

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
MESTRADO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

RONALDO LIMA MOREIRA BORGES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO DIFERENTES
METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DA
TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR

FORTALEZA

2004

RONALDO LIMA MOREIRA BORGES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO DIFERENTES
METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DA
TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Irrigação e Drenagem da Universidade Federal do
Ceará, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e
Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo.

FORTALEZA

2004

B999a

Borges, Ronaldo Lima Moreira

Evapotranspiração de referência utilizando diferentes metodologias para o cálculo da radiação solar global, da temperatura e da umidade relativa do ar/
Ronaldo Lima Moreira Borges. – Fortaleza, 2004. 60 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Agrícola.

1. Agrometeorologia. 2. Necessidade Hídrica. 3.
Penman-Monteith. I. Título

CDD 025.4
CDU 025.036

RONALDO LIMA MOREIRA BORGES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO DIFERENTES
METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DA
TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Irrigação e Drenagem da Universidade Federal do
Ceará, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e
Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo.

Aprovada em 30 / 08 / 2004.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. PhD Renato Sílvio da Frota Ribeiro
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dra. Débora Andréa E. Façanha Morais
Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM

À minha esposa Neiliane
Às minhas filhas Thalia e Mariana

AGRADECIMENTOS

A Deus por, nesta vida, me oferecer todas as oportunidades de ter família e amigos maravilhosos;

À minha esposa Neiliane e às minhas filhas Thalia e Mariana pela paciência, dedicação e amor que me oferecem a todo instante;

Aos meus pais, Fred e Geresa, por todos os esforços que dispuseram para que eu concluísse meus estudos e, principalmente, pela lição de vida;

Ao meu amigo, primo, professor e orientador Benito, que compartilhou seus valiosos conhecimentos, fundamentais para consecução deste trabalho;

Ao professor Thales Vinícius de Araújo Viana pela amizade, conselhos e conhecimentos também essenciais neste trabalho;

Aos amigos e professores Renato Sílvio e Débora Andréa pelas sugestões e participação na banca examinadora;

Aos amigos Engenheiro Agrônomo José Weber Ferreira Cavalcante e o professor Paulo Teodoro de Castro pela valiosa ajuda quando iniciei meus trabalhos com irrigação;

À Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa (FUNCAP) que acreditou em meu projeto e concedeu-me auxílio de bolsa e recursos;

Aos meus colegas, Edinaldo, Guilherme, Humberto, Inês, Luís Neto, Márcio Porto, Mardônio Mapurunga, Silvana, Waleska e ao professor Marcus Bezerra, pela agradável companhia e valiosa troca de experiências e de conhecimentos;

Aos funcionários Maurício (Chocolate), Graça e Josenildo pelo apoio e amizade durante o curso;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para conclusão desta dissertação.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”.

(Chico Xavier)

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO DIFERENTES METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DA TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR.

Autor: Eng./Agr^o Ronaldo Lima Moreira Borges.

Orientador: Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo.

RESUMO

Trata-se de um estudo da estimativa da evapotranspiração de referência com a equação de Penman-Monteith/FAO, fazendo-se uso de diferentes metodologias nos cálculos médios diários da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e do saldo de radiação solar. Os dados utilizados compreenderam o período de janeiro a dezembro de 2002 e foram obtidos em uma estação meteorológica automatizada, localizada no município de Paraipaba, Estado do Ceará (latitude de 3°26' S, longitude de 39°08' W e altitude de 31m). Para o cálculo das médias diárias de temperatura e da umidade relativa do ar utilizou-se a média aritmética de 24 leituras horárias, as equações propostas pela FAO, pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Serviço de Meteorologia do Estado de São Paulo (SMESP). No cálculo, para obtenção do saldo de radiação solar diário, utilizaram-se as equações de radiação global proposta pela FAO (método 1), por Aguiar et al. (método 2), por Glover & McCulloch (método 3) e por Black (método 4). Os resultados mostram que, para a estimativa da evapotranspiração de referência com a metodologia de Penman-Monteith/FAO, podem ser utilizadas todas as equações de temperatura média diária do ar apresentadas, pois o coeficiente de determinação (R^2) apresentou os seguintes valores quando correlacionados com o cálculo de E_{To} utilizando a média obtida pela estação meteorológica automatizada: método FAO (0,9892), método INMET (0,9886) e método SMESP (0,9888). As equações de cálculo da umidade relativa do ar, também, apresentaram o mesmo comportamento, sendo todas as viáveis, obtendo-se os seguintes valores de R^2 : método FAO (0,9972), método INMET (0,9980) e método SMESP (0,9817). Na estimativa do saldo de radiação, influenciado pelas equações apresentadas de radiação solar global, o método de Aguiar et al. ($R^2 = 0,3704$) apresentou a maior correlação de metodologia quando comparada com o método da FAO.

LISTA DE TABELAS

TABELA	1	- Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos do saldo de radiação solar, 2002.....	31
TABELA	2	- Coeficientes de determinação (R^2) resultados das comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ETo obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo do saldo de radiação solar.....	37
TABELA	3	- Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ETo), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da radiação solar global.....	38
TABELA	4	- Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos da temperatura média do ar, 2002.....	39
TABELA	5	- Coeficientes de determinação (R^2) resultados das comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ETo obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura média do ar	44
TABELA	6	- Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ETo), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura média do ar.....	44
TABELA	7	- Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos da umidade relativa do ar, 2002.....	45
TABELA	8	- Coeficientes de determinação (R^2) resultados das comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ETo obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da umidade relativa média do ar.....	50
TABELA	9	- Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ETo), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da umidade relativa média do ar.....	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	1	- Médias mensais dos valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática e com as metodologias propostas por Allen et al., Aguiar et al, Glover & McCulloch e Black, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	32
FIGURA	2	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ET_{O\text{ PADRÃO}}$) e com o saldo de radiação solar obtido com a metodologia proposta por Allen et al. ($ET_{O\text{ ALLEN ET AL.}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	33
FIGURA	3	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ET_{O\text{ PADRÃO}}$) e com o saldo de radiação solar obtido com a metodologia proposta por Angström/Aguiar et al. ($ET_{O\text{ AGUIAR ET AL.}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	34
FIGURA	4	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ET_{O\text{ PADRÃO}}$) e com o saldo de radiação solar obtido com a metodologia proposta por Angström/Glover & McCulloch ($ET_{O\text{ GLOVER}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	35
FIGURA	5	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ET_{O\text{ PADRÃO}}$) e com o saldo de radiação solar obtido com a metodologia proposta por Black ($ET_{O\text{ BLACK}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	36
FIGURA	6	- Médias mensais dos valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática e com as metodologias propostas pela FAO, INMET e SMESP, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	40
FIGURA	7	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{O\text{ PADRÃO}}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pela FAO ($ET_{O\text{ FAO}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	41

FIGURA	8	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{PADRÃO}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pelo INMET (ET_{INMET}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	42
FIGURA	9	Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{PADRÃO}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pelo SMESP (ET_{SMESP}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	43
FIGURA	10	- Médias mensais dos valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa média do ar obtida com a estação meteorológica automática e com as metodologias propostas pela FAO, INMET e SMESP, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	46
FIGURA	11	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{PADRÃO}$) e com umidade relativa do ar obtida com a metodologia proposta pela FAO (ET_{FAO}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	47
FIGURA	12	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{PADRÃO}$) e com umidade relativa do ar obtida com a metodologia proposta pelo INMET (ET_{INMET}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	48
FIGURA	13	- Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{PADRÃO}$) e com umidade relativa do ar obtida com a metodologia proposta pelo SMESP (ET_{SMESP}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.....	49

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Radiação Solar	15
2.1.1 Balanço de Radiação Solar.....	16
2.1.2 Estimativa da Radiação Solar Extraterrestre (R_0).....	16
2.1.3 Estimativa da Radiação Solar Global (R_G)	17
2.2 Temperatura do Ar.....	19
2.3 Umidade Relativa do Ar	19
2.4 Evapotranspiração.....	19
2.4.1 Evapotranspiração de Referência	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Localização e Caracterização da Área	23
3.2 Coleta dos Dados.....	23
3.2.1 Estação Meteorológica Automática	24
3.3 Estimativa do Saldo de Radiação Solar	24
3.3.1 Radiação Solar Extraterrestre (R_0).....	24
3.3.2 Radiação Solar Global (R_G)	25
3.3.3 Saldo de Radiação de Ondas Curtas (R_{NS}).....	26
3.3.4 Saldo de Radiação de Ondas Longas (R_L)	26
3.4 Temperatura do ar.....	26
3.5 Umidade relativa do ar	27
3.6 Estimativa de E_{To} através da equação de Penman-Monteith FAO (E_{ToPM})	28
3.7 Análise Estatística	
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Evapotranspiração de referência em função da metodologia de cálculo da temperatura média do ar	31
4.2 Evapotranspiração de referência em função da metodologia de cálculo da umidade relativa do ar	45
4.3 Evapotranspiração de referência em função da metodologia de cálculo do saldo de radiação solar	31
5 CONCLUSÕES.....	51
6 RECOMENDAÇÕES	52
7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	53
ANEXOS	55

1 INTRODUÇÃO

O Estado do Ceará, nos últimos cinco anos, vem se destacando por avanços significativos na produção agrícola, principalmente na fruticultura irrigada, mostrando ser um potencial na agricultura brasileira. Entretanto, as estações chuvosas ocorridas ao longo dos anos têm se caracterizado por distribuições irregulares aliadas a períodos de estiagens, o que faz com que a agricultura irrigada torne-se uma prática essencial à obtenção de resultados viáveis para os produtores.

Em se tratando de uma região semi-árida, a disponibilidade hídrica no Estado constitui um fator limitante para a produção agropecuária, fazendo com que o conhecimento da distribuição espacial e temporal da transferência de vapor d'água para a atmosfera seja de fundamental importância no planejamento de políticas agrícolas, objetivando o uso racional de água.

O manejo eficiente da irrigação resulta no uso racional do recurso água, visando a otimização da produtividade e minimizando o impacto ambiental. Desta maneira, os sistemas de irrigação devem ser dimensionados para satisfazer, no período de maior demanda, a evapotranspiração das culturas (VERMEIREN, 1997). Esta quantidade de água requerida é estimada em função da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente da cultura (K_c), indicativo da necessidade de água, em cada estágio de desenvolvimento das plantas (DOORENBOS & PRUITT, 1986; ALLEN et al., 1998). Segundo SEDIYAMA et al. (1996), o modelo de Penman-Monteith-FAO é atualmente o mais empregado para a estimativa da ET_o.

As estações meteorológicas automáticas permitem a determinação das variáveis meteorológicas em pequenos intervalos de tempo, conseqüentemente possibilita uma melhor estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith.

Dentre estas variáveis, pode-se destacar, como a mais importante, o saldo de radiação solar, pois além de determinar a quantidade de energia disponível para realização deste processo é responsável pelo aquecimento do ar e do solo e pela fotossíntese. No entanto, na maioria das vezes, o agricultor não dispõe de dados gerados em estações automatizadas, o que limita e compromete a estimativa da evapotranspiração e, conseqüentemente, a eficiência da irrigação pretendida. Existem ainda diferentes métodos de cálculo do saldo de radiação solar global, o que muitas vezes, se torna duvidoso qual o mais próximo da realidade, ou seja, quando o saldo de radiação é obtido com uma estação meteorológica automática, por meio de

um saldo radiômetro ou por meio de outro método podem ser os mais confiáveis para ser usados no cálculo da evapotranspiração.

Outras variáveis, como a temperatura e umidade relativa do ar também apresentam diferentes metodologias de cálculo, quando não se dispõe de equipamentos automáticos com capacidade de medir em intervalos menores e obter a média diária de forma mais próxima da realidade.

