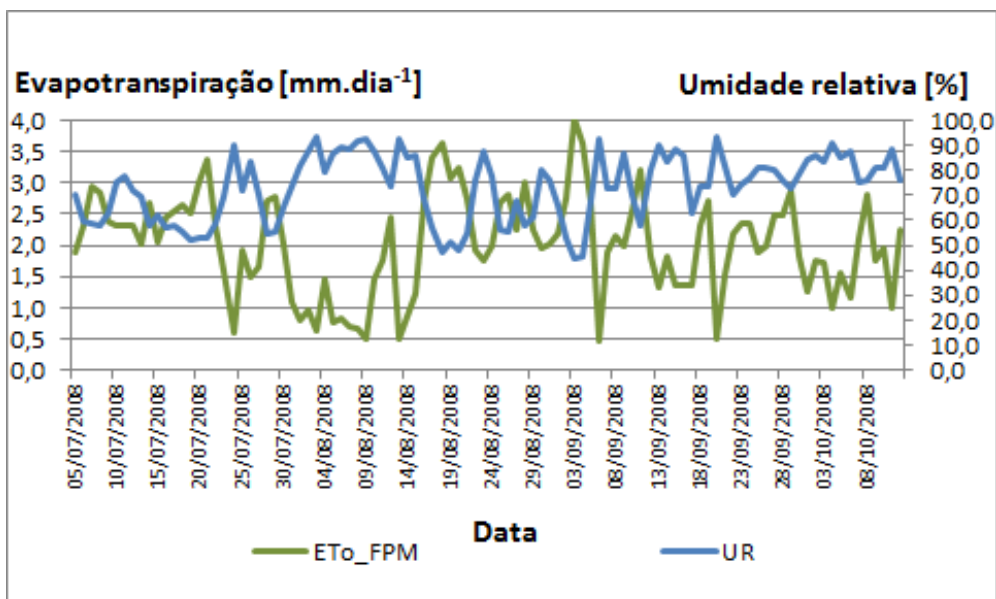


Figura 4.1 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a umidade relativa do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

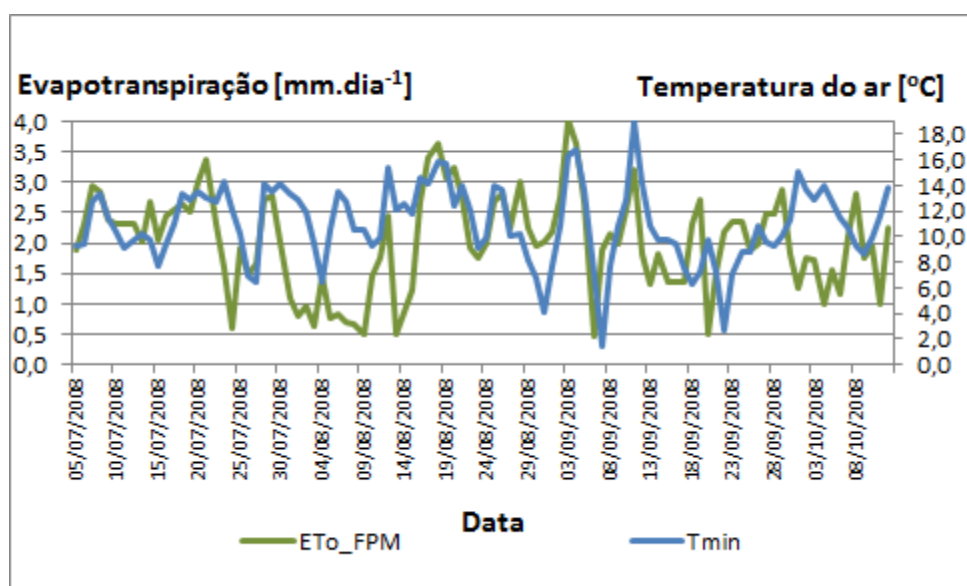


Figura 4.2 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a temperatura mínima do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

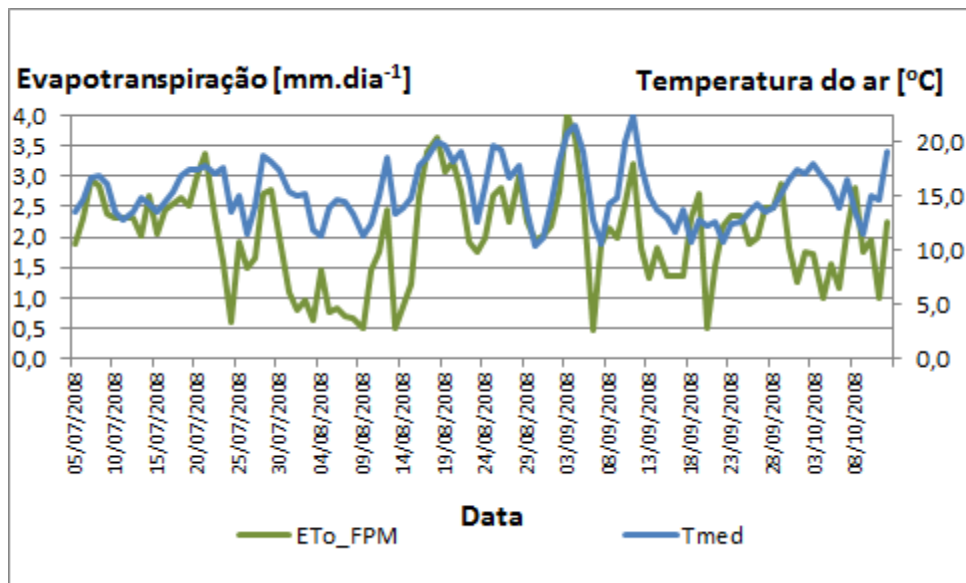


Figura 4.3 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a temperatura média do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

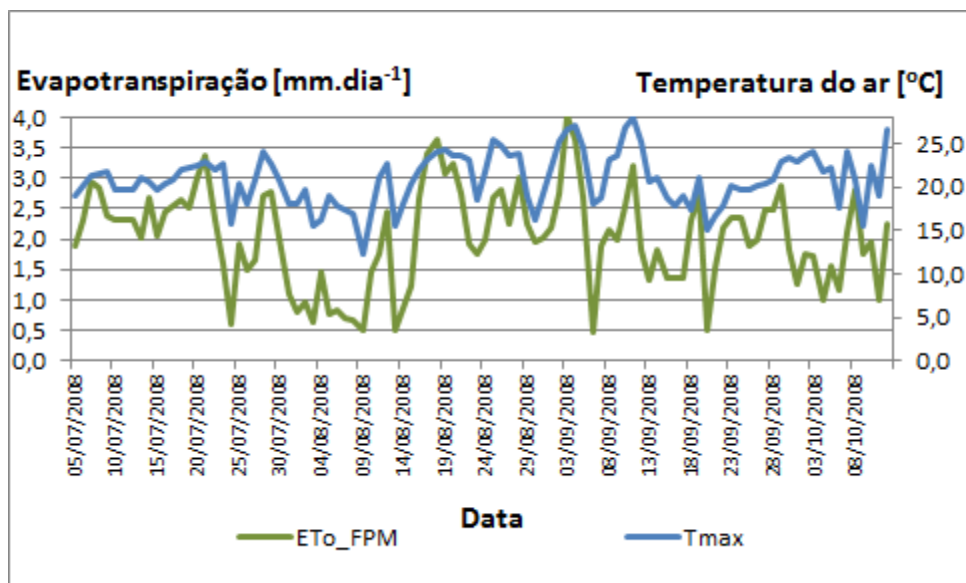


Figura 4.4 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a temperatura máxima do ar durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

