

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FRANCISCO EDUARDO BARROS DE LIMA JUNIOR**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**  
**ESTIMADA POR DIFERENTES MÉTODOS NO MUNICÍPIO DE LIMOEIRO DO**  
**NORTE, CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2008**

FRANCISCO EDUARDO BARROS DE LIMA JUNIOR

ANÁLISE COMPARATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA  
ESTIMADA POR DIFERENTES MÉTODOS NO MUNICÍPIO DE LIMOEIRO DO  
NORTE, CEARÁ

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. João Hélio Torres D'Ávila.

FORTALEZA

2008

L698a Lima Junior, Francisco Eduardo Barros de  
Análise comparativa da evapotranspiração de referência estimada por diferentes métodos no município de Limoeiro do Norte, Ceará / Francisco Eduardo Barros de Lima Junior. -- Fortaleza, 2010.  
62 f.; il., color. enc.

Orientador: Prof. Dr. João Hélio Torres D'Ávila  
Área de Concentração: Irrigação e Drenagem  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2010.

1. Evapotranspiração. 2. Equação de Penman-Monteith. I. D'Ávila, João Hélio Torres (Orient.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 630

**FRANCISCO EDUARDO BARROS DE LIMA JUNIOR**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA  
ESTIMADA POR DIFERENTES MÉTODOS NO MUNICÍPIO DE LIMOEIRO DO  
NORTE, CEARÁ**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Agrícola, Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 02 de outubro de 2008.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. João Hélio Torres D'Ávila, (Orientador)

Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo

Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Raimundo Rodrigues Gomes Filho

Universidade Federal de Goiás - UFG

À minha mãe *Neuza Silva Ferreira Lima*,  
educadora responsável e incansável e,  
às minhas irmãs *Samya e Ticiane*,  
que consolidam o alicerce de minha vida.

## **OFEREÇO**

Aos meus familiares e amigos,  
que sem sombra de dúvidas são os que  
alimentam meu ego para superar  
os desafios da vida.

## **DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Ao professor Dr. João Hélio Torres D'Ávila pela orientação, apoio e a fiel amizade indispensável à realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Raimundo Rodrigues Gomes Filho e ao Professor Dr. Benito Moreira de Azevedo pela participação na banca examinadora e pelos comentários, críticas e sugestões para o engrandecimento deste trabalho. Este último em especial, que sempre contribuiu em nossa vida acadêmica com suas valorosas orientações.

À Universidade Federal do Ceará, através do Departamento de Engenharia Agrícola pela estrutura disponibilizada e pelo acolhimento.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará: Claudivan Lacerda, Eunice Andrade, Adunias Teixeira, Marcus Bezerra, Nonato Costa, Renato Ribeiro, Titico, Thales Viana, pelos cordiais ensinamentos transmitidos e pela amizade.

Aos parceiros e amigos Diêgo Nathã, Adalberto Girão e Nilson Lima que disponibilizaram idéias para a realização deste trabalho.

Aos eternos amigos do mestrado: Carlos Alexandre, Clemilda, Fabilla, Levi, Regina, Edivam, Carmem Cristina, Olienaide, Andréia, Eveline, Felipe, Bruna, Fabrício, Crisóstomo, Daniele, Carlos Henrique, Dimas, Jefferson, Abelardo, Otacílio, Karine, Marcos Mesquita, Leila, Beatriz, Simão Pedro, Luiz Carlos Guerreiro, Marcos Meireles, Cley Anderson, Deodato, Fernando, Mauro Régis, Tony e Sildemberny pelo companheirismo e a amizade solidária.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará.

À Faculdade de Tecnologia Centec de Limoeiro do Norte pelas contribuições para a realização desta pesquisa.

Aos amigos Adler Girão e Hilmar Sérgio pela colaboração e presteza concedida para a concretização deste sonho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro concedido para a realização da pesquisa.

A vida é um grande espetáculo.  
Só não consegue homenageá-la  
quem nunca penetrou dentro  
de seu próprio ser e perceber como  
é fantástica a construção da sua inteligência.

Augusto Cury

## RESUMO

LIMA JUNIOR, Francisco Eduardo Barros de, Universidade Federal do Ceará. Outubro de 2008. Análise comparativa da evapotranspiração de referência estimada por diferentes métodos no município de Limoeiro do Norte, Ceará. Orientador: João Hélio Torres D'Ávila. Conselheiros: Benito Moreira de Azevedo, Raimundo Rodrigues Gomes Filho.