Este trabalho tem como objetivo avaliar quais os melhores métodos de estimativa da radiação solar global, da média diária da temperatura e umidade relativa do ar, para serem utilizadas na estimativa da evapotranspiração de referência através da equação de Penman-Monteith-FAO.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Radiação Solar

MOTA (1986) define radiação como sendo a transferência de energia radiante de um objeto para outro, através de ondas eletromagnéticas, sem haver a necessidade de um meio de conexão.

Radiação solar é a energia recebida pela terra, na forma de ondas eletromagnéticas, proveniente do sol. Consiste em uma fonte primária de energia disponível no globo terrestre, e responsável por todos os processos atmosféricos (TUBELIS & NASCIMENTO, 1992).

Denomina-se fluxo de radiação a quantidade de energia radiante recebida, transmitida ou emitida por unidade de tempo. Quando este fluxo de radiação é expresso por unidade de área costuma-se chamar de densidade de fluxo radiante. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda o uso dos termos emitância, para designar o fluxo de radiação emitido e irradiância, para representar o fluxo de radiação incidente (VAREJÃO-SILVA, 2000).

Segundo ALLEN et al. (1998), a radiação que chega em uma superfície perpendicular aos raios solares no topo da atmosfera é denominada constante solar, e equivale a aproximadamente a $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ou $1,96 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$.

VAREJÃO-SILVA (2000) define a constante solar como sendo a quantidade de energia proveniente do sol que, na unidade de tempo, é interceptada por uma superfície plana, de área unitária, perpendicular à direção dos raios solares e situada, fora da influência da atmosfera, a uma distância do sol igual à distância média Terra-Sol. Esta distância, segundo a NASA (2003), corresponde a, aproximadamente, 149.597.870 km.

Devido à variação dessa distância, a constante solar oscila em $\pm 2\%$ de seu valor durante o ciclo anual (OMETTO, 1981).

O fluxo de radiação solar incidente (irradiância) em um determinado local é determinado pelo ângulo formado entre os raios solares e a normal da superfície em questão. Esse ângulo varia em função da hora do dia, das diferentes latitudes e estações do ano. A radiação solar recebida numa superfície horizontal no topo da atmosfera denomina-se de radiação solar extraterrestre (R_0) (ALLEN et al., 1998).

Segundo TUBELIS & NASCIMENTO (1992), ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar é afetada por processos seletivos de reflexão, difusão e absorção. No entanto uma parte desta radiação consegue atingir diretamente a superfície (radiação solar direta), enquanto que outra atinge, somando-se a anterior, a mesma superfície após sofrer o processo de difusão (radiação solar difusa ou do céu). Estes dois fluxos de energia, que chegam ao mesmo tempo e juntos, representam o total de radiação solar que atinge a superfície terrestre: radiação solar global (R_G).

Parte da radiação global é refletida pela superfície da terra, o que depende das características da cobertura dessa superfície como: diferentes vegetações, tipos de solo; sendo 5% para o caso da água e próximo a 25% para maioria dos cultivos (DOORENBOS & PRUITT, 1986).

2.1.1 Balanço de Radiação Solar

O saldo de radiação solar representa a quantidade de energia radiante que é absorvida pela superfície terrestre, resultante da soma dos balanços de radiação de ondas curtas e ondas longas (TUBELIS & NASCIMENTO, 1992).

OMETTO (1981) define o saldo de radiação solar como sendo a radiação disponível ao meio após todas as trocas radiativas efetuadas, ou seja, é a contabilização entre a radiação solar incidente com a radiação solar emitida.

O balanço de radiação de ondas curtas consiste na diferença entre a radiação que incide sobre a superfície terrestre (radiação solar global) e a parte dela que é refletida (radiação solar refletida) (TUBELIS & NASCIMENTO, 1992).

2.1.2 Estimativa da Radiação Solar Extraterrestre (R_0)

Para a estimativa da radiação solar no topo da atmosfera ou radiação solar extraterrestre (R_0), ALLEN et al. (1998), recomendam a seguinte equação:

$$R_0 = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{CS} \cdot d_R \cdot (H \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\theta \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}H) \quad (1)$$

Onde:

R_0 é a radiação solar global diária no topo da atmosfera ou radiação extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

G_{CS} é a constante solar (valor médio de $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ou $2,0 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$);

d_R é o inverso da distância relativa da terra ao sol (raio vetor);

H é o ângulo horário do pôr ou nascer do sol (radianos), calculado pela equação:

$$H = \arccos \cdot [1 - (\tan\theta \cdot \tan\delta)] \quad (2)$$

Onde:

θ é a latitude do lugar (radianos);

δ é a declinação solar (radianos).

Para o cálculo do inverso da distância relativa da terra ao sol e da declinação solar, ALLEN et al. (1998), apresentam as seguintes equações:

$$d_R = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right) \quad (3)$$

$$\delta = 0,4093 \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1,405\right) \quad (4)$$

Onde:

J é o dia Juliano (número de dias do ano de 1 a 365 ou 366 dias, no caso de ano bissexto).

2.1.3 Estimativa da Radiação Solar Global (R_G)

Para a estimativa da radiação solar global (R_G), Angström¹, citado por SILVA et al. (1997), apresentou o seguinte modelo:

$$R_G = R_0 \cdot \left(a + b \cdot \frac{n}{N}\right) \quad (5)$$

Onde:

R_G é a radiação solar global diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo (cal.cm^{-2});

R_0 é a radiação solar global diária no topo da atmosfera (cal.cm^{-2});

a e b são coeficientes empíricos, obtidos através de regressão linear, para cada localidade;

n é a duração do brilho solar ou insolação diária (h) e

N é a duração máxima possível do brilho solar (h).

A duração máxima de brilho solar é dada pela equação:

¹ ANGSTRÖM, A. **Solar e terrestrial radiation**. Quarterly Journal, Royal Meteorological Society, 50:121-26. 1924.

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot H \quad (6)$$

Onde:

H é o ângulo horário do nascer ou pôr do sol (rad).

Os coeficientes a e b da equação de Angström podem variar com as condições atmosféricas e a declinação solar. Quando não dispusermos de dados confiáveis para aplicação na equação de Angström, recomenda-se utilizar os valores de $a = 0,25$ e $b = 0,50$ (ALLEN et al., 1998).

No Estado do Ceará, mais precisamente em Fortaleza, AGUIAR et. al. (1999), utilizando dados de radiação solar e insolação nos anos de 1976 a 1991, obtidos na estação meteorológica da Universidade Federal do Ceará, recomendam para as constantes a e b da equação de Angström os valores de 0,2608 e 0,3092 respectivamente.

TUBELIS & NASCIMENTO (1992) recomendam para quando não se dispuserem das constantes de Angström para uma determinada localidade, que se possam utilizar os valores propostos por GLOVER & MCCULLOCH (1958)²: $a = 0,29 \cdot \cos \theta$, para latitudes (θ) $< 60^\circ$ e $b = 0,52$. Desta maneira a equação (5) pode ser apresentada da seguinte forma:

$$R_G = R_0 \cdot \left(0,29 \cdot \cos \theta + 0,52 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (7)$$

A radiação solar global diária também pode ser estimada em função da nebulosidade diária, com uso da equação de Black (TUBELIS & NASCIMENTO, 1992).

$$R_G = R_0 \cdot (0,803 - 0,340 \cdot C - 0,458 \cdot C^2) \quad (8)$$

Onde:

C é a nebulosidade média diária, calculada pela equação:

$$C = 1 - \frac{n}{N} \quad (9)$$

PEREIRA et al. (2002) obtiveram resultados satisfatórios comparando o modelo de Angström, com coeficientes a e b propostos por CARAMORI et al. (1985)³ com os valores medidos pelo actinógrafo de Robitzsch, obtendo um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,824.

² GLOVER, J. & MCCULLOCH, J.S.F. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quart. J. Royal Met. Soc.**, 84:172-175, 1958.

³ CARAMORI, P. H.; CORREA, A. R.; BORROZZINO, E. Estimativa da radiação solar global diária para Ponta Grossa, PR, a partir da insolação diária. **Poliagro**, v. 7, p. 107-118, 1985.

2.2 Temperatura do Ar

A temperatura do ar à superfície da terra apresenta um comportamento cíclico, passando por uma temperatura máxima e por uma mínima durante o dia. Pela própria definição, a temperatura média diária do ar deveria ser considerada como a média aritmética de todas as temperaturas observadas a intervalos regulares e curtos. No entanto, no Brasil, assim como em quase todos os países, esta “média” é estimada através de um parâmetro chamado de “temperatura compensada” cujo seu valor é calculado através da fórmula desenvolvida por A. SERRA, em 1938 (VAREJÃO-SILVA, 2000).

O curso anual da radiação solar é o principal fator que determina a variação da temperatura do ar, portanto, à medida que aumentamos a latitude, a temperatura média do ar diminui. Outro fator que altera inversamente o valor da temperatura média do ar é a altitude, em média à medida que se eleva 100m, ocorre um resfriamento na ordem de 0,65°C (TUBELIS & NASCIMENTO, 1992).

2.3 Umidade Relativa do Ar

Para ALLEN et al. (1998), a água que está presente na atmosfera pode ser expressa de várias formas, sejam elas através da pressão de vapor, da temperatura no ponto de orvalho ou da umidade relativa, entre outras.

Segundo TUBELIS & NASCIMENTO (1992), a quantidade de vapor de água na atmosfera é proporcional ao aumento do saldo positivo no balanço de radiação. A partir de uma determinada pressão e temperatura, há uma retenção na concentração de vapor d’água (ar saturado). Quando a pressão está estabilizada e a temperatura aumenta, maior será a capacidade do ar em reter vapor d’água.

2.4 Evapotranspiração

Segundo PEREIRA et al. (1997), evapotranspiração (ET) é o termo utilizado para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração, que são controlados pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas.

Emprega-se o termo evapotranspiração para exprimir a transferência de vapor d’água para atmosfera, proveniente de superfícies vegetadas. Essa variável é constituída pela

evaporação da umidade existente no extrato do solo e/ou planta mais a transpiração resultante da atividade biológica dos seres vivos que o habitam (VAREJÃO-SILVA, 2000).

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

Os principais fatores que afetam a evapotranspiração estão relacionados com as condições atmosféricas, a cultura, o manejo e as condições de campo. Dentre os parâmetros meteorológicos que afetam diretamente a evapotranspiração, podem-se destacar: a radiação solar, a temperatura e a umidade do ar e a velocidade do vento. O tipo de cultura, sua variedade e seu estágio de desenvolvimento, bem como as condições nas quais estão dispostas na superfície (rastejante, erreta, espaldeira, etc) também são fatores que influenciam na quantidade de água evapotranspirada por uma superfície vegetada (ALLEN et al., 1998).

VAREJÃO-SILVA (2000) descreve a importância das propriedades físicas da água (principalmente a salinidade) e do solo, assim como da sua coloração e rugosidade, como fatores que interferem no processo evaporativo.

A evapotranspiração depende significativamente da capacidade do ar em remover vapor d'água, da natureza da vegetação, da natureza do solo, principalmente da água disponível na zona do sistema radicular e do fornecimento externo de energia para a superfície evaporante, principalmente pela radiação solar (AZEVEDO, 1999).

Segundo AMATYA et al. (1992)⁴, citado por MEDEIROS (2003), a radiação solar foi a variável meteorológica mais importante no processo de evapotranspiração em estudos realizados na Carolina do Norte (EUA).

A taxa de evapotranspiração tem como principais fatores de estimativas, os que afetam diretamente o saldo de radiação solar e a disponibilidade de água no solo. Pesquisas mostraram que, em plantios adensados de milho, sob condições de déficit hídrico, uma captação eficiente de radiação solar pode redundar em um murchamento das plantas, em consequência do aumento da transpiração (AUBERTINI & PETER, 1961).

Para CHANG (1971), o nível de importância relativa da radiação solar sobre a evapotranspiração de referência é, aproximadamente, de 80%, da umidade do ar de 6% e da velocidade do vento de 14%.