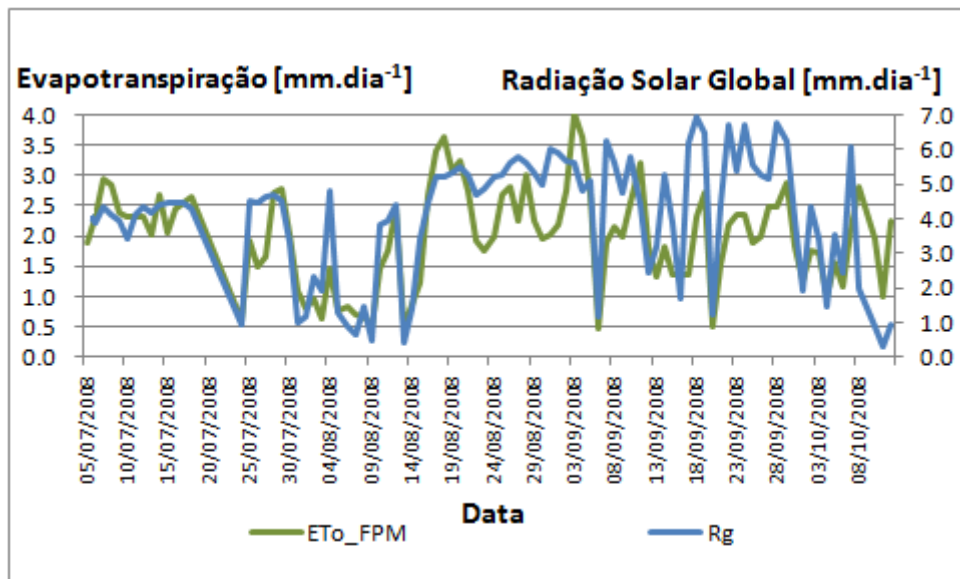


Figura 4.5 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a radiação solar global durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

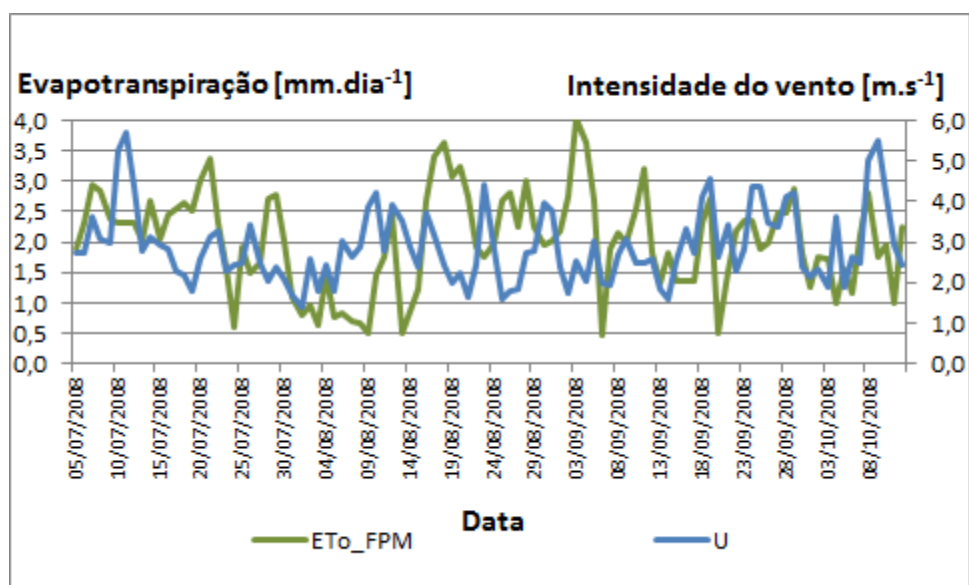


Figura 4.6 - ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e a intensidade do vento durante todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

De acordo com o trabalho de Amorim *et al.* (2007), que teve como objetivos determinar os efeitos direto e indireto dos elementos meteorológicos no processo de ET_o estimadas pelo modelo de FPM (FAO) e Tanque Classe “A” na região agrícola de Mossoró, a insolação foi o elemento do clima de maior contribuição para ET_o .

Ruhoff *et al.* (2009) conduziu um estudo em áreas de cultivos de cana-de-açúcar e remanescentes florestais de cerrado na bacia do rio Grande — SP, para identificar o comportamento das variáveis climáticas e verificar quais apresentam uma maior influência no processo de evapotranspiração. Concluiu-se que o processo de evapotranspiração, para a área estudada, é comandado pelas componentes, em áreas de cerrado e cultivos de cana-de-açúcar, respectivamente: variação da oferta de energia, representada principalmente pelas variáveis radiação solar global e radiação líquida; e processo de circulação atmosférica local, representada pelas variáveis de velocidade do vento e pressão atmosférica, que regulam o sistema de precipitação e as condições de umidade do ar e do solo.

4.3. Avaliação da estimativa da evapotranspiração de referência

Inicialmente serão analisados os comportamentos da tendência e da magnitude da ET_o , durante o período de estudo, entre os métodos avaliados e o método FPM, considerado o padrão de referência. Para tanto, serão analisados os gráficos apresentados nas figuras 4.7 a 4.11. Por essas figuras, observa-se que todos os métodos avaliados seguem o método padrão no que se refere à tendência, ou seja, ao movimento da curva de ET_o durante a maior parte do período estudado. Isso significa que, de uma forma geral, a ET_o cresce e decresce em valor simultaneamente para todos os métodos. Quanto à magnitude, tem-se que os métodos de Hargreaves (HG) e Camargo (CM), em alguns poucos períodos acompanham o método FPM, mas de uma forma geral não acompanham os valores estimados por esse método. Por outro lado, os métodos de Makkink (MK), Jensen-Haise (JH) e Radiação Solar (RS), em magnitude, se aproximam mais do método FPM do que os dois anteriores. Esses três últimos métodos se comportaram de uma forma similar em relação ao método padrão.

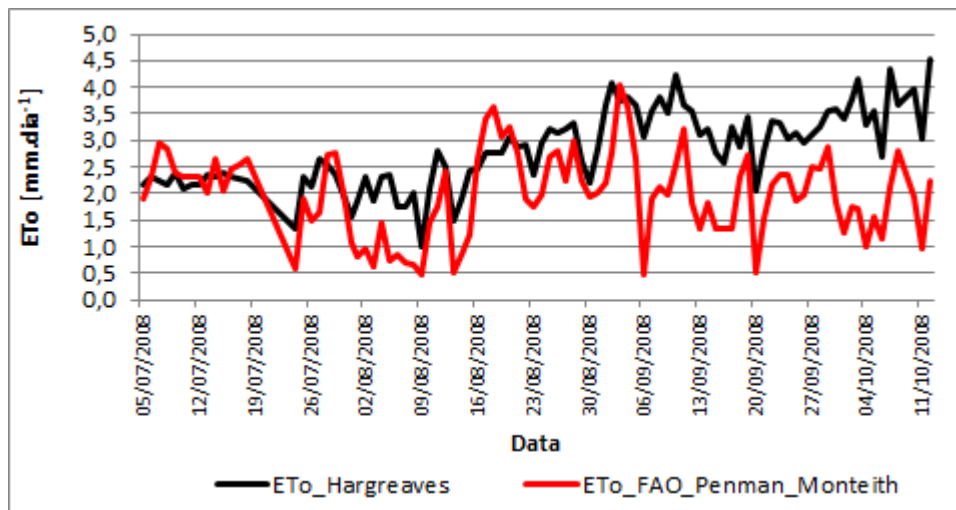


Figura 4.7 – ET₀ estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Hargreaves para todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

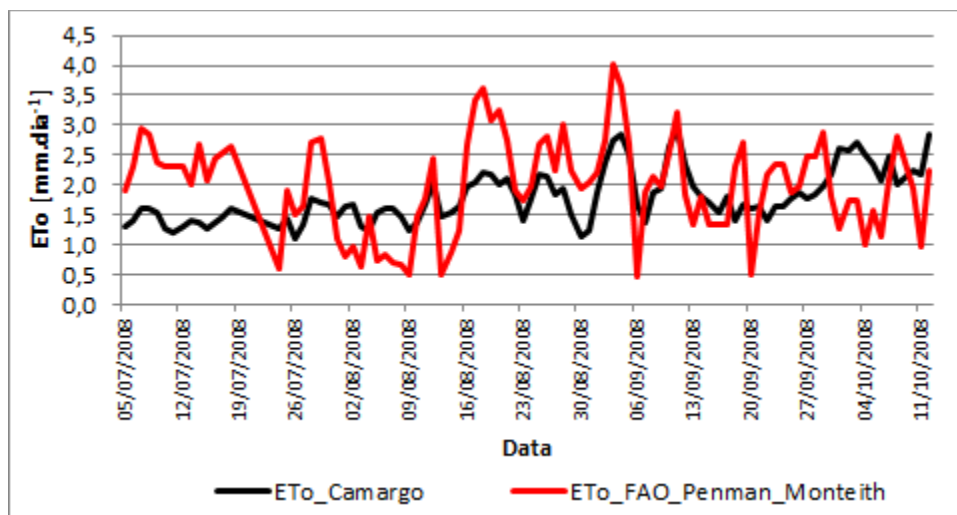


Figura 4.8 – ET₀ estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Camargo para todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