Neste trabalho objetivou-se avaliar os métodos que melhor se ajustassem à estimativa da evapotranspiração de referência em comparação com a equação de Penman-Monteith-FAO. Os métodos de estimativa de ETo empregados foram: Jensen-Haise, Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani e Makkink. Os dados analisados foram provenientes da estação meteorológica automática pertencente à Unidade de Ensino e Pesquisa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Limoeiro do Norte, Ceará, compreendendo o período de 1º de janeiro a dezembro de 2007. A análise foi baseada em dados diários, decendiais e mensais, utilizando-se a análise de regressão e avaliando o coeficiente de correlação por Hoppinks (2002), os índices de concordância de Willmott et al. (1985) e índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997). Os resultados encontrados expuseram que o método de Ivanov obteve o melhor desempenho na escala diária. Na escala decendial os métodos de Ivanov e Hargreaves-Samani apresentaram o melhor desempenho. Na escala mensal os métodos de Linacre, Hargreaves-Samani e Ivanov apresentaram o melhor desempenho. Apesar do método de Ivanov ter se destacado nas três escalas temporais, propõem-se a utilização do método de Hargreaves-Samani nas escalas decendial e mensal devido a sua maior facilidade de obtenção dos dados e sua praticidade no cálculo da evapotranspiração de referência.

**Palavras-chave:** Penman-Monteith, Jensen-Haise, Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani, Makkink.



## ABSTRACT

LIMA JUNIOR, Francisco Eduardo Barros de, Universidade Federal do Ceará. October (2008). Comparative analysis of different methods of reference evapotranspiration evaluation in the municipality of Limoeiro do Norte (Ceará state). Advisor: João Hélio Torres D'Ávila. Committee members: Benito Moreira de Azevedo, Raimundo Rodrigues Gomes Filho.

This work was aimed at selecting the best methods to estimate the reference evapotranspiration in comparison with the equation of Penman-Monteith-FAO. The methods of evapotranspiration estimation compared were: Jensen-Haise, Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani and Makkink. The analyzed data came from the automatic weather station belonging to the Unidade de Ensino e Pesquisa (Teaching and Research Unit) of the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Limoeiro do Norte, Ceará, comprising the period (in 2007) from January 1st to December. The analysis was based on daily data, monthly data and by ten-day interval data using regression analysis and evaluating the Hoppinks (2002) correlation coefficient, the Willmott (et al., 1985) indexes and the Sentelhas and Campbell (1997) performance index. The results demonstrated that the method of Ivanov gave the best performance in the daily schedule, that in the ten-day schedule the methods of Ivanov and Hargreaves-Samani showed the best performance, and that in the monthly schedule, the methods of Linacre, Hargreaves-Samani and Ivanov showed the best performance. Despite the good performance of the Ivanov method with all three time schedules, we would advise the use of the Hargreaves-Samani method, in ten-day and monthly schedules, due to its greater ease of data collection and practicality in the calculation of reference evapotranspiration.

Keywords: Penman-Monteith, Jensen-Haise, Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani, Makkink.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Valores dos coeficientes de correlação ou índice de precisão conforme Hoppkins (2002).....	42
TABELA 2	Valores dos coeficientes de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997) .....	42
TABELA 3	Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação ou precisão (r), índice de Willmott ou concordância (d), índice de desempenho (c), entre a ETo estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO com os demais métodos na escala diária, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007.....	47
TABELA 4	Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação ou precisão (r), índice de Willmott ou concordância (d), índice de desempenho (c), entre a ETo estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO com os demais métodos na escala decendial, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007 .....	50
TABELA 5	Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação ou precisão (r), índice de Willmott ou concordância (d), índice de desempenho (c), entre a ETo estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO com os demais métodos na escala mensal, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007 .....	53