⁴ AMATYA, D.M.; SKAGGS, R.W.; GREGORY, J.D. **Comparison of methods for estimating potential evapotranspiration**. St. Joseph: ASAE, 1992. 27p. (ASAE. Paper, 92-2630).

Para RANAHAAN (1992), uma das considerações mais importantes na seleção das técnicas para o cálculo da evapotranspiração é a de resolução temporal, a qual se refere ao período mínimo durante o qual as estimativas de ETo podem ser realizadas com confiabilidade. Em geral, os métodos que se baseiam ou utilizam-se de valores de radiação solar podem ser recomendados para estimativas horárias e diárias de ETo.

2.4.1 Evapotranspiração de Referência

THORNTHWAITE (1948) introduziu e conceituou evapotranspiração potencial (ETP) como sendo a perda de água por uma superfície de solo úmido suficientemente grande, com suprimento constante e adequado de água, coberto totalmente por vegetação de baixo porte em crescimento ativo, de tal modo que possa desprezar-se o efeito advectivo. A evapotranspiração depende, principalmente, da capacidade do ar em remover vapor d'água, do tipo de vegetação, do tipo de solo, da disponibilidade de água na zona do sistema radicular e do suprimento externo de energia para a superfície evaporante, principalmente pela radiação solar.

SMITH (1991)⁵, citado por PEREIRA et al. (1997), define o termo evapotranspiração de referência (ETo) como sendo a quantidade de água utilizada por uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1} . Essas condições representam a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem falta de água, ou seja, sem restrição hídrica à cultura.

Em vários anos de pesquisas foram desenvolvidas diversas metodologias para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), sejam elas empíricas, semi-empíricas (equações combinadas) ou tanques de evaporação (COSTA & SÁ, 2001).

BERNARDO (1989) classifica os métodos para estimativa da evapotranspiração em diretos e indiretos, sendo estes últimos divididos em dois grupos: o dos evaporímetros e os calculados a partir de equações com variáveis meteorológicas.

Segundo, DOORENBOS & PRUITT (1990) afirmam que o melhor método para estimativa da evapotranspiração é o de Penman modificado pela FAO, pois proporciona erros de $\pm 10\%$ no cálculo da ETo no verão e de até 20% em condições de baixa demanda

⁵ SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.

evaporativa. O modelo mais preciso na estimativa da ETo é o proposto por Penman, seguido do método do Tanque Classe “A”.

O método de Penman foi largamente utilizado devido à fácil compreensão dos processos físicos da evaporação de água em superfícies naturais. Este método é ainda bastante prático, pois utiliza informações meteorológicas de apenas um nível acima da superfície evaporante (THOM & OLIVER, 1977; BRUTSAERT, 1982; LUCHIARI JÚNIOR, 1988).

Segundo JENSEN (1973)⁶, citado PEREIRA et al. (1997), o método de Penman associa os elementos do balanço de radiação com o termo aerodinâmico no estabelecimento de uma equação que utiliza os dados do saldo de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento.

No entanto, a equação de Penman não inclui a função de resistência à transferência de vapor d'água, havendo a necessidade, portanto, de uma combinação com as variáveis aerodinâmicas e da resistência da superfície de uma cobertura vegetal (JENSEN et al., 1990).

Especialistas recomendam a utilização da equação de Penman-Monteith (PM) na estimativa da evapotranspiração de referência, pois esta pode superar eventuais negligências anteriormente identificadas, além de prever valores mais consistentes que o método de Penman modificado pela FAO. (AZEVEDO, 1999; PERREIRA et al. 1997)

⁶ JENSEN, M.E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York, ASCE, 1973. 215p.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Caracterização da Área

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados coletados na Estação Experimental do Centro Nacional de Pesquisa em Agroindústria Tropical, pertencente à EMBRAPA, localizado no Vale do Curu, município de Paraipaba, na região litorânea do Estado do Ceará, com coordenadas geográficas 3°26' de latitude Sul e 39°08' de longitude Oeste e altitude de 31m.

O clima da microrregião de Paraipaba no Vale do Curu, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw', caracterizando-se como clima tropical chuvoso, com temperatura média do mês mais frio maior ou igual a 18 °C e precipitação do mês mais seco inferior a 30mm, onde a época mais seca ocorre no inverno e o máximo de chuvas ocorre no outono (AGUIAR et al., 2003).

3.2 Coleta dos Dados

Os dados climáticos foram coletados na estação meteorológica automática (marca Campbell Scientific), durante o período de janeiro a dezembro de 2002. As variáveis meteorológicas utilizadas foram: radiação solar global (R_G), umidade relativa do ar (UR), temperatura do ar (T), velocidade do vento (V2) (2,0 m de altura) e pressão atmosférica (P).

Os dados armazenados por um datalogger (Campbell Scientific, modelo 21X), programado para realizar as leituras dos sensores a cada minuto, com registros das médias ou totais a cada 60 minutos, ou seja, no final do dia obtinham-se 24 leituras para cada variável. No intervalo de até 10 dias, os dados eram coletados da estação e transferidos, com um módulo de armazenamento (marca Campbell Scientific, modelo SM 192), para um microcomputador fazendo-se uso do software PC208W, onde foram convertidos em planilha eletrônica MS Excel, versão 2002. Após a formatação destes dados, foi realizada uma análise de consistência dos valores obtidos, a fim de se identificar possíveis erros no registro dos mesmos, digitação, ausência registros ou valores nulos.

3.2.1 Estação Meteorológica Automática

A estação meteorológica utilizada na obtenção dos dados de referência para este trabalho apresenta, entre outros, os seguintes sensores e características:

Radiação solar global

Marca Li-Cor, modelo LI-200SZ, calibrado com a saída de 97,1 microamps por 1.000 W.m^{-2} . A calibração apresenta uma variação de $\pm 5\%$, com sensibilidade de $20\mu\text{A}$ por 100 klux. A dependência máxima da temperatura é $\pm 0,15\%$ por $^{\circ}\text{C}$.

Umidade relativa do ar

Marca Campbell Scientif, modelo HMP35C, com escala de 0 a 100% da UR, com precisão de $\pm 2\%$ UR (na faixa de 0 a 90%) ou $\pm 3\%$ (na faixa de 90 a 100%). A dependência máxima da temperatura é $\pm 0,04\%$ UR por $^{\circ}\text{C}$.

Temperatura do ar

Marca Campbell Scientif, modelo HMP35C, com capacidade para medir de -35 a 50°C , apresentando uma precisão de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (na faixa de -24 a 48°C).

Velocidade e direção do vento

Marca RM Young, modelo 03001, instalado a 2,0m de altura e com capacidade para medir de 0 a 50m.s^{-1} .

3.3 Estimativa do Saldo de Radiação Solar

3.3.1 Radiação Solar Extraterrestre (R_0)

Para a estimativa da radiação solar no topo da atmosfera (R_0), utilizou-se a equação (1), composta das seguintes variáveis: dia juliano (J); inverso da distância relativa da terra ao sol (dr); declinação solar (δ) e ângulo horário do pôr ou do nascer do sol (H).

Como as variáveis utilizadas são comuns nas diferentes metodologias de cálculo da evapotranspiração de referência para metodologia de Penman-Monteith (ET_{OPM}), o valor de R_0 será o mesmo para todas as equações propostas.

3.3.2 Radiação Solar Global (R_G)

A radiação solar global (R_G) foi estimada a partir do método (5), para as metodologias propostas por ALLEN (1998), por Angström, utilizando-se os valores de a e b propostos por AGUIAR et al. (1999) e por GLOVER & MCCULLOCH (1958). A equação de Black (TUBELIS & NASCIMENTO, 1992) foi utilizada também como forma de se estimar a radiação solar global (R_G).

As equações propostas para cálculo da R_G têm como variáveis a duração do brilho solar (n) e a duração máxima possível do brilho solar (N). No entanto, na estação meteorológica automática em que foram coletados os dados, não existe equipamento capaz mensurar a variável (n), sendo assim, utilizou-se os valores de insolação diária obtidas em estação convencional medidas com o equipamento do heliógrafo, localizada no cerca de 250m de distância da estação automática.. Na estimativa da duração máxima do brilho solar (N), utilizou-se a equação (6).

A partir desses dados, foi estimada a R_G através das seguintes metodologias:

Método 01: Padrão.

Valores obtidos a partir da estação meteorológica automática, tomando-se como média os valores diários e mensais.

Método 02: FAO – ALLEN et al. (1998).

$$R_{G1} = R_0 \cdot \left(0,25 + 0,50 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (\text{M } 2)$$

Método 03: Angström com coeficientes a e b de Fortaleza propostos por AGUIAR et al. (1999).

$$R_{G2} = R_0 \cdot \left(0,2608 + 0,3092 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (\text{M } 3.)$$

Método 04: Angström com coeficientes propostos por GLOVER & MCCULLOCH (1958).

$$R_{G3} = R_0 \cdot \left(0,29 \cdot \cos \theta + 0,52 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (\text{M } 4)$$

Método 05: Black

$$R_{G4} = R_0 \cdot \left(0,803 - 0,340 \cdot C - 0,458 \cdot C^2 \right) \quad (\text{M } 5)$$

3.3.3 Saldo de Radiação de Ondas Curtas (R_{NS})

O saldo de radiação de ondas curtas foi estimado por meio do balanço entre a radiação solar incidente (radiação global) e a radiação refletida pela superfície vegetada.

Para a estimativa do saldo de radiação de ondas curtas, utilizou-se a seguinte equação:

$$R_{NS} = (1 - \alpha) \cdot R_G \quad (11)$$

Onde:

α é o albedo ou coeficiente de reflexão da cobertura vegetal, empregou-se o 0,23 para uma cultura hipotética (ALLEN et al.1998, PEREIRA et al. 1997).

3.3.4 Saldo de Radiação de Ondas Longas (R_L)

Para estimar o saldo de radiação de ondas longas foi utilizada a equação apresentada por PEREIRA et al (1997).

$$R_L = -\left(0,9 \cdot \frac{n}{N} + 0,1\right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \sigma \cdot (T_{\max}^4 + T_{\min}^4) \cdot \frac{1}{2} \quad (12)$$

Onde:

R_L é o saldo de radiação de ondas longas ($Mj.m^{-2}.dia$)

n é a duração do brilho solar ou insolação diária (h);

N é a duração máxima possível do brilho solar (h);

e_a é a pressão atual de vapor d'água (kPa);

σ é a constante de Stefan-Boltzman ($4,903 \times 10^{-9} MJ.K^{-4}.dia^{-1}$);

T_{\max} é a temperatura máxima diária ($^{\circ}K$) e

T_{\min} é a temperatura mínima diária ($^{\circ}K$).

3.4 Temperatura do ar

Para o cálculo da temperatura média mensal foram utilizadas as médias das temperaturas diárias obtidas por cada uma das metodologias: a primeira, considerada padrão, obtida através da média aritmética das 24 médias horárias da estação automatizada; a segunda, a equação proposta pelo INMET (equação 13); a terceira, a equação proposta pela FAO (equação 14); e a quarta, a equação proposta pelo Serviço Meteorológico do Estado de São Paulo (equação 15).

$$T_2 = \frac{(2 \times t_{21h} + t_{9h} + t_{m\acute{a}x} + t_{m\acute{i}n})}{5} \quad (13)$$

Onde:

T_2 é a temperatura média do ar (°C);

t_{21h} e t_{9h} é a temperatura do ar observada às 21 e às 9 horas, respectivamente (°C);

$t_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima do ar do dia (°C);

$t_{m\acute{i}n}$ é a temperatura mínima do ar do dia (°C);

$$T_3 = \frac{t_{m\acute{a}x} + t_{m\acute{i}n}}{2} \quad (14)$$

Onde:

T_3 é a temperatura média do ar (°C);

$t_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima do ar do dia (°C);

$t_{m\acute{i}n}$ é a temperatura mínima do ar do dia (°C);

$$T_4 = \frac{(2 \times t_{21h} + t_{7h} + t_{14h})}{4} \quad (15)$$

Onde:

T_4 é a a temperatura média do ar (°C);

t_{7h} , t_{14h} e t_{21h} é a temperatura do ar às 07, 14 e às 21 horas, respectivamente (°C).