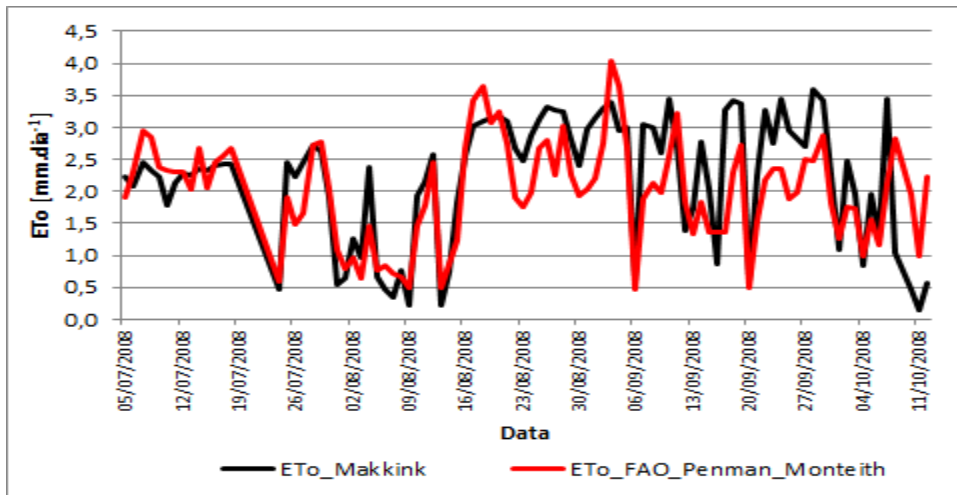


Figura 4.9 – ET₀ estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Makkink para todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

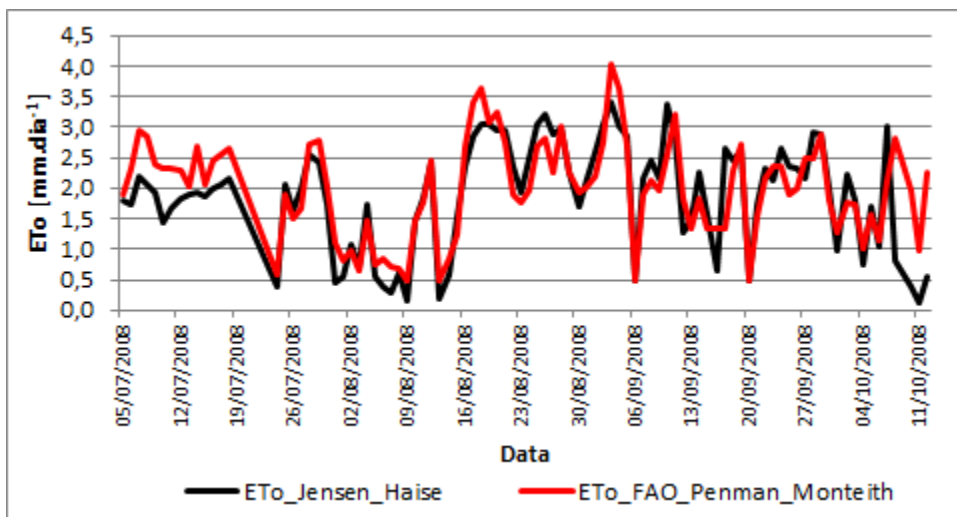


Figura 4.10 – ET₀ estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Jensen-Haise para todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

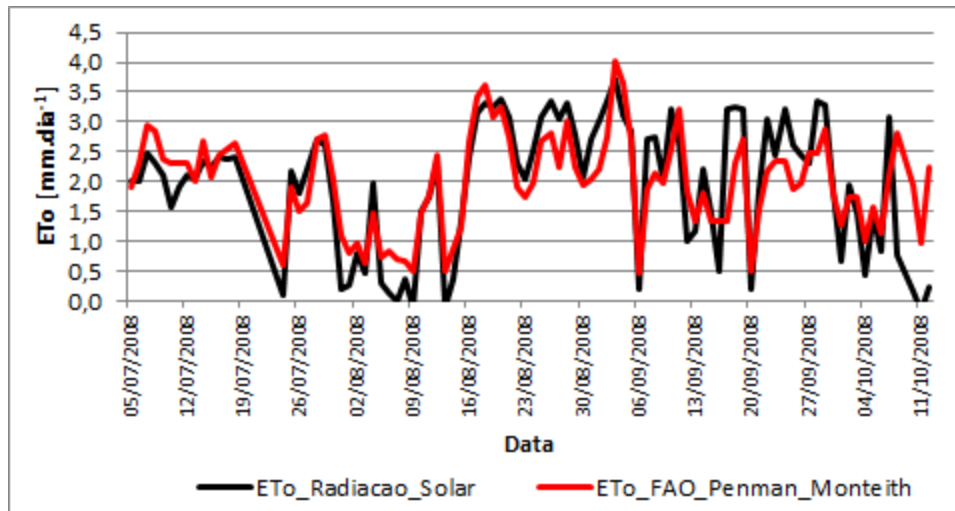


Figura 4.11 – ET_0 estimada pelos métodos FAO56 Penman-Monteith e Radiação Solar para todo o ciclo da cultura de trigo no campo.

Os métodos avaliados, como já foi mencionado no capítulo referente à metodologia, foram classificados em relação aos seus respectivos desempenhos a partir do desvio médio absoluto (DMA), Desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2), conforme a tabela 4.2.

O método de Jensen-Haise foi o que apresentou o menor DMR com um valor igual a 21,76% (o que corresponde a um DMA de $0,39 \text{ mm.dia}^{-1}$). O método de Hargreaves foi o que apresentou maior DMR com um valor igual a 70,76% (o que corresponde a um DMA de $0,95 \text{ mm.dia}^{-1}$). Os demais métodos apresentam em ordem crescente os seguintes valores: Radiação Solar igual a 30,68% ($0,48 \text{ mm.dia}^{-1}$); Makkink igual a 30,01% ($0,53 \text{ mm.dia}^{-1}$); Camargo igual 45,83% ($0,69 \text{ mm.dia}^{-1}$). Em termos de desvio médio relativo, o método de Jensen-Haise apresentou um melhor desempenho quando comparado com o método FAO56 Penman-Monteith.

Em relação ao índice de concordância, em ordem crescente os métodos apresentaram os seguintes valores: Hargreaves e Camargo igual a 0,54; Jensen-Haise igual a 0,91; Radiação Solar igual e Makkink iguais a 0,98. Nesse caso, os métodos que apresentaram melhor desempenho foram o de Makkink e Radiação Solar. No entanto, o método de Jensen-Haise apresentou valores muito próximos ao de Makkink e Radiação Solar. Por outro lado, os métodos de Camargo e Hargreaves apresentaram um desempenho similar e inferior aos demais métodos. Por esse índice, tem-se que os

métodos de Makking, Radiação Solar e Jensen-Haise obtiveram desempenho satisfatório com valores próximos a 1.

Para o coeficiente de correlação, em ordem crescente, os métodos apresentaram os seguintes valores: Camargo igual a 0,36; Hargreaves igual a 0,43; Makkink 0,76; Jensen-Haise e Radiação Solar 0,82. Dessa forma, os métodos de Makkink, Jensen-Haise e Radiação Solar apresentaram uma correlação muito forte com o método FAO56 Penman-Monteith, enquanto que para Camargo e Hargreaves as correlações foram moderadas.