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Esquema representativo do processo de evapotranspiração, adaptado de Allen et al. (1998).....	16
FIGURA 2 Características da cultura hipotética de referência, adaptado de Allen et al.(1998).....	39
FIGURA 3 Relação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO (EToPM) e a evapotranspiração de referência estimada por Jensen-Haise (A), Ivanov (B), Linacre (C), Hargreaves-Samani (D) e Makkink (E) na escala diária, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007 .....	46
FIGURA 4 Relação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO (EToPM) e a evapotranspiração de referência estimada por Jensen-Haise (A), Ivanov (B), Linacre (C), Hargreaves-Samani (D) e Makkink (E) na escala decenal, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007 .....	49
FIGURA 5 Relação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO (EToPM) e a evapotranspiração de referência estimada por Jensen-Haise (A), Ivanov (B), Linacre (C), Hargreaves-Samani (D) e Makkink (E) na escala mensal, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007 .....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Evapotranspiração</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Estimativa da evapotranspiração de referência</b> .....	18
2.2.1	Método de Jensen-Haise (ET <sub>o</sub> JH).....	19
2.2.2	Método de Ivanov (ET <sub>o</sub> IV).....	19
2.2.3	Método de Linacre (ET <sub>o</sub> L).....	20
2.2.4	Método de Hargreaves-Samani (ET <sub>o</sub> HS).....	20
2.2.5	Método de Makkink (ET <sub>o</sub> M).....	22
2.2.6	Método de Penman-Monteith-FAO (ET <sub>o</sub> PM).....	22
<b>2.3</b>	<b>Fatores que afetam a evapotranspiração de referência</b> .....	24
2.3.1	Radiação Solar.....	24
2.3.2	Temperatura do Ar.....	26
2.3.3	Umidade Relativa do Ar.....	27
2.3.4	Velocidade do Vento.....	28
<b>2.4</b>	<b>Estimativa e medida da evapotranspiração de referência</b> .....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	32
<b>3.1</b>	<b>Caracterização do Local do Experimento</b> .....	32
<b>3.2</b>	<b>Análise dos dados</b> .....	32
3.2.1	Estação Meteorológica Automática.....	33
3.2.2	Equação de Jensen-Haise.....	34
3.2.3	Equação de Ivanov.....	35
3.2.4	Equação de Linacre.....	35
3.2.5	Equação de Hargreaves-Samani.....	36
3.2.6	Equação do Makkink.....	38
3.2.7	Equação de Penman-Monteith-FAO.....	38
<b>3.3</b>	<b>Análise dos resultados da estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)</b> .....	42
3.3.1	Coefficiente de correlação ou índice de precisão.....	43
3.3.2	Índice de concordância, exatidão ou Willmott.....	43
3.3.3	Índice de Desempenho.....	44

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Evapotranspiração de referência na escala diária</b> .....	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Evapotranspiração de referência na escala decenal</b> .....	<b>48</b>
<b>4.3</b>	<b>Evapotranspiração de referência na escala mensal</b> .....	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As estimativas da evapotranspiração de referência, utilizando dados meteorológicos, apresentam-se como alternativas simples na determinação dos parâmetros utilizados no manejo da irrigação, principalmente no Estado do Ceará, o qual está se projetando no cenário nacional como um dos grandes pólos da fruticultura irrigada. Entretanto, fazer o manejo da irrigação eficientemente reduz as perdas de água, aumentando assim a produtividade deste insumo, fato este de grande importância para o Nordeste brasileiro, pois é uma região carente deste recurso natural.

Ter conhecimento na área de agrometeorologia é de fundamental importância, quando se trata de manejo da irrigação utilizando dados provenientes de estações agrometeorológicas automáticas ou convencionais. As equações empíricas apresentam-se como uma maneira simples de se estimar a evapotranspiração de referência e quando combinadas com outras equações podem proporcionar boas correlações com métodos padronizados.

Nos últimos anos, muitos trabalhos têm sido direcionados para o estudo da estimativa da evapotranspiração por meio de modelos. Entretanto, numa avaliação das equações mais comuns para a estimativa da evapotranspiração, feita pela American Society of Civil Engineers - ASCE, na qual se utilizou dados climáticos de 11 diferentes localidades do mundo, concluiu-se que não existe um método, que utilize dados climáticos, que possam ser globalmente adequados, sem que exista algum tipo de calibração local ou regional, principalmente em regiões tropicais e regiões altas (JENSEN et al., 1989 apud ROCHA et al., 2003).