3.5 Umidade relativa do ar

O cálculo da umidade relativa do ar foi realizado de forma semelhante ao da temperatura, ou seja utilizando-se as mesmas metodologias: a primeira (UR_1), obtida através média aritmética das 24 médias horárias da estação automatizada; a segunda (UR_2), a equação proposta pelo INMET (equação 16); a terceira (UR_3), a equação proposta pela FAO (equação 17); e a quarta (UR_4), a equação proposta pelo Serviço Meteorológico do Estado de São Paulo (equação 18),

$$UR_2 = \frac{(2 \times UR_{21h} + UR_{9h} + UR_{m\acute{a}x} + UR_{m\acute{i}n})}{5} \quad (16)$$

Onde:

UR_2 é a umidade relativa do ar média (%);

UR_{21h} e UR_{9h} é a umidade relativa do ar às 21 e às 9 h, respectivamente (%);

$UR_{m\acute{a}x}$ é a umidade relativa do ar máxima do dia (%);

$UR_{\text{mín}}$ é a umidade relativa do ar mínima do dia (%);

$$UR_3 = \frac{UR_{\text{máx}} + UR_{\text{mín}}}{2} \quad (17)$$

UR_3 é a umidade relativa do ar média (%)

$UR_{\text{máx}}$ é a umidade relativa do ar máxima do dia (%);

$UR_{\text{mín}}$ é a umidade relativa do ar mínima do dia (%);

$$UR_4 = \frac{(2 \times UR_{21h} + UR_{7h} + UR_{14h})}{4} \quad (18)$$

Onde:

UR_4 umidade relativa do ar média (%);

UR_{7h} , UR_{14h} e UR_{21h} são as umidades relativa do ar às 07, 14 e às 21 h, respectivamente (%).

3.6 Estimativa de ETo através da equação de Penman-Monteith FAO (ETo_{PM})

Para estimar a evapotranspiração de referência diária utilizou-se o modelo de Penman-Monteith descrito em Allen et al. (1998):

$$ET_{oPM} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (19)$$

Onde:

ET_{oPM} é a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹);

R_n é o saldo de radiação solar à superfície vegetada (MJ.m⁻².dia⁻¹);

G é a densidade de fluxo de calor sensível no solo (MJ.m⁻².dia⁻¹);

T é a temperatura média do ar (°C);

u_2 é a velocidade do vento medida a 2,0m de altura (m.s⁻¹);

e_s é a pressão de vapor da água na saturação (kPa);

e_a é a pressão de vapor da água atual (kPa);

$e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor d'água (kPa);

Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa.°C⁻¹);

γ é a constante psicométrica (kPa.°C⁻¹).

O saldo de radiação solar foi calculado através da soma dos valores do saldo de radiação de ondas curtas com os valores do saldo de radiação de ondas longas, calculados pela equação (12).

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (20)$$

Na estimativa da evapotranspiração de referência, o valor de G foi considerado igual a zero.

Para calcular a pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura média do ar, foi utilizada a seguinte equação:

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (21)$$

Onde:

e_s é a pressão de saturação do vapor de água (kPa);

T é a temperatura do ar (°C).

A equação 21 foi empregada no cálculo da pressão parcial de vapor d'água.

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100} \quad (22)$$

Onde:

e_a é a pressão parcial do vapor d'água do ar (kPa);

UR é a umidade relativa do ar (%).

O valor da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água foi calculado pela equação (22):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (22)$$

Alguns parâmetros foram considerados como constantes, embora apresentando uma pequena variação, devida à aceitação científica e à fraca variabilidade durante o período das estimativas. O valor da massa específica do ar atmosférico (ρ), por exemplo, considerada como $1,26 \text{ kg.m}^{-3}$ e o calor latente de evaporação da água (λ) considerado como $2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$, visto que λ é uma função muito fraca no intervalo de variação da temperatura das condições experimentais (AZEVEDO, 1999).

3.7 Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizados, sendo cada tratamento consistiu das diferentes fórmulas utilizadas para o cálculo da radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente, e as repetições foram a evapotranspiração de referência estimadas com médias mensais da radiação solar, temperatura e umidade relativa. Totalizando na radiação solar 60 unidades experimentais, e 48 na temperatura e umidade relativa do ar.

Os dados foram analisados estatisticamente através do programa STAT, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, comparando as diferentes equações utilizadas para o cálculo da radiação solar, temperatura e umidade relativa. As análises foram realizadas com os cálculos de evapotranspiração calculados através de médias mensais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Evapotranspiração de referência em função da metodologia de cálculo do saldo de radiação solar

Comparando-se a estimativa da evapotranspiração de referência utilizando-se como padrão a radiação solar global registrada pela estação meteorológica automática, com as equações propostas por Allen et al., por Angström e coeficientes de Aguiar et al., por Angström e coeficientes de Glover & McCulloch e por Black, foram obtidos os seguintes resultados:

TABELA 01 - Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos do saldo de radiação solar. Paraipaba, 2002.

Mês	ETo (mm.dia ⁻¹)				
	Padrão	Allen et al.	Angström (Aguiar et al.)	Angström (Glover & McCulloch)	Black
Jan	2,65	4,09	3,24	3,93	3,90
Fev	3,80	4,26	3,43	4,12	4,08
Mar	3,07	3,84	3,10	3,70	3,27
Abr	2,57	3,49	2,84	3,38	2,85
Mai	2,90	3,70	2,88	3,65	3,53
Jun	2,71	3,50	2,71	3,52	3,32
Jul	3,19	3,93	2,98	3,94	3,88
Ago	4,02	4,78	3,71	4,77	4,79
Set	4,34	5,09	3,99	5,02	5,08
Out	4,77	5,42	4,25	5,29	5,33
Nov	4,16	5,14	4,00	5,04	5,07
Dez	4,13	4,93	3,84	4,80	4,80

O mês de maior demanda hídrica, no período estudado, foi o de outubro, quando foi obtido um valor de 4,77mm.dia⁻¹ para a ETo com a metodologia de Penman-Monteith, empregando-se os valores das variáveis meteorológicas registradas na estação automática, considerada como padrão. Esse mês também se apresentou como o de maior demanda hídrica, observando-se os resultados obtidos com as outras quatro metodologias estudadas.

Os valores de ETo obtidos com a metodologia de cálculo da radiação global proposta por Angström e coeficientes por Aguiar et al. apresentaram uma subestimativa, quando comparados aos valores obtidos com a metodologia padrão, em relação aos meses de julho a dezembro, meses da estação seca. E as metodologias propostas por Allen et al., por Angström e coeficientes de Glover & McCulloch e por Black, superestimaram a equação padrão durante todo o ano de 2002, tanto nos valores médios como nos diários.

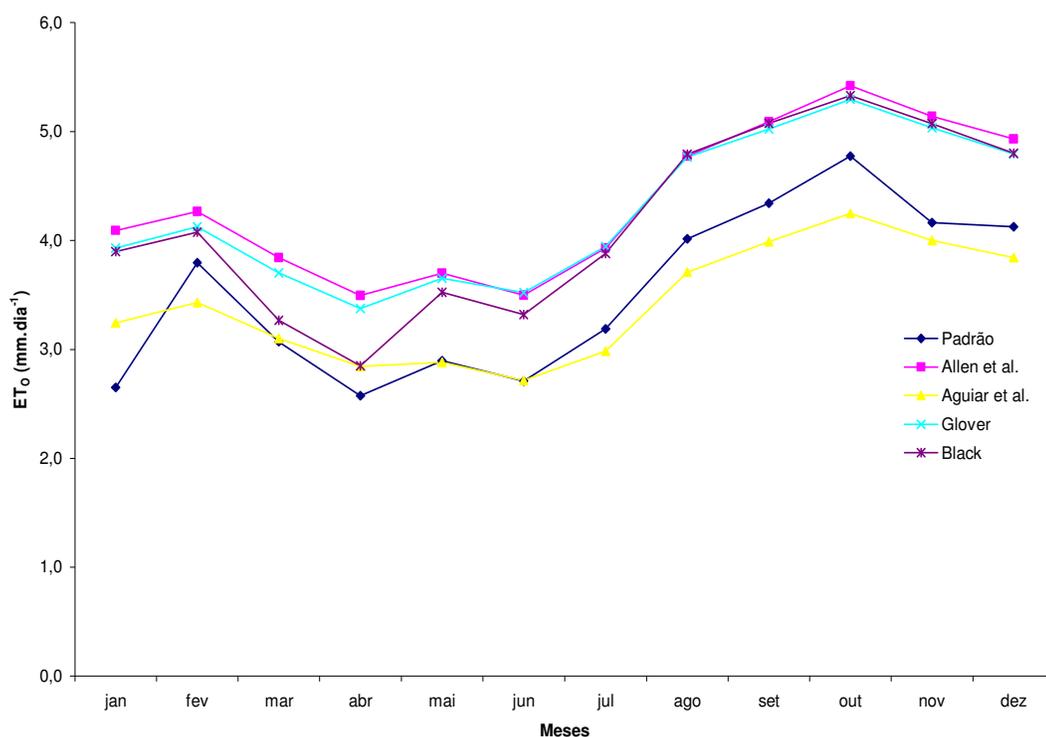


FIGURA 1 - Evapotranspiração de referência estimada com a equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar global obtida em estação meteorológica automática e com as metodologias propostas por Allen et al., Angström (Aguiar et al.) Angström (Glover & McCulloch) e Black, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

Nas figuras 2, 3, 4 e 5 pode-se observar os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, entre os valores de ET_o obtidos por meio das diferentes metodologias de estimativa de radiação solar global com a metodologia padrão, verificou-se que os coeficientes de determinação (R^2) não foram satisfatórios. Sendo 0,2331 para metodologia proposta por Allen et al., 0,3704 para metodologia proposta por Angström (Aguiar et al.), 0,2910 para metodologia proposta por Angström (Glover & McCulloch) e 0,1578 para metodologia proposta por Black. Mostrou-se nas análises de regressão linear que não houve uma boa correlação, entre a comparação dos dados da equação padrão com restante das equações.