De acordo com o coeficiente de determinação, somente os métodos de Makkink, Jensen-Haise e Radiação Solar apresentaram valores superiores a 0,50 ou 50%.

Em relação ao coeficiente de confiança, o método da Radiação Solar apresentou um desempenho muito bom ($c = 0,80$), os métodos de Makking e Jansen-haise tiveram um bom desempenho ($c = 0,74$). Os demais métodos tiveram um desempenho ruim com valores iguais a: 0,23 para Hargreaves e 0,20 para Camargo.

Analisando em conjunto os coeficientes de desempenho da tabela 4.2, pode-se concluir que o método da Radiação Solar obteve a melhor combinação de valores e, portanto, o melhor desempenho. Em seguida tem-se o método de Jansen-Haise; Makking; Camargo; e por fim Hargreaves com o pior desempenho. Dessa forma, os índices da tabela 4.2 indicam que os métodos da Radiação Solar, Jensen-Haise e Makkink obtiveram um desempenho satisfatório para a estimativa da ET_o para o local e condições atmosféricas deste estudo.

Em relação às variáveis meteorológicas, pode-se concluir que o método que considerou todas as variáveis que governam o fenômeno (radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar e intensidade do vento) da ET_o foi o que obteve melhor desempenho, ou seja, o método da Radiação Solar. Os métodos que excluíram as variáveis umidade relativa do ar e intensidade do vento, Jensen-Haise e Makking, tiveram desempenho inferior ao método da Radiação Solar. Nesse caso, o descarte da umidade relativa do ar que tem uma correlação muito forte com a ET_o pode ter sido o motivo da diminuição de desempenho desses métodos, tendo em vista a fraca correlação entre a ET_o e U . Os métodos que excluíram as variáveis umidade relativa do ar, intensidade do vento, radiação global e consideraram a radiação no topo da atmosfera, apresentam desempenho inferior mais acentuado, foram eles Hargreaves e Camargo. Embora o método de Hargreaves tenha considerado a temperatura máxima do ar que tem uma correlação muito forte com a ET_o , por outro lado descartou UR e R_g que tem

correlação muito forte e moderada com essa grandeza, respectivamente. Adicionalmente, incluiu R_a que não tem um significado físico direto para a ET_o por não representar as condições reais em superfície, onde o fenômeno investigado ocorre. Por sua vez, o método de Camargo excluiu UR e R_g , considerando T_{ar} e R_a que tem uma correlação moderada e fraca, respectivamente. Além, do fato de R_a não ter um significado físico direto para a ET_o .

Em suma, esses resultados indicam que para o local e condições atmosféricas deste estudo, as variáveis meteorológicas mais importantes para a determinação da ET_o foram, em ordem de influência, a UR, T_{max} , T_{ar} e R_g devido às suas correlações muito forte e moderada. No entanto, mesmo com o uso da T_{max} o método de Hargreaves obteve um desempenho fraco. O descarte da T_{max} pelo método de Camargo não resultou em uma diferença significativa de seu desempenho em relação a Hargreaves. Assim, as variáveis UR e R_g foram as que mais influenciaram a ET_o . Dessa forma, conclui-se que a simplificação dos métodos acarretou numa perda do significado físico de suas equações. Além disso, a natureza empírica dos métodos pode fazer com que eles funcionem bem para o local para onde foram gerados, mas não para locais diferente. Nesse caso, estão os métodos de Hargreaves e Camargo. Assim fica evidenciada a importância da avaliação e ajuste regional dos métodos empíricos de estimativa da ET_o antes de sua aplicação, bem como a influência das variáveis meteorológicas consideradas em suas equações no fenômeno da ET_o .

Tabela 4.2 – Valores do desvio médio absoluto (DMA), Desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2).

Método	DMA (mm)	DMR (%)	d	r	r^2	c	Variáveis Meteorológicas
RS	0,48	30,68	0,98	0,82 (muito forte)	0,67	0,80 (muito bom)	T_{ar}, R_g, UR, U
JH	0,39	21,76	0,91	0,82 (muito forte)	0,67	0,74 (bom)	T_{ar}, R_g
MK	0,53	30,01	0,98	0,76 (muito forte)	0,57	0,74 (bom)	T_{ar}, R_g
CM	0,69	45,83	0,56	0,36 (moderado)	0,13	0,20 (ruim)	T_{ar}, R_a
HG	0,95	70,76	0,54	0,43 (moderado)	0,19	0,23 (ruim)	$T_{ar}, T_{mim}, T_{max}, R_a$

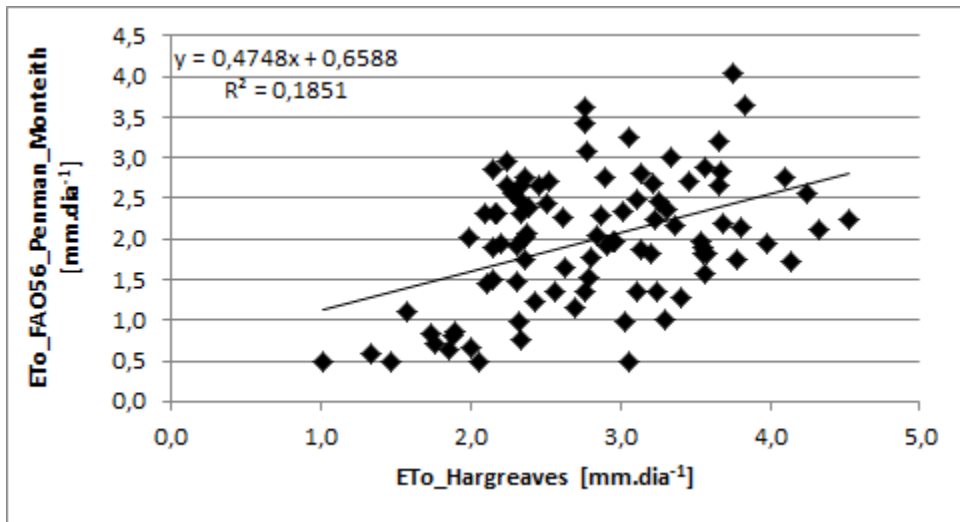


Figura 4.12 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Hargreaves.

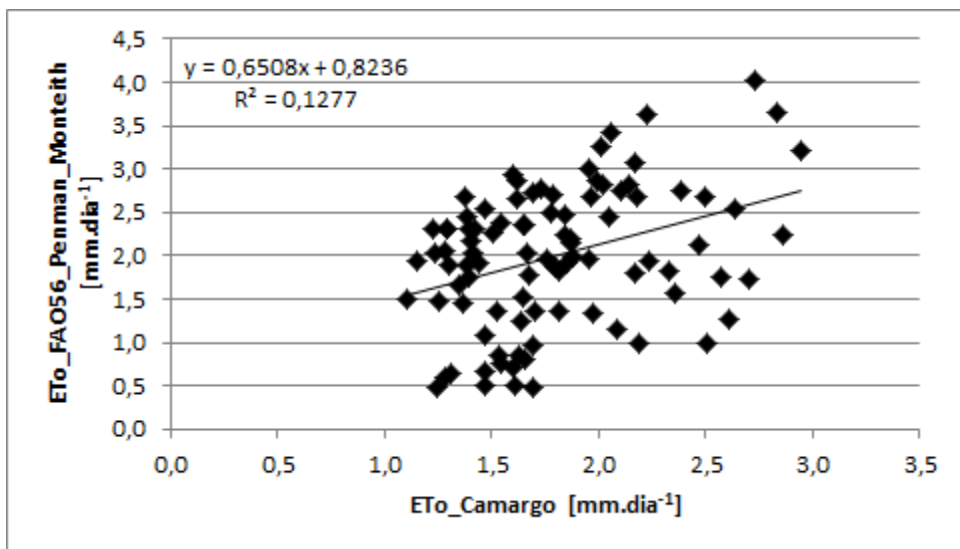


Figura 4.13 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Camargo.