A escolha de um método de estimativa da ETo depende de fatores, tais como a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo desejada. Métodos como o de Penman-Monteith, adotado pela FAO como o método padrão de estimativa da ETo, exige um grande número de variáveis meteorológicas, somente sendo utilizado quando há disponibilidade de todos os dados necessários, o que, na prática, só é possível em situações especiais, como em campos experimentais (ANDRADE JÚNIOR et al., 2003) e em agricultura com elevado padrão tecnológico.

Estimar a evapotranspiração de referência, utilizando apenas dados de temperatura média do ar e umidade relativa média do ar é uma alternativa que pode ser considerada satisfatória, na indisponibilidade de instrumentos que apresentem resultados em tempo real,

desde que apresente uma boa correlação com métodos tradicionais como o padrão de Penman-Monteith-FAO, Jensen-Haise, Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani, e Makkink.

Com essa perspectiva, objetivou-se fazer neste trabalho uma análise da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), com o propósito de se avaliar os dados obtidos com a Equação de Penman-Monteith padronizado pela FAO em relação aos valores obtidos com as equações de Jensen-Haise, Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani e Makkink. Além desse aspecto, procurou-se identificar uma Equação que melhor se ajustasse ao modelo de Penman-Monteith-FAO e que fosse de utilização mais simples, como é o caso das equações que dependem somente de dados de temperatura do ar e de umidade relativa do ar para as condições climáticas de Limoeiro do Norte, Ceará, nas escalas diária, decendial e mensal.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Evapotranspiração

Os conceitos de evapotranspiração potencial e de evapotranspiração real foram introduzidos por Thornthwaite e Wilm (1944 apud CAMARGO; CAMARGO, 2000). Alguns anos mais tarde, Thornthwaite (1946 e 1948) definiu como potencial (ETP) a evapotranspiração que ocorre considerando as seguintes condições de contorno: extensa superfície vegetada, crescimento ativo; cobertura total do solo; sem restrição hídrica, de modo que somente o balanço vertical de energia interfira no processo. Quase que simultaneamente, Penman (1948 e 1956), na Inglaterra, também definiu a ETP, ressaltando que a vegetação deveria ser baixa e com altura uniforme. De um modo geral, a grama foi tomada como padrão, em razão da sua utilização nos postos meteorológicos (PEREIRA et al., 1997).

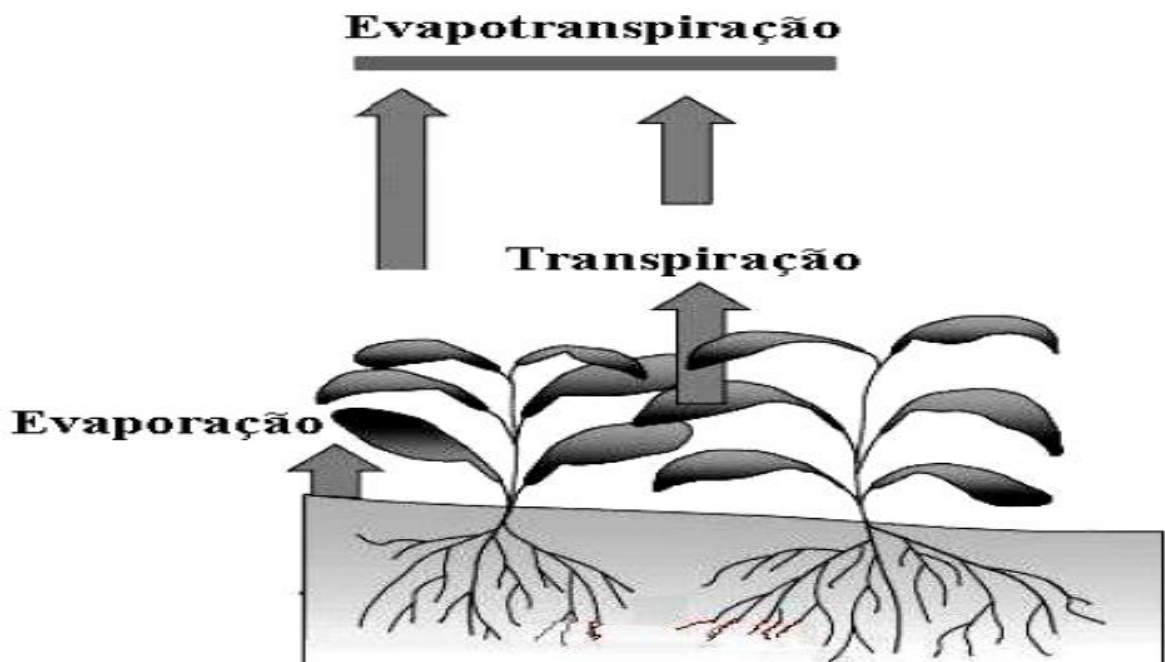


Figura 1 - Esquema representativo do processo de evapotranspiração, adaptado de Allen et al. (1998).