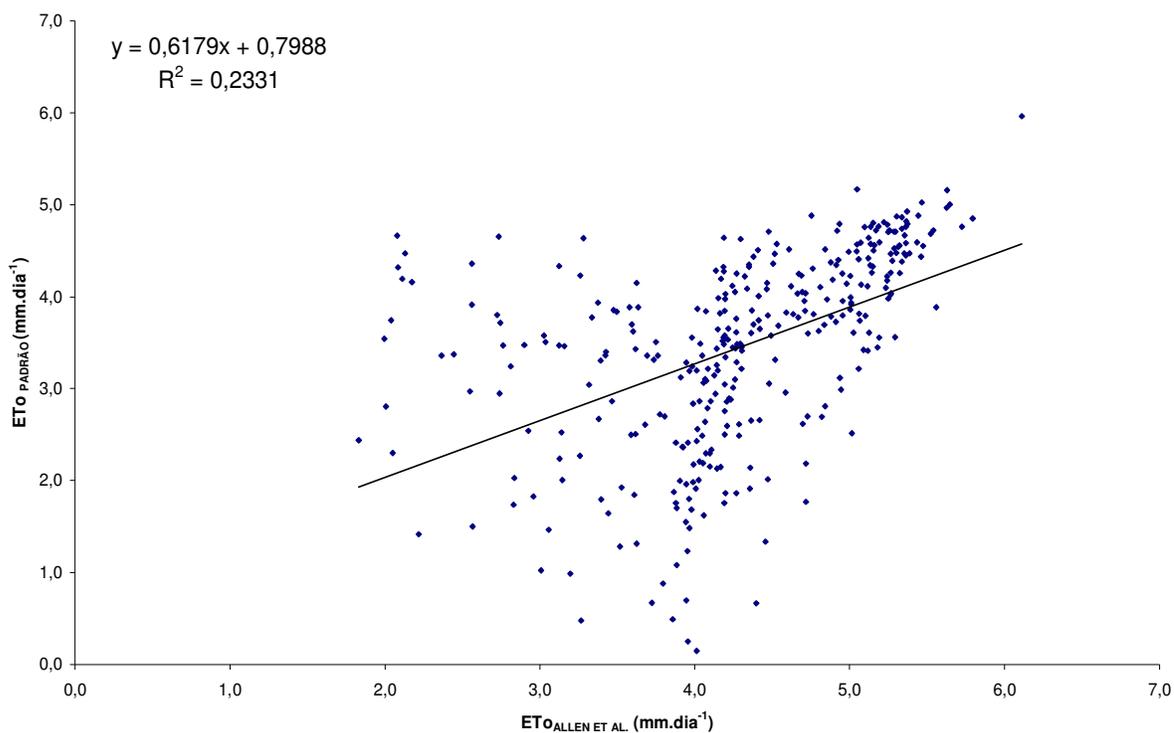


FIGURA 2 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados com a equação de Penman-Monteith e radiação solar global obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{o\text{PADRÃO}}$) e com a radiação solar global obtida com a metodologia proposta por Allen et al. ($ET_{o\text{ALLEN ET AL.}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

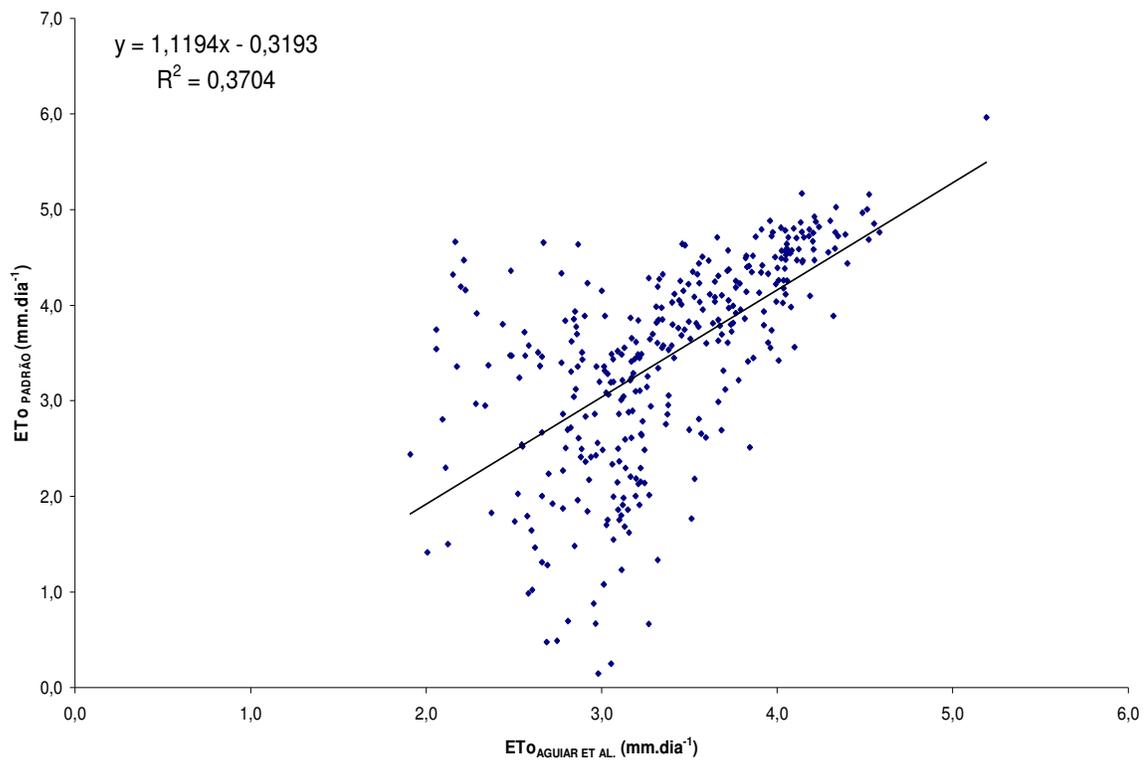


FIGURA 3 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com o saldo de radiação solar obtido com a metodologia proposta por Angström (Aguiar et al.) ($ETo_{AGUIAR ET AL.}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

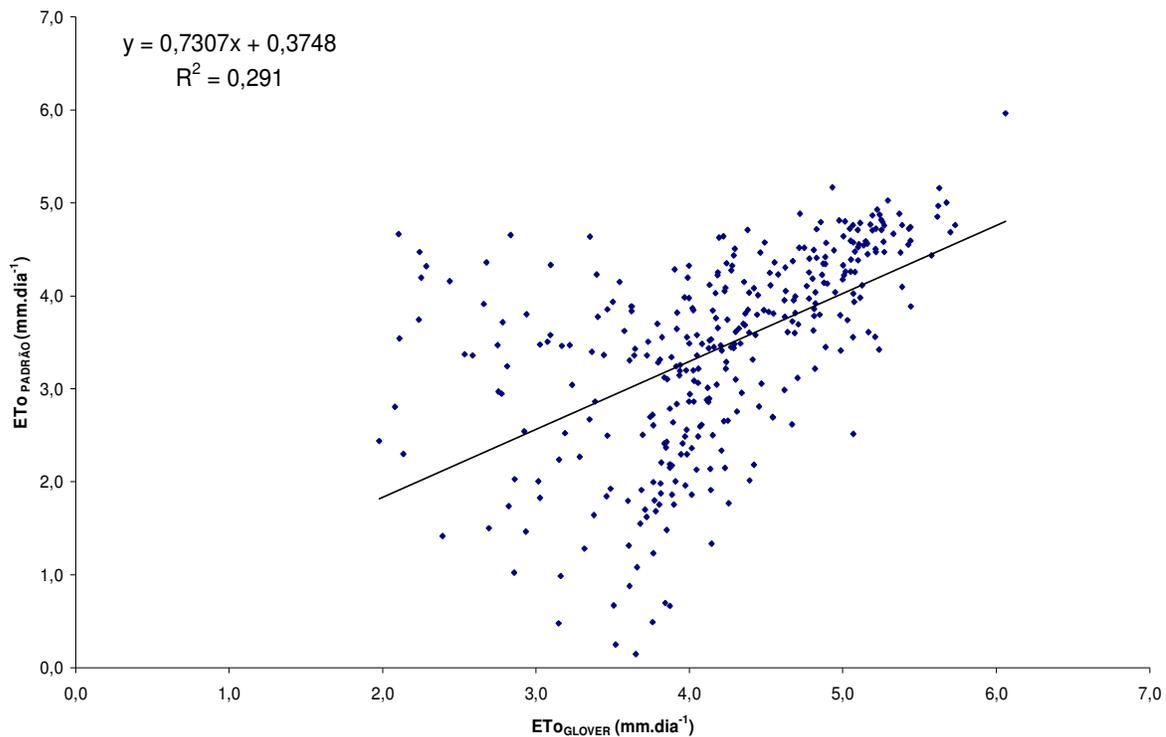


FIGURA 4 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com o saldo de radiação solar global obtida com a metodologia proposta por Angström (Glover & McCulloch) (ETo_{GLOVER}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

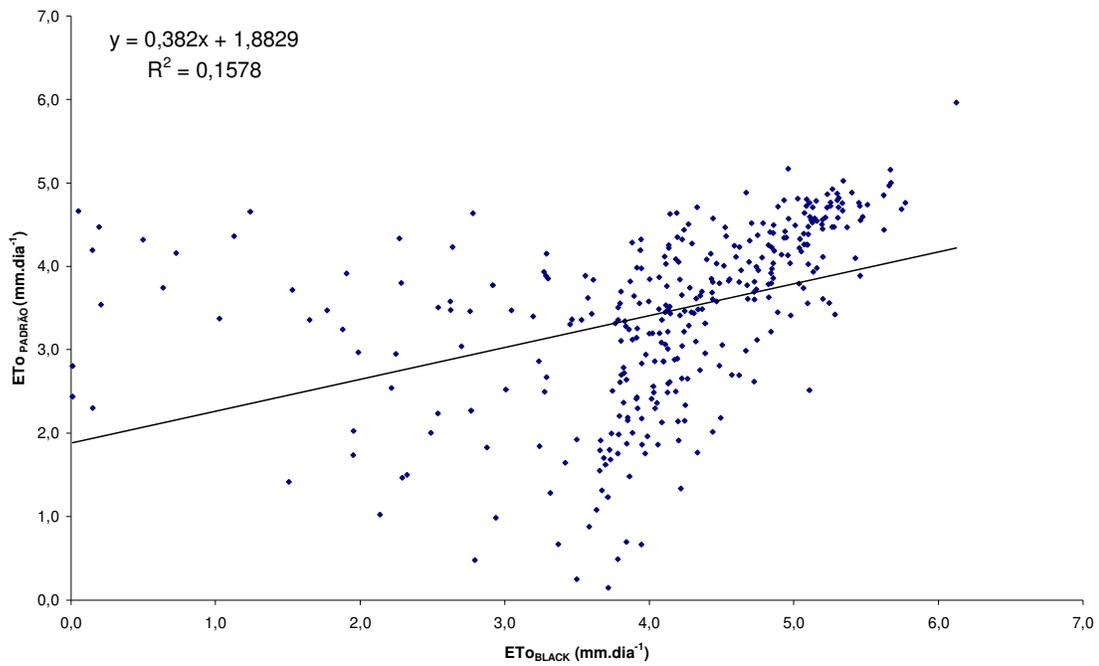


FIGURA 5 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e saldo de radiação solar obtido com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com o saldo de radiação solar global obtida com a metodologia proposta por Black (ETo_{BLACK}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

Diferentemente do que acontece quando se utilizam às médias diárias, os resultados da regressão linear para valores médios mensais de ET_0 resultaram em bons coeficientes de determinação (R^2), mostrando mais consistência no uso das equações para cálculos mensais de radiação e evapotranspiração. Sendo 0,9087 para metodologia proposta por Allen et al, 0,8991 para a metodologia proposta por Angström (Aguiar et al.), 0,9177 para a metodologia proposta por Angström (Glover & McCulloch) e 0,8775 para metodologia proposta por Black. Mostrando que existe uma maior correlação entre os dados diários que as médias mensais.

TABELA 02 - Coeficientes de determinação (R^2) resultados das comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ET_0 obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da radiação solar global.

Variáveis	R^2	
	Diária	Mensal
$ET_{0 \text{ PADRÃO}} \times ET_{0 \text{ ALLEN}}$	0,2331	0,9087
$ET_{0 \text{ PADRÃO}} \times ET_{0 \text{ AGUIAR}}$	0,3704	0,8991
$ET_{0 \text{ PADRÃO}} \times ET_{0 \text{ GLOVER}}$	0,2910	0,9177
$ET_{0 \text{ PADRÃO}} \times ET_{0 \text{ BLACK}}$	0,1578	0,8775

Segundo SAMPAIO (1998), a ocorrência de um coeficiente de determinação (R^2) reduzido faz com que as estimativas propostas não sejam confiáveis, seja pela instabilidade da variável estudada ou simplesmente pelo fato do modelo testado não está adequado à dispersão dos resultados observados.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 03, pode-se observar que houve diferença estatística entre as equações estudadas para a estimativa da evapotranspiração de referencia. Sendo que a única equação de cálculo da radiação solar global, que diferiu da calculada pela estação automática de Paraipaba foi à proposta por ALLEN et al., o restante dos valores médios das equações não diferiram estatisticamente. Podendo ser utilizados como método alternativo de cálculo de radiação solar, para a região estudada. A equação proposta por ALLEN et al. (1998), teve um bom coeficiente de ddeterminação mensal, mas não deve ser utilizada como a única fórmula de cálculo da radiação solar global. Possivelmente por causa de os índices usados nessa equação não serem apropriados para a região de Paraipaba.