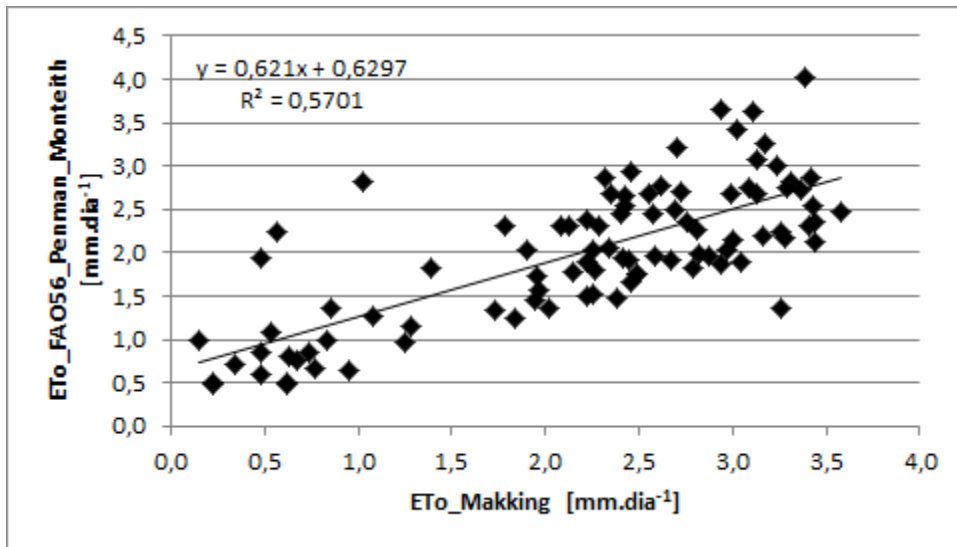


Figura 4.14 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Makking.

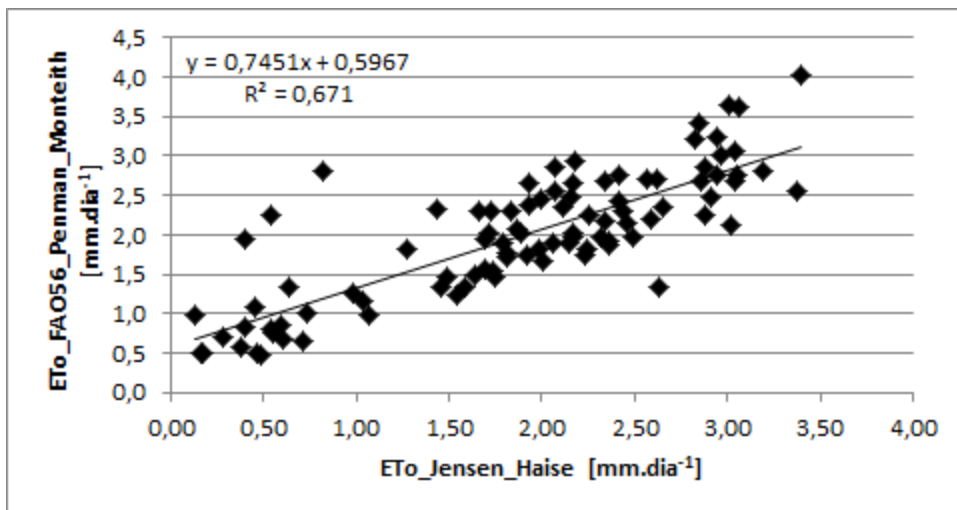


Figura 4.15 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Jensen-Haise.

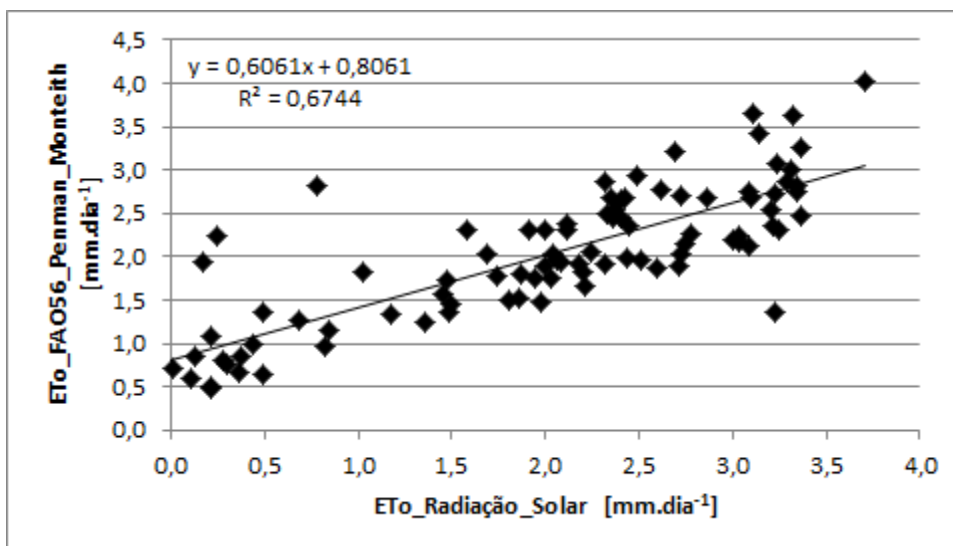


Figura 4.16 – Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Radiação Solar.

Pelos valores do coeficiente de determinação apresentados na tabela 4.3, pode-se observar que os métodos de Hargreaves e Camargo não tiveram uma boa concordância entre si e em relação aos demais métodos avaliados. Nesses casos, o valor máximo de r^2 foi igual a 0,58. Por outro lado, os métodos de Makking, Jensen-Haise e Radiação Solar apresentaram boa concordância entre si. A maior concordância foi entre os métodos de Makking e Jensen-Haise com um r^2 igual a 0,95, em seguida vem os métodos de Makking e Radiação Solar com um r^2 igual a 0,94, e por fim Jensen-Haise e Radiação Solar com um r^2 igual a 0,93.

Tabela 4.3 – Coeficientes de determinação (r) entre os métodos de estimativa da ET_o avaliados.

	HG	CM	MK	JH	RS
HG	1	0,58	0,21	0,24	0,15
CM	0,58	1	0,03	0,10	0,03
MK	0,21	0,03	1	0,95	0,94
JH	0,24	0,10	0,95	1	0,93
RS	0,15	0,03	0,94	0,93	1

Para todo o ciclo da cultura (tabela 4.4) a ET_o total estimada pelos métodos avaliados apresentou em ordem crescente os seguintes desvios absolutos em relação ao método FAO56 Penman-Monteith: o menor DMA foi obtido por Radiação Solar com valor igual a -3,08 mm (-1,64%); em seguida vem Jensen-Haise com -11,09 mm (-5,91%); depois Camargo com -18,28 mm (-9,74%); Makking com 19,21 (10,24%); e por fim Hargreaves com 77,14 mm (41,11%). Pode-se observar que os métodos de Makking e Hargreaves superestimaram e os demais subestimaram a ET_o total em relação a FAO56 Penman-Monteith.

Tabela 4.4 – Valores de ET_o total durante o ciclo da cultura e seus desvios absolutos e relativos em relação ao método FAO56 Penman-Monteith.

Método	ET_o _Ciclo (mm)	DA_Total_Ciclo (mm)	DR_Total_Ciclo (%)	Variáveis Meteorológicas
FPM	187,63	-	-	R_i, S, T, UR, U
RS	184,55	-3,08	-1,64	T, R_g, UR, U
JH	176,54	-11,09	-5,91	T, R_g
CM	169,35	-18,28	-9,74	T, R_a
MK	206,84	19,21	10,24	T, R_g
HG	264,76	77,14	41,11	T, T_{min}, T_{max}, R_a

Embora, para o ciclo como um todo o desempenho do método de Camargo tenha melhorado significativamente, deve-se considerar que nesse caso há uma compensação dos desvios positivos e negativos ao longo do ciclo vegetativo da cultura. Isso significa dizer que dias em que a ET_o foi superestimada (desvios positivos) foram compensados por dias em que essa grandeza foi subestimada (desvios negativos). Isso resulta, em aplicar por irrigação mais e menos água do que a planta realmente necessita em dias com desvios positivos e negativos, respectivamente. Essa não é uma situação desejável para o manejo de irrigação, porque submete a planta a estresse hídrico nos dias em que o desvio é negativo, podendo agravar a situação se houver uma sequência de dias assim, principalmente quando o manejo é feita com base em métodos com desvio médio absoluto elevado, como o caso de Camargo.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Os resultados analisados permitem concluir que:

- i) Em ordem de importância para o fenômeno da ET_o na região de estudo, tem-se a seguinte classificação em relação às variáveis meteorológicas: umidade relativa do ar e temperatura máxima do ar com influência muito forte; temperatura média do ar e radiação solar global com influência moderada; e por fim temperatura mínima do ar, radiação solar no topo da atmosfera e intensidade do vento com fraca influência;
- ii) Os índices utilizados para a avaliação dos métodos indicam que o método da Radiação Solar obteve o melhor desempenho, seguido por Jansen-Haise e Makking. Esses métodos podem ser utilizados na região de estudo por terem tido um bom desempenho. Entretanto, preferencialmente, indica-se a seguinte ordem para o uso dos métodos em função da disponibilidade dos dados na região de interesse: 1º FAO56 Penman-Monteith, 2º Radiação Solar; 3º Jensen-Haise e 4º Makking. Por outro lado, os métodos de Hargreaves e Camargo não são indicados devido ao desempenho ruim dos mesmos;
- iii) O melhor desempenho do método da Radiação Solar pode estar relacionado ao fato desse método utilizar todas as variáveis meteorológicas que influenciam o fenômeno da ET_o (radiação solar global, temperatura do ar, umidade do ar e vento).
- iv) A simplificação dos métodos acarretou numa perda do significado físico de suas equações, principalmente para aqueles que excluíram a umidade relativa do ar e a radiação solar global de suas equações;
- v) Ficou evidenciada a importância da avaliação e ajuste regional dos métodos empíricos de estimativa da ET_o antes de sua aplicação, bem como a influência das variáveis meteorológicas consideradas em suas equações no fenômeno da ET_o em âmbito regional.

Como recomendações, sugere-se a avaliação de outros métodos que tenham uma menor exigência de dados em relação ao FAO56 Penman-Monteith, bem como a formação de uma base de dados para o ajuste de métodos empíricos para a estimativa da ET_o na região de estudo.

Referências Bibliográficas

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: *Guidelines for computing crop water requirements*. Rome, FAO. 301 p.

Allen, R. G.; Tasumi, M. & Trezza, R. 2002. SEBAL: *Surface Energy Balance Algorithms for Land*. Idaho. 98 p. (Manual de Treinamento Avançado, versão 1).

Amorim, C.A.; Sedyama, G.C.; Sobrinho, J.E. & Justino, F.B. 2007. Análise dos efeitos diretos e indiretos das variáveis meteorológicas no processo de evapotranspiração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Amorim, M.C.; Grossi, M.C.; Justino, F.; Sedyama, G.C.; Costa, L.C.; Júnior, J.L.C.S.; Alves, M.E.B. & Eleutério, M.M. 2007. Avaliação da REANÁLISE do ECMWF na estimativa da evapotranspiração de referência em Viçosa (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Amorim, A.; Souza, J.L. & Lyra, G.B. 2011. Evapotranspiração de Referência Estimada por Métodos de Dados Mínimos Climáticos para o Estado de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Araújo, C.A.B.; Righetto, A.M.; Barbosa, J.K.F. & Mattos, A. 2005. Avaliação de desenvolvimento da agricultura irrigada na região de Cruzeta, RN. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, João Pessoa, 2005. *Trabalho completo*, João Pessoa, SBRH, CD-ROOM.

Araújo, W.F.; Costa, S.A.A.; Rodrigues, T.G. & Maciel, F.C.S. 2007. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, RR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Araújo, J. E. M.; Silva, T. G. F.; Cruz Neto, J. F. & Silva, F. V. 2011. Consumo de Água do Feijão Caupi Usando Dados de Estações Meteorológicas Convencional e Automática em Arcoverde, PE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Barros, V.R.; Souza, A.P.; Carvalho, D.F.; Silva, L.D.B. & Salvador, C.A. 2007. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. Trabalho completo, Aracaju, SBA, CD-ROOM.*

Bastiaanssen, W.G.M. 1995. *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain*. Wageningen Agricultural University, Ph.D. Thesis, 273 p.

Bastiaanssen, W. G.M.; Menenti, M.; Feddes, R. A. & Holtslag, A. A. M. 1998a. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Validation. *Journal of Hydrology, 212 – 213: 198 – 212.*

Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Moreno, J. F.; Roenink, G. J. & Van der Wal T. 1998b. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology, 212-213: 213-229.*

Bastiaanssen, W. G. M. 2000. SEBAL: Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hidrology, 229: 87-100.*

Batista, W.R.M.; Faccioli, G.G.; Silva, A.A.G. & Aguiar Netto, A.O. 2007. Determinação da evapotranspiração de referência na região de Canindé do São Francisco-SE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. Trabalho completo, Aracaju, SBA, CD-ROOM.*

Bezerra, F.M.L. & Oliveira, C.H.C. 1999. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 3(2): 173-7.*

Bezerra, B.G. 2006. *Balanço de Energia e Evapotranspiração em Áreas com Diferentes Tipos de Cobertura de Solo no Cariri Cearense Através do Algoritmo SEBAL*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 127 p.

Borges, A.C. & Mediondo, E.M. 2005. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na bacia do rio Jacupiranga, SP. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, João Pessoa, 2005. Trabalho completo, João Pessoa, SBRH, CD-ROOM.*

Burman, R. & Pochop, L.O. 1994. *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Amsterdam, ELSEVIER. 278 p.

Campeche, L.F.S.M. 2002. *Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da cultura da lima ácida "Tahiti" (Citrus latifolia Tan)*. Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Escola Superior "Luiz de Queiroz", Tese de Doutorado, 67 p.

Cardoso, M.A.G. & Marcelino, B.C. 2005. Estimativa sazonal da evapotranspiração regional para o Rio Grande do Sul. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, João Pessoa, 2005. Trabalho completo, João Pessoa, SBRH, CD-ROOM.*

Carmo, R.L.; Ojima, A.L.R.O; Ojima, R. & Nascimento, T.T. 2005. Água virtual: o Brasil como grande exportador de recursos hídricos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, João Pessoa, 2005. Trabalho completo, João Pessoa, SBRH, CD-ROOM.*

Carvalho, D.F.; Silva, L.D.B.; Folegatti, M.V.; Costa, J.R. & Cruz, F.A. 2006. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, 14(2): 1-9.*

Carvalho, D.F.; Silva, L.D.B.; Guerra, J.G.M.; Cruz, F.A. & Souza, A.P. 2007. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, 27(2): 363-372.

Carvalho, D.F. de; Neto, D.H.O; Ribeiro, R.L.D.; Guerra, J.G. M. & Rouws, J.R. C. 2011. Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da Beterraba. *Engenharia Agrícola*, 31(2): 269-277.

Castro, P.R.C. & Kluge, R.A. 1999. *Ecofisiologia de cultivos anuais*. São Paulo, NOBEL. 126 p.

Christofidis, D. 2001. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. *Revista Item*, 49: 8-13.

Costa, G.B; Santos, J.S.; Júnior, R.N.A.; Gomes, A.C.S.; Silva, R.G; Nunes, H.G.G.C.; Rabelo, F.D & Filho, M.R.T. 2011. Estimativas de Evapotranspiração por Métodos Meteorológicos em uma Cultura de cana-de-açúcar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Costa, V.S.; Paiva, C.M. & Souza, A.S. 2011. Comparação de Métodos para Estimativa da Evapotranspiração na Bacia do Córrego Sujo em Teresópolis Rio de Janeiro – Brasil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Dantas Neto, F.S. 1999. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró - RN. *Engenharia na Agricultura*, 7(1): 46-55.

Doorenbos, J. & Kassam, A.H. 1979. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Roma, FAO. 306 p. (tradução de H.R. Gheyi, A.A. de Sousa, F.A.V. Damasceno, J.F. de Medeiros. 1994. Campina Grande, UFPB. 306p. Irrigação e drenagem, FAO 33).

Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome: FAO. 179 p. (FAO 24).