TABELA 03 – Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ET_o), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da radiação solar global.

Equações utilizando radiação solar	Evapotranspiração (mm.dia ⁻¹)
ET _o Padrão	3,53 bc
ET _o Allen	4,35 a
ET _o Aguiar	3,41 c
ET _o Glover	4,26 ab
ET _o Black	4,17 abc
D.M.S. (5%)	0,81

Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

4.2 Evapotranspiração de referência em função da metodologia de cálculo da temperatura média do ar

Comparando-se a estimativa da evapotranspiração de referência utilizando-se como padrão o cálculo da média da temperatura do ar, os valores registrados pela estação meteorológica automática, com as equações propostas pela INMET, FAO, e SMESP, foram obtidos os seguintes resultados:

TABELA 04 - Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos da temperatura média do ar. Paraipaba, 2002.

Mês	ET _o (mm.dia ⁻¹)			
	ET _o PADRÃO	ET _o INMET	ET _o FAO	ET _o SMESP
Jan	2,65	2,73	2,77	2,69
Fev	3,80	3,86	3,92	3,83
Mar	3,07	3,02	3,08	3,00
Abr	2,57	2,53	2,57	2,51
Mai	2,90	2,88	2,94	2,86
Jun	2,71	2,73	2,79	2,71
Jul	3,19	3,23	3,30	3,21
Ago	4,02	4,25	4,29	4,21
Set	4,34	4,64	4,64	4,61
Out	4,77	5,01	5,08	4,98
Nov	4,16	4,37	4,42	4,40
Dez	4,13	4,32	4,37	4,29

O mês de maior demanda hídrica, no período estudado, foi o de outubro, quando foi obtido um valor de 4,77mm.dia⁻¹ para a ET_o com a metodologia de Penman-Monteith, empregando-se os valores das variáveis meteorológicas registradas na estação automática, considerada como padrão. Esse mês também apresentou como o de maior demanda hídrica, observando-se os resultados obtidos, com as outras três metodologias estudadas.

Os cálculos de ET_o empregando a metodologia de cálculo da temperatura média do ar proposta pela FAO apresentaram uma superestimativa, quando comparados com os

valores obtidos com a metodologia padrão. Após o mês de junho, para a estação seca para o Estado do Ceará, todos os outros métodos também superestimaram os valores obtidos na estação meteorológica automática.

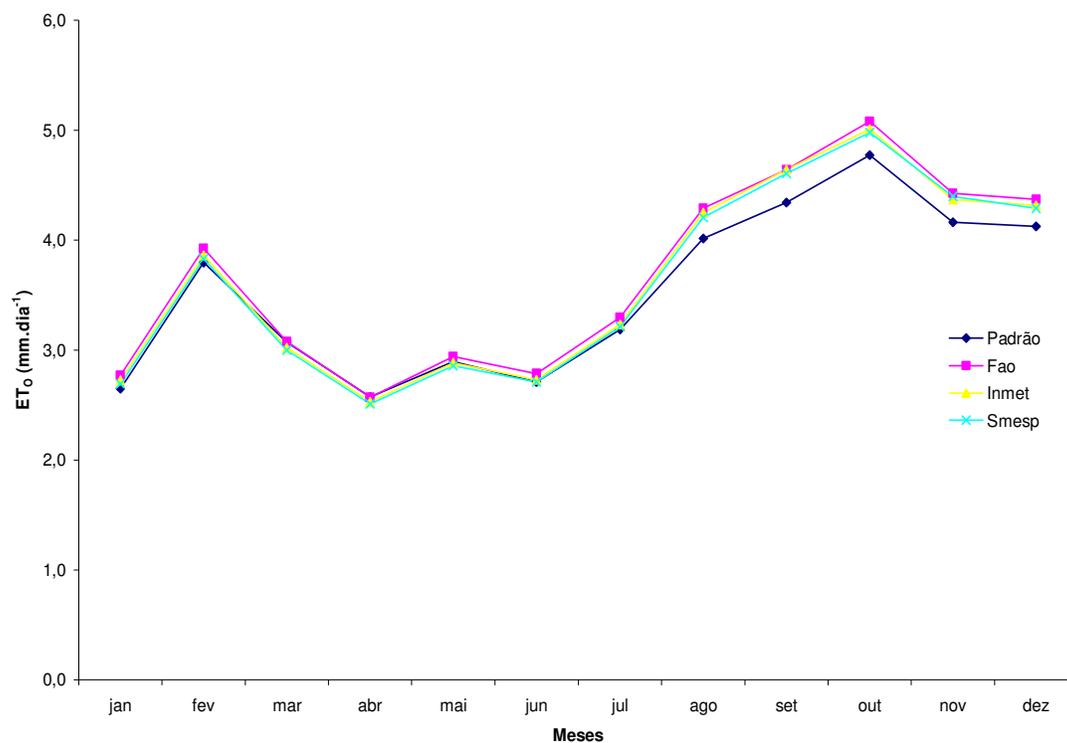


FIGURA 6 - Médias mensais dos valores de evapotranspiração de referência, estimados com à equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida em estação meteorológica automática e com as metodologias propostas pela INMET, FAO e SMESP, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

Observando-se os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, entre os valores de ETo obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura do ar (média diária) com a metodologia padrão, verificou-se que os coeficientes de determinação (R^2) foram excelentes. Sendo 0,9886 para metodologia proposta pelo INMET, 0,9892 para metodologia proposta pela FAO e 0,9888 para a metodologia proposta pelo SMESP (Figuras 7, 8 e 9).

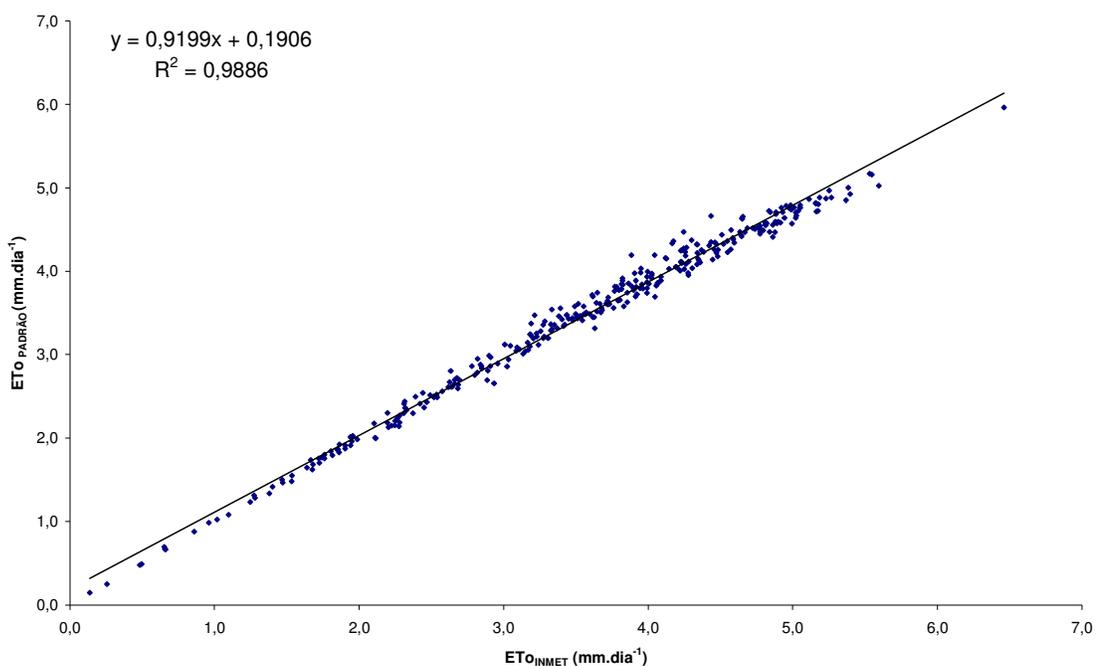


FIGURA 7 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática (ETo_{PADRÃO}) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pelo INMET (ETo_{INMET}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

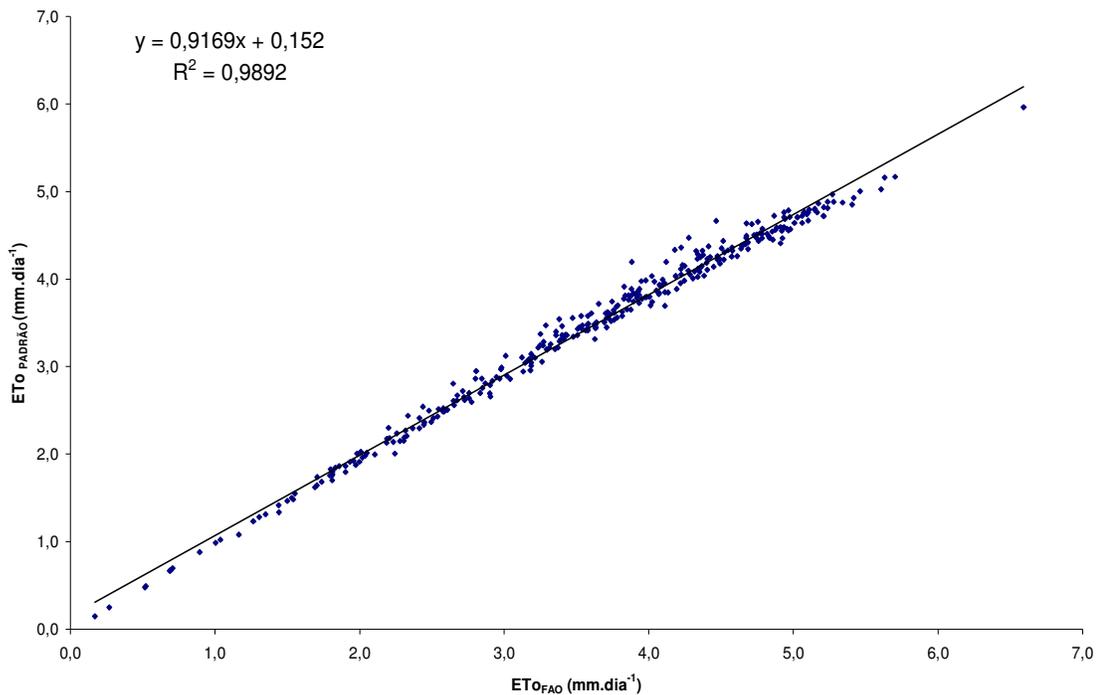


FIGURA 8 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pela FAO (ETo_{FAO}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

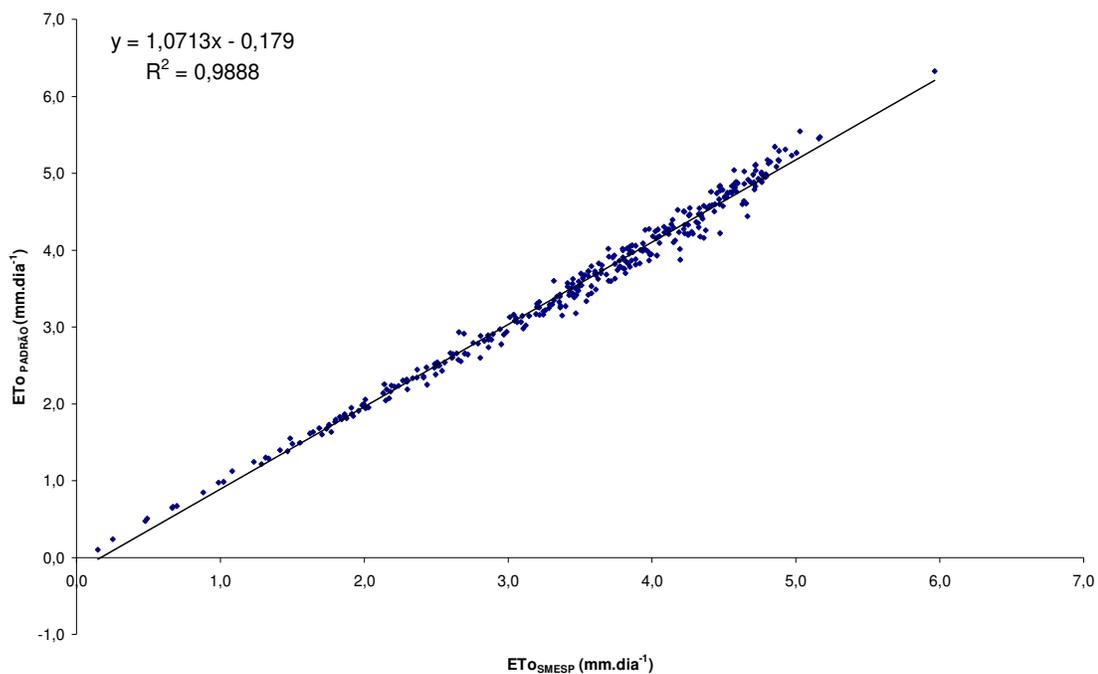


FIGURA 9 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pelo SMESP (ETo_{SMESP}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

Quando consideradas apenas as médias mensais, os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, mostraram coeficientes de determinação (R^2) ainda melhores. Sendo 0,9956 para metodologia proposta pelo INMET, 0,9969 para metodologia proposta pela FAO e 0,9955 para metodologia proposta pelo SMESP.