Faccioli, G.G.; Batista, W.R.M.; Silva, A.A.G. & Aguiar Netto, A.O. 2007. Determinação da Evapotranspiração de Referência na Região de Frei Paulose. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Faria, R.A.; Carvalho, D.F.; Ribeiro, A. & Oliveira, M.A.A. 2000. Influência do Método de Estimativa da Evapotranspiração de Referência na Demanda de Irrigação Suplementar para o Milho (*Zea mays* L.), na Bacia do Rio Verde Grande (MG). *Ciência Agrotécnica*, 24 (Edição Especial): 187-196.

Fernandes, C.; Corá, J.E. & Araújo, J.A.C. 2004. Utilização do Tanque Classe A para a estimativa da evapotranspiração de referência dentro de casa de vegetação. *Engenharia Agrícola*, 24(1): 46-50.

Fernandes, L.C. 2006. *Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ*. 2006. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 142 p.

Fernandes, E.J. 2007. Determinação da evapotranspiração da cultura da soja por intermédio da Razão de Bowen comparado com os métodos de Penman Monteith e Tanque Classe A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Fernandes, D.S.; Saraiva, I. & Michiles, E. 2011. Estimativa de Evapotranspiração de Referência pelo Método de Hargreaves para Condições Úmidas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Ferreira, A.S. & Meirelles, M.S.P. 2011. Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na Mesorregião do Sul Goiano. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV, Curitiba, 2011. Trabalho completo*, Curitiba, INPE, CD-ROOM.

Ferri, M.G. 1985. *Visiologia vegetal*. São Paulo, EPU. v.1. 362 p.

Ferronato, A.; Chig, L.A.; Goulart, D.B.; Junior, J.H.C.; Pereira, L.C.; Biudes, M.S.; Oliveira, A.L.F.; Souza, P.R.F; Arruda, R.M.; Toledo, C.L.B. & Miranda, A.N. 2007. Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Santo Antônio do Levegermt. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Fietz, C.R.; Silva, F.C. & Urchei, M.A. 2005. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, 13(2): 250-255.*

Fietz, C.R.; Campeche, L.F. & Silva, M.P. 2011. Avaliação de Dois Lisímetros de Pesagem para Medida da Evapotranspiração de Culturas Anuais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Fooladmand, H.R.; Zandilak, H. & Ravanan, M.H. 2008. Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science, 54: 321-330.*

França Neto, A.C.F.; Mantovani, E.C.; Sedyama, G.C.; Leal, B.; Simão, F.R. & Zinato, C.E. 2003. Comparação entre métodos simplificados de estimativa de ET_0 nas regiões do Triângulo Mineior e do Oeste da Bahia. *In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, Araguari, 2003. Trabalho completo*, Araguari, Universidade Federal de Uberlandia, p. 102-106.

Galleguillos, M.; Jacob, F.; Prévot, L.; French, A. & Lagacherie, P. 2011. Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed from ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 115: 1326–1340.

Giacomoni, M.H. & Mendes, C.A.B. 2008. Estimativa da Evapotranspiração Regional por meio de Técnicas de Sensoriamento Remoto Integradas a Modelo de Balanço de Energia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13(4): 33-42.

Hallal, M.O.C.; Radünz, A.L. & Shöffel, E.R. 2011. Comparação entre Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Pelotas-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Henrique, F.A.N. 2006. *Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande-PB*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 107 p.

Hernandez, F.B.T.; Taghvaeian, C.N.S. & Teixeira, A.H.C. 2011. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV, Curitiba, 2011. *Trabalho completo*, Curitiba, INPE, CD-ROOM.

Howell, T.A.; McCormick, R.L. & Phene, C.J. 1985. Design and instalation of large weighing lysimeters. *Transactions of the ASAE*, 28(117): 106-125.

Jessen, M.E.; Burman, R.D. & Allen, R.G. 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York, ASCE. 332 p.

Jin, Y.; Randerson, J.T. & Goulden, M.L. 2011. Continental-scale net radiation and evapotranspiration estimated using MODIS: satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2302–2319.

Kobiyama, M. & Chaffe, P.L.B. 2008. Water balance in Cubatão-Sul river catchment, Santa Catarina, Brazil. *Revista Ambi-Água*, 3(1) 5-17.

Larcher, W. 2000. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos, Ed. RiMa. 531 p.

Leivas, J.F.; Andrade, R.G.; Nogueira, S.F. & Bolfe, E.L. 2011. Estimativa da Evapotranspiração em Áreas com Diferentes Características Ambientais Utilizando o Algoritmo Sebal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Lyra, G.B; Souza, J.L.; Medeiros, R.P.; Junior, R.A.F; Anjos, F.A.; Lima, R.A.S & Sá, L.A. 2011. Eficiência no Uso da Água para o Milho, em Quatro Épocas de Semeadura, no Agreste de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Maeda, E.E; Wiberg, D.A. & Pellikka, P.K.E. 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31: 251-258.

Martins, C.S; Reis, E.F. & Araujo, G.L. 2011. Estimativa da Evapotranspiração de Referência no Município de Alegre – ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Mavi, H.S. & Tupper, G.J. 2004. *Agrometeorology Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. New York, The Haworth Press. 364 p.

Meireles, M. 2007. *Estimativa da Evapotranspiração Real pelo Emprego do Algoritmo SEBAL e Imagem Landsat 5 – TM na Bacia do Acaraú, CE*. 2007. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 89 p.

Mendonça, E.A. 2008. *Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim-PB*. 2008. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 114 p.

Menezes, S.J.M.C.; Andrade, R.G.; Sedyama, G.C.; Soares, V.P. & Gleriani, J.M. 2011. Estimativa dos componentes do Balanço de Energia e da Evapotranspiração em Plantios de Eucalipto utilizando o algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 – TM. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV*, Curitiba, 2011. *Trabalho completo*, Curitiba, INPE, CD-ROOM.

Miranda, K.R.; Diniz, W.J.S.; Silva, T.G.F.; Santos, J.E.O.; Pereira, P.C. & Queiroz, M.G. 2011. Métodos Alternativos para a Estimativa da Evapotranspiração de Referência no Sertão do Vale do Pajéu-PE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII*, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Montovani, E.C. 1993. *Desarrollo y Evaluacion de Modelos para el Manejo del Riego: Estimacion de la Evapotranspiracion y Efectos de la Uniformidad de Aplicacion del Riego sobre la Produccion de los Cultivos*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade de Cordoba, Tese de Doutorado, 40 p.

Mu, Q.; Zhao, M. & Running, S.W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115: 1781–1800.

Mudrik, A.S.; Faccioli, G.G.; Souza, L.O.C. & Mantovani, E.C. 2002. Comparação da evapotranspiração de referência (ET_0), estimada pelos modelos teóricos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, com uso do software SISDA. *In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA*, Araguari, 2003. *Trabalho completo*, Araguari, Universidade Federal de Uberlândia, p.129-132.

Neves, L.O.; Oliveira, E.C.; Araújo, J.C.; Silva, M.A.V.; Aguiar, L.J.G.; Gonçalves, P.H.; Freitas, R.A.P.; Rodrigues, M.P.; Catoni, J.M. & Silva, M.E. 2011. Estimativa da Evapotranspiração de Referência Diária para Região de Ituporanga-SC. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII*, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Nicácio, R.M. 2008. *Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 320 p.

Nunes, R.G.; Silva, R.A.; Maciel, G.F.; Sousa, E.S.; Borges, F.W.L. & Brito, R.S. 2011. Estimativa da Evapotranspiração de Referência para o Município de Palmas - TO através do Método de Ivanov. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII*, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Oliveira, M.A.A. & Carvalho, D.F. 1998. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2(2): 132-135.

Oliveira, G.M.; Bispo, R.C.; Leitão, M.M.V.B.R.; Santos, I.M.S. & Lima, C.B.A. 2011. Coeficientes de tanque classe a (kp) para estimativa da evapotranspiração de referência. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII*, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Paiva, C.M. 2005. *Estimativa do Balanço de Energia e da Temperatura da Superfície via Satélite NOAA-AVHRR*. 2005. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 218 p.

Paiva, C.M.; França, G.B.F; Liu, W.T.H & Filho, O.C.R. 2011a. A comparison of experimental energy balance components data and SEBAL model results in Dourados, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 32(6): 1731–1745.

Paiva, C.M.; Tsukahara, R.Y.; França, G.B. & Nicacio, R.M. 2011b. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV*, Curitiba, 2011. *Trabalho completo*, Curitiba, INPE, CD-ROOM.

Pereira, A.R.; Villa Nova, N.A. & Sedyama, G.C. 1997. *Evapotranspiração*. Piracicaba, FEALQ. 183 p.

Pereira, A.R.; Santiago, A.V.; Maggioto, S.R. & Folegatti, M.V. 2001. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 10(1): 51-6.

Peres, J.G. & Scardua, R. 1991. Estudo de métodos agroclimatológicos para estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o), segundo DOORENBOS & PRUITT. *Engenharia Rural*, 2(2): 48-63.

Peres, J.G.; Pereira, A.R. & Frizzone, J.A. 1995. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. *Engenharia Rural*, 6(1): 53-64.

Queiroz, M.G.; Pereira, P. DE C.; Silva, T.G.F.; Souza, L.S.B.; Diniz, W.J. DA S.L.; Miranda, K.R. & Moura, M.S.B. 2011. Desempenho do método de Penman-Monteith FAO56 na estimativa da evapotranspiração de referência usando dados de temperatura do ar no semiárido. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII*, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Rabelo, F.D; Leão, I.B.; Filho, M.R.T & Costa, G.B. 2011. Comparação entre três formas para o cálculo da evapotranspiração diária medida por lisímetro de pesagem. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII*, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Ramos, M.M.; Oliveira, R.A. & Lopes, J.D.S. 2000. Manejo de Irrigação: *quando e quanto irrigar*. Viçosa, CPT. 62 p.

Rosenberg, N.J. 1983. *Microclimate: the biological environment*. New York, John Wiley & Sons Inc. 495 p.

Ruhoff, A.L.; Saldanha, C.B. & Collischonn, W. 2009. Análise Multivariada do Processo de Evapotranspiração em Áreas de Cerrado e Cana-de-Açúcar. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14(4): 137-146.

Salassier, B.; Soares, A.A. & Montovani, E.C. 2006. *Manual de irrigação*. Viçosa, Ed. UFV. 625 p.

Santana, M.J; Resende, B.P.M.C., Cruz, O.C. & Silveira, A.L. 2011. Coeficientes de cultura e evapotranspiração da cultura do alho irrigado. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SBA, 2011. CD-ROOM.

Santana, M.J; Campos, T.M.; Souza, S.S; Pereira, U.C.; Beirigo, J.D.C & Camargos, A.E.V. 2011. Coeficientes de cultura e evapotranspiração do tomateiro irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Santos, W.O; Batista, B.D.O; Sobrinho, J.E; Pereira, V.C; Junior, E.G.C. & Almeida, B.M. 2007. Comparação entre três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) com o método de Penman-Monteith-fao nas condições de Mossoró/RN de 1970 a 2007. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Sediyama, G.C. 1996. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 4(1): i-xii.

Sentelhas, P.C. 2001. Agrometeorologia aplicada à irrigação. *Irrigação*, 1: 63-120.

Sentelhas, P.C. & Folegatti, M.V. 2003. Classe A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1): 111-115.

Silva, A.A.G.; Angelocci, L.R.; Nogueira, L.C. & Andrade, C.L.T. 1993. Avaliação da eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Ilhéus, 1993, *Trabalho completo*, Ilhéus, SBEA, p. 2465-78.

Silva, F.C.; Folegatti, M.V. & Maggiotto, S.R. 1999b. Análise de funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 7(1) 53-58.

Silva, L.D.B. 2003. *Evapotranspiração do capim Tanzânia (Panicum maximum Jacq) e gramabatatais (Paspalum notatum Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem*. Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 93 p.

Silva, D. & Barros Filho, J. 2003. *Estatística*. São Paulo, USP. (Apostila).

Silva, M.T. & Amaral, J.A.B. 2008. Estimativa da evapotranspiração e coeficientes de cultivo do amendoim irrigado pelo método do balanço hídrico no solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 16(1) 67-76.

Silva, D.A.B; Ricce, W.S. & Caramori, P.H. 2011. Planilha eletrônica para o cálculo de evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Silva, T.G.F.; Barbosa, M.L.; Morais, J.E.F. & Souza, L.S.B. 2011. Resposta da evapotranspiração da vegetação caatinga aos cenários regionalizados de mudanças climáticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. *Trabalho completo*, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

Silva, T.G.F.; Morais, J.E.F.; Cruz Neto; J.F. DA, Souza, L.S.B. & Moura, M.S.B. 2011. Evapotranspiração da videira de vinho do vale do Submédio São Francisco para o cenário b1 de mudanças climáticas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Silva, V.J.; Carvalho, H.P.; Silva, C.R. & Pereira, W.J.S. 2011. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alegre de Minas-MG. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Sousa, I.F.; Faccioli, G.; Netto, A.O.A; Silva, A.A.G. & Queiroz, M.G. 2011. Consumo Hídrico da Cultura do Coentro Mediante Utilização de Lisímetro de Lençol Freático Constante. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Souza, L.S.B.; Moura, M.S.B.; Silva, T.G.F. & Sedyama, G.C. 2011. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Petrolina-PE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Tagliaferre, C.; Oliveira, R.A.; Sedyama, G.C.; Cecon, P.R.; Deniculi, W.; Martinez, M.A. & Materan, F.J.V. 2006. Estimativa da evapotranspiração de referência usando minievaporímetro operando com irrigâmetro modificado. *Engenharia na Agricultura, 14(3): 212- 223.*

Tagliaferre, C.; Neto, I.J.S.; Cotrim, C.E.; Costa, H.A.; Santos, L.C.; Barroso; Nilson I. S. & Guimarães, D.U. G. 2011. Uso do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Guanambi-BA. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Tagliaferre, C.; Santos, L.C.; Silva, C.S.; Guimarães, D.U; Neto, I.J.S.; Rocha, F.A.; Paula, A. & Barros, F.M. 2011. Uso do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para as condições climáticas do Planalto de Vitória da Conquista-BA. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Tasumi, M.; Trezza, R.; Allen, R.G. & Right, J.L. 2003. Validation Test on the SEBAL Model for Evapotranspiration via Satellite. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions.

Teixeira . A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Mobimuddin, A.; Bos, M.G.; Moura, M. S.B. & Soares, J.M. 2011. Acesso ao desempenho de irrigação na cultura da mangueira na região semi-árida do nordeste do Brasil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Trezza, R. 2002. *Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control*. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering), Utah State University, 247 p.

Tundisi, J.G, & Tundisi, T.M. 2005. *A água*. São Paulo, Publifolha (Folha Explica). 120 p.

Turco, J.E.P. 2002. *Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)*. Livre-Docência em Eletrificação Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 85 p.

Uliana, E.M.; Silva, J.G.F. & Martins, C.A.S. 2011. Estimativa da evapotranspiração potencial da interbacia do rio Piraquê-AÇU. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo, Guarapari, SBA, CD-ROOM.*

Vanzela, L.S.; Hernandez, F.B.T & Ferreira, E.J.S. 2007. Desempenho da estimativa da evapotranspiração de referência em Ilha Solteira – SP. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XXXVI, Bonito, 2007. *Trabalho completo*, Bonito, SBEA, CD-ROOM.

Vepraskas, M.J.; Huffman, R.L. & Kreiser, G.S. 2006. Hydrologic models for altered landscapes. *Geoderma*, 131(3): 287-298.

Vescove, H.V. & Turco, J.E.P. 2005. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. *Engenharia Agrícola*, 25(3): 713-721.

Vieira, J.P.G.; Souza, M.J.H.; Sousa, F.A. & Teixeira, J.M. 2007. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Diamantina MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Vinukollu, R.K.; Wood, E.F.; Ferguson, C.R. & Fisher, J.B. 2011. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. *Remote Sensing of Environment*, 115: 801–823.

Volpe, C.A. & Cunha, A.R. 2007. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman Monteith (FAO56) com o saldo de radiação medido e estimado em Jaboticabal, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. *Trabalho completo*, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

Willmott, C.J.; Rowe, C.M. & Mintz, Y. 1985. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, 5: 589-606.