TABELA 05 - Coeficientes de determinação (R^2) para as comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ET_o obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura média do ar.

Variáveis	R^2	
	Diária	Mensal
$ET_o_{\text{PADRÃO}} \times ET_o_{\text{INMET}}$	0,9886	0,9956
$ET_o_{\text{PADRÃO}} \times ET_o_{\text{FAO}}$	0,9882	0,9969
$ET_o_{\text{PADRÃO}} \times ET_o_{\text{SMESP}}$	0,9888	0,9955

Na Tabela 06, encontram-se os valores de evapotranspiração de referência estimados através de diferentes maneiras para o cálculo da temperatura média do ar. Como pode ser observado não houve diferença estatística entre os valores médios anuais de ET_o . Sendo que de acordo com análise estatística todas as equações usadas para cálculo da temperatura média do ar, podem ser utilizadas para o cálculo da evapotranspiração de referência para a região de Paraipaba.

TABELA 06 – Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ET_o), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura média do ar.

Equações utilizando temperatura média do ar	Evapotranspiração ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$)
$ET_{\text{Padrão}}$	3,53 a
ET_{INMET}	3,68 a
ET_{FAO}	3,63 a
ET_{SMESP}	3,61 a
D.M.S. (5%)	0,92

Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de tukey.

4.3 Evapotranspiração de referência em função da metodologia de cálculo da umidade relativa do ar

Comparando-se a estimativa da evapotranspiração de referência utilizando-se como padrão o cálculo da umidade relativa do ar, os valores registrados pela estação meteorológica automática, com as equações propostas pela INMET, FAO e SMESP, foram obtidos os seguintes resultados:

TABELA 07 - Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos da umidade relativa do ar. Paraipaba-CE, 2002.

Mês	ET _O (mm.dia ⁻¹)			
	ET _O PADRÃO	ET _O INMET	ET _O FAO	ET _O SMESP
Jan	2,65	2,66	2,74	2,34
Fev	3,80	3,78	3,91	3,20
Mar	3,07	3,06	3,17	2,62
Abr	2,57	2,58	2,65	2,22
Mai	2,90	2,89	2,99	2,56
Jun	2,71	2,71	2,84	2,41
Jul	3,19	3,18	3,33	2,83
Ago	4,02	4,02	4,20	3,51
Set	4,34	4,39	4,52	3,85
Out	4,77	4,71	4,91	4,09
Nov	4,16	4,14	4,28	3,71
Dez	4,13	4,12	4,26	3,58

O mês de maior demanda hídrica, no período estudado, foi o de outubro, quando foi obtido um valor de 4,77mm.dia⁻¹ para a ET_O com a metodologia de Penman-Monteith, empregando-se os valores das variáveis meteorológicas registradas na estação automática, considerada como padrão. Esse mês também apresentou como o de maior demanda hídrica, observando-se os resultados obtidos, com as outras três metodologias estudadas.

Os cálculos de ET_O empregando-se a umidade relativa média proposta pela FAO e pelo SMESP superestimaram e subestimaram, respectivamente, quando comparados com os valores obtidos com a metodologia padrão. A metodologia empregada pela FAO, por ter uma menor quantidade de leituras, e uma maior diferenças entre elas, proporcionou maiores valores durante todo o ano.

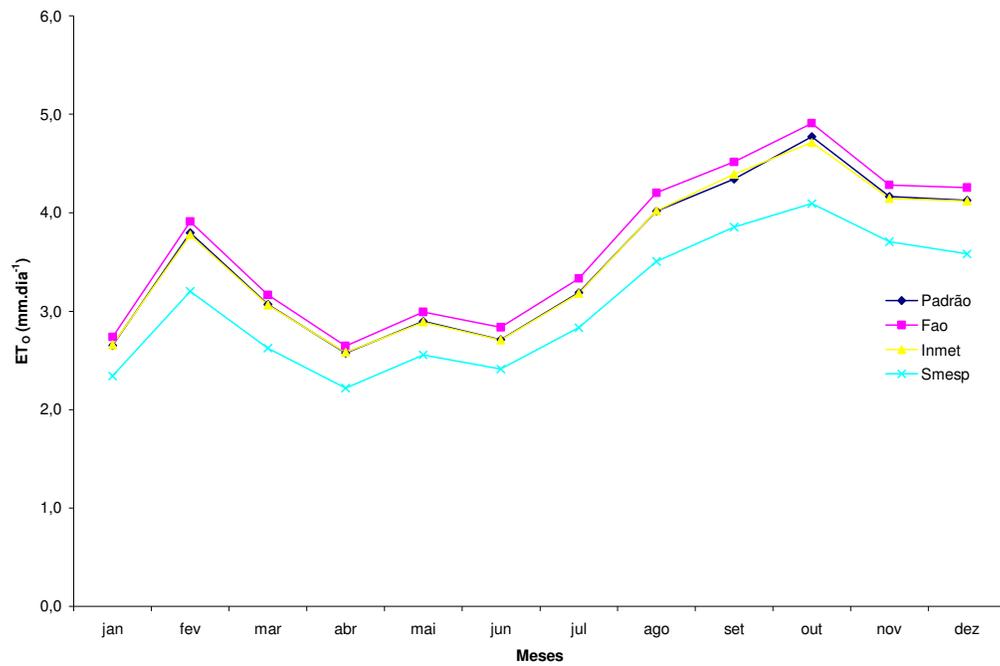


FIGURA 10 - Médias mensais dos valores de evapotranspiração de referência estimados com a equação de Penman-Monteith e umidade relativa média do ar obtida com a estação meteorológica automática e com as metodologias propostas pela INMET, FAO e SMESP, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

Observando-se os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, entre os valores de ET_o obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da umidade relativa do ar (média diária) com a metodologia padrão, verificou-se que os coeficientes de determinação (R^2) foram excelentes. Sendo 0,9882 para metodologia proposta pelo INMET, 0,9975 para metodologia proposta pela FAO e 0,9829 para metodologia proposta pelo SMESP (Figuras 11,12 e13).

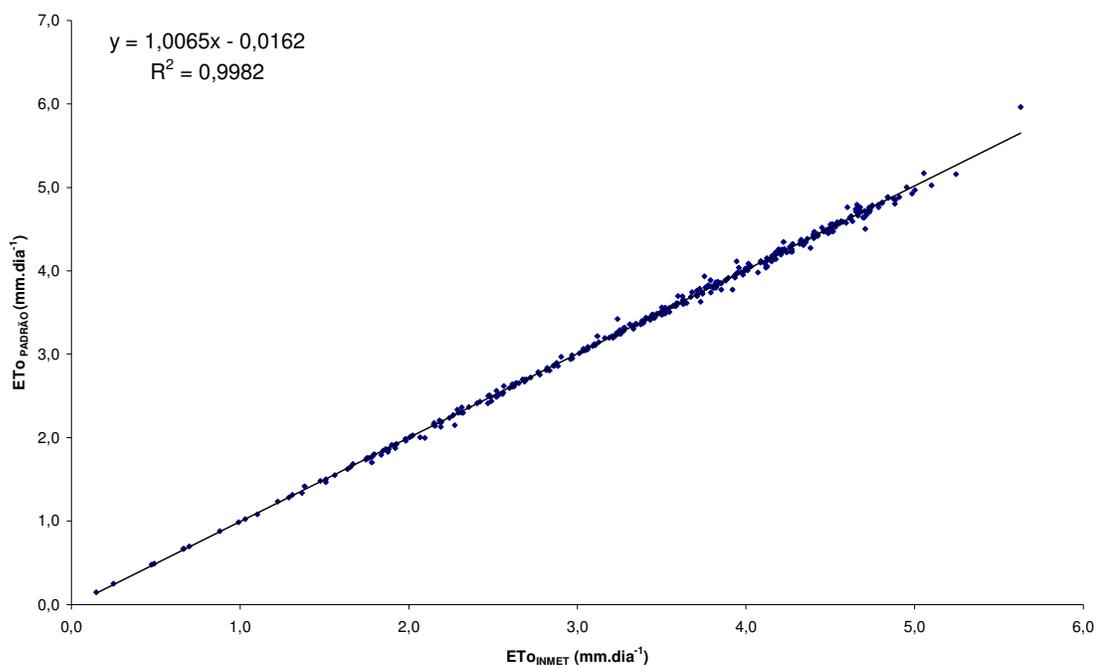


FIGURA 11 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa do ar obtida com a estação meteorológica automática (ET_o PADRÃO) e com umidade relativa do ar obtida com a metodologia proposta pelo INMET (ET_o INMET), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

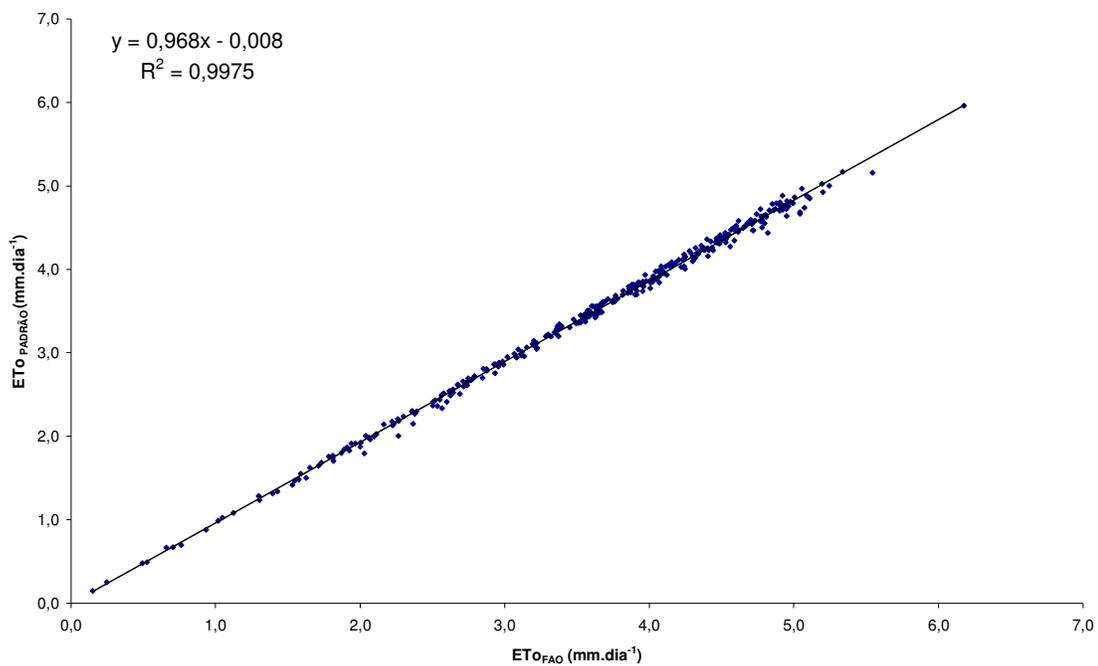


FIGURA 12 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com umidade relativa do ar obtida com a metodologia proposta pela FAO (ETo_{FAO}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

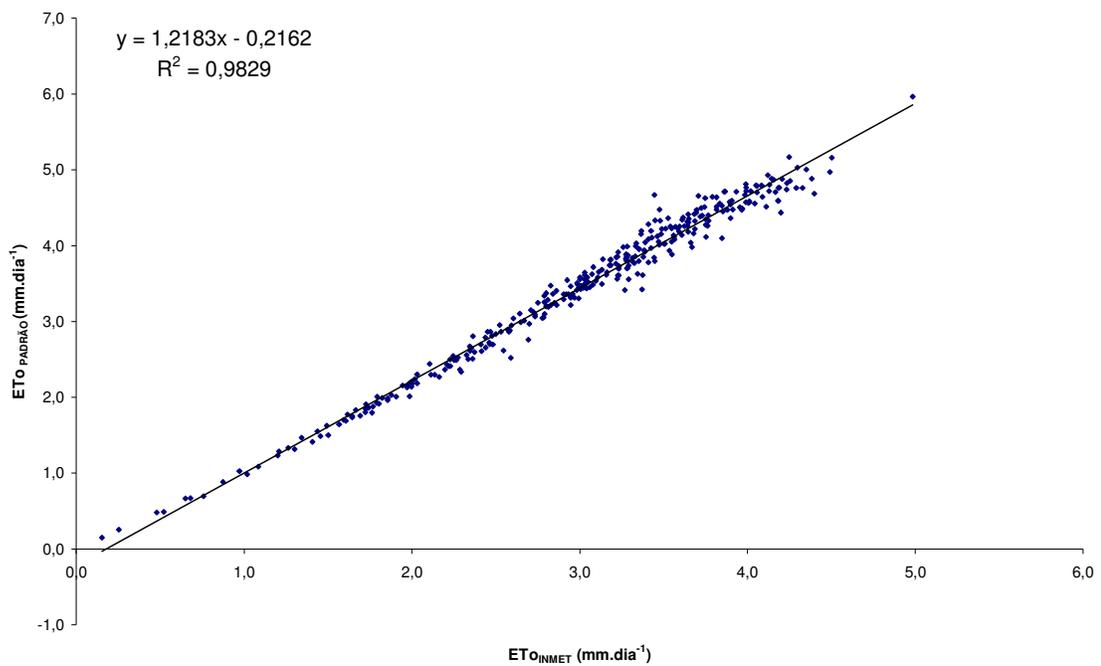


FIGURA 13 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e umidade relativa do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ETo_{PADRÃO}$) e com umidade relativa do ar obtida com a metodologia proposta pelo SMESP (ETo_{SMESP}), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

Quando consideradas apenas as médias mensais, os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, mostraram coeficientes de determinação (R^2) um pouco maiores, mostrando ainda uma maior correlação entre os dados. Sendo para metodologia proposta pelo INMET, 0,9989 para metodologia proposta pela FAO 0,9990 e 0,9922 para metodologia proposta pelo SMESP.

TABELA 08 - Coeficientes de determinação (R^2) para as comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ET_o obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da umidade relativa média do ar.

Variáveis	R^2	
	Diária	Mensal
$ET_{o\text{ PADRÃO}} \times ET_{o\text{ INMET}}$	0,9982	0,9990
$ET_{o\text{ PADRÃO}} \times ET_{o\text{ FAO}}$	0,9975	0,9989
$ET_{o\text{ PADRÃO}} \times ET_{o\text{ SMESP}}$	0,9829	0,9922

De acordo com a Tabela 09, encontram-se os valores de evapotranspiração de referência estimados através de diferentes maneiras para o cálculo da umidade relativa média do ar. Como pode ser observado não houve diferença estatística entre os valores médios anuais de ET_o . Sendo que de acordo com análise estatística todas as equações utilizadas para cálculo da umidade relativa média do ar, podem ser utilizadas para o cálculo da evapotranspiração de referência para a região de Paraipaba.

TABELA 09 – Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ET_o), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da umidade relativa média do ar.

Equações utilizando umidade relativa média do ar	Evapotranspiração (mm.dia^{-1})
$ET_{o\text{ Padrão}}$	3,53 a
$ET_{o\text{ INMET}}$	3,65 a
$ET_{o\text{ FAO}}$	3,52 a
$ET_{o\text{ SMESP}}$	3,08 a
D.M.S. (5%)	0,81

Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de tukey.

5. CONCLUSÕES

- 1) Na estimativa da evapotranspiração de referência (diária ou mensal), com a metodologia de Penman-Monteith/FAO, no município de Paraipaba-CE, pode-se empregar no cálculo da temperatura média do ar, qualquer uma das metodologias propostas.
- 2) No cálculo da temperatura média do ar para estimativa de ETo, deve-se utilizar a equação proposta pela FAO, devido maior disponibilidade dos dados de Tmax e Tmin, nos diversos municípios do Estado do Ceará.
- 3) Na estimativa da evapotranspiração de referência (diária ou mensal), com a metodologia de Penman-Monteith/FAO, no município de Paraipaba-CE, pode-se empregar, no cálculo da umidade relativa média do ar, qualquer uma das metodologias propostas.
- 4) No cálculo da umidade relativa média do ar, recomenda-se utilizar a equação proposta pela FAO, devido a maior disponibilidade dos dados de URmax e URmin, nos diversos municípios do Estado do Ceará.
- 5) A estimativa da evapotranspiração de referência, com a metodologia de Penman/Monteith/FAO, no município de Paraipaba-CE, utilizando diferentes métodos para calcular a radiação solar global, se adequada ao cálculo balanço hídrico climatológico na escala mensal, entretanto não é recomendado utilizá-la no manejo diário da irrigação.
- 6) A equação proposta por Allen et al. (1998) não pode ser utilizada como metodologia para calcular evapotranspiração de referência, para o município de Paraipaba.

6 RECOMENDAÇÕES

EVAPOTRANSPIRATION OF REFERENCE USING DIFFERENT METHODOLOGIES OF CALCULATION OF THE BALANCE OF SOLAR RADIATION, THE TEMPERATURE AND THE RELATIVE AIR HUMIDITY.

Author: Eng./Agr^o.Ronaldo Lima Moreira Borges.

Advisor: Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo.

ABSTRACT

This is a study about the estimate of the evapotranspiration of reference through the Penman-Monteith/FAO equation, making use of different methodologies in the daily average calculations of the air temperature, the relative air humidity and the balance of solar radiation. The data utilized comprehends the period from January to December 2002, obtained in an automated meteorological station, located in the city of Paraipaba, State of Ceará (latitude 3°26' S, longitude 39°08' W and altitude of 31 m). For the calculation of the daily averages of temperature and the relative air humidity, it was used the arithmetical average of 24 daily readings, the equations proposed by the National Institute of Meteorology - (INMET), by FAO and by the Service of Meteorology of the State of Sao Paulo – (SMESP). In the calculation to obtain the daily balance of solar radiation, the equations of global radiation proposed by FAO (method 1), by Aguiar et al. (method 2), by Glover & McCulloch (method 3) and by Black (method 4) were used. The results show that for the estimate of the evapotranspiration of reference with the Penman-Monteith/FAO methodology, all the equations of daily average air temperature presented can be used, for the coefficient determination (R^2) presented the following values when correlated with the calculation of the ETo using the average obtained by the automated meteorological station: INMET method (0,9886), FAO method (0,9892) and SMESP method (0,9888). The equations of calculation of the relative air humidity also presented the same behavior, being all viable ones, obtaining the following R^2 values: INMET method (0,9980), FAO method (0,9972) and SMESP method (0,9817). In the estimate of the balance of radiation, influenced by the equations of global solar radiation presented, the method of Aguiar et al. ($R^2=0,3704$) has presented itself as the best methodology when compared to the FAO method.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. V., ARAÚJO, E. C. B., CRISÓSTOMO, R. R., NOGUEIRA, S. M. Estimativa da radiação solar a partir da insolação, na região metropolitana de Fortaleza In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11.; REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1999, Florianópolis. **Anais ...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. v. 1. p. 294-294.

AGUIAR, M. J.; LIMA, G. B. de; BARRETO JÚNIOR, J. H. C.; BADU, F. O. **Dados climatológicos:** estação de Paraipaba, 2002. Fortaleza: EMBRAPA Agroindústria Tropical, 2003. 16p. (Embrapa Agroindústria Tropical Documentos, 73).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 290p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

AUBERTINI, G. N.; PETER, D. B. Net radiation determination in a cornfield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 53, p. 269-272, 1961.

AZEVEDO, B. M. de. **Evapotranspiração de referência obtida com a razão de Bowen, lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos.** 1999. 81p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** 4.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1989. 488p., il.

BRUTSAERT, W. H. **Evaporation into the atmosphere:** theory, history and applications. Dordrecht: Kluwer Academic, 1982. 316p.

CHANG, J. **Climate and agriculture:** an ecological survey. 2.ed. Chicago: Aldine Publishing Company, 1971. 269p.

COELHO, E. F.; SOUSA, V. F de; AGUIAR NETTO, A de. O.; OLIVEIRA, A. S. de . **Manejo de irrigação em fruteiras tropicais**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2000. 48p. (Circular Técnica nº 40).

COSTA E SÁ, N. G. da. **Evapotranspiração de referência medida e estimada na região litorânea do Estado do Ceará**. 2001. 57p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Necessidades hídricas das culturas**. Tradução H. R. Gheyi, J. E. C. Metri, F. A. Damasceno. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 204p., il. Título original: Crop water requirements. (Estudos FAO; Irrigação e Drenagem, 24).

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

LUCHIARI JÚNIOR, A. **Measurements and predictions of evapotranspiration rates from irrigated wheat in the Cerrado region of Central Brazil**. 1988, 171p. Tese (PhD), Cornell University, Ithaca, 1988.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2003. 120p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MOTA, F. S. da. **Meteorologia agrícola**. 7. ed. São Paulo: Nobel, 1986. 376p.

NASA/Jet Propulsion Laboratory. **Basic of space flight**: Glossary. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/basics/glossary.html>>. Acesso em: jul. 2002.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 440p.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimation of daily global solar radiation as a function of the solar energy potential at soil surface. **Revista Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 211-216, abr./jun., 2002.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1997. 183p.,

RANAHAN, F. S. Z. **Micro Irrigation**. México: ICFA International, 1992.

SAMPAIO, I. B. M. **Estatística aplicada à experimentação animal**. Belo Horizonte: Fundação de Ensino e Pesquisa em Medicina Veterinária e Zootecnia, 1998. 221p. il.

SEDIYAMA, G. C.; MELO, J. S. P.; ALVES, A. R.; COELHO, D. T. Determinação dos parâmetros da distribuição de grama, em função das alturas mensais de precipitação dos dias chuvosos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 43, n. 274, p. 254-266, 1996.

SILVA, F. A. M. da; ASSAD, E. D.; GOMES, A. C.; EVANGELISTA, B. A. Estudo da radiação solar na região do Distrito Federal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 425-427.

THOM, A. S.; OLIVER, H. R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. **Quarterly Journal of Royal Meteorology Society**, London, v. 103, p. 345-357, 1977.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. do. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 1.ed., 7.r. São Paulo: Nobel, 1992. 374p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: INMET, 2000. 532p.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. Tradução H. R. Gheyi et al. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 184p., il. Título original: Localized irrigation (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).

A N E X O S