Thornthwaite (1948) definiu evapotranspiração potencial como o processo de transferência d'água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo.



O mesmo autor ainda comenta que essa definição foi muito utilizada até que surgiu a necessidade de um conceito mais geral para o termo evapotranspiração, dada às diferenças entre as culturas utilizadas, mesmo se tratando de variedades de grama.

No início dos anos 70 do século passado, o termo evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), foi definido por Jensen (1973) como limite superior que ocorre numa cultura de alfafa (*Medicago sativa*, L.), com altura de 0,3 a 0,5 m, numa dada condição climática, e com aproximadamente 100 m de área tampão. Na mesma década, Doorenbos e Pruitt (1977), definiram evapotranspiração de referência como sendo aquela que ocorre em uma extensa superfície de grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. A evapotranspiração de referência assim definida coincide com a potencial. Smith (1991) definiu a ET<sub>o</sub> como sendo aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência do dossel ao transporte de vapor d'água igual a  $69 \text{ s m}^{-1}$ , que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem falta de água.

Em maio de 1990, a FAO (Food and Agriculture Organization) da Organização das Nações Unidas, promoveu um encontro, em Roma, Itália, com pesquisadores da área de evapotranspiração, composto de 14 especialistas de sete países, para atender a vários objetivos, dentre eles o de analisar os conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET<sub>o</sub>, visando estabelecer um critério que pudesse atender a nova definição para cultura de referência e o método para que pudesse estimá-la (SEDIYAMA, 1996).

Este mesmo autor ressalva que, após as recomendações definidas neste encontro de especialistas em evapotranspiração, os pesquisadores têm procurado desenvolver trabalhos no sentido de se avaliar a Equação de Penman-Monteith para estimativa da ET<sub>o</sub>, uma vez que tem sido observado que ela tem dado melhores resultados para estimativa da ET<sub>o</sub> de uma cultura hipotética de referência e atende, mais de perto, a definição original de ETP de Penman e o conceito adotado para ET<sub>o</sub> pelo manual FAO-24.

Allen et al. (1998) propuseram a atualização do conceito de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), como sendo a superfície de referência de uma cultura hipotética utilizando a grama como cultura de referência com altura de 0,12 m, resistência de superfície fixa de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23. A superfície de referência se assemelha a uma superfície extensa de grama verde, sem restrições de água e altura uniforme, crescendo ativamente e cobrindo completamente o solo.

## 2.2 Estimativa da evapotranspiração de referência

Os métodos de estimativa da evapotranspiração, de acordo com os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, podem ser agrupados em cinco categorias: (i) empírico; (ii) aerodinâmico; (iii) balanço de energia; (iv) combinados; (v) correlação dos turbilhões (PEREIRA et al., 1997).

Existe um significativo acervo de trabalhos de pesquisas e literatura sobre estimativa da evapotranspiração de referência. Pesquisadores em todo o mundo executam trabalhos buscando selecionar quais métodos se ajustam melhor as condições locais, pois nenhum método empírico pode ser desprezado.

A decisão pelo método de estimativa da evapotranspiração varia, conforme sua aplicação, atendendo às necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo. Uma pesquisa em recursos hídricos exige estimativas anuais ou, no máximo, mensais. Mas, em projetos de irrigação são requeridos períodos mais curtos, diários a decendiais, sendo necessária a adoção de um método preciso para aquela condição (TANNER, 1967 apud OLIVEIRA; VOLPE, 2003).

Burman et al. (1983 apud Oliveira e Volpe, 2003), revisaram vários métodos de estimativa da evapotranspiração, adotados em diversas partes do mundo. Estes autores classificaram os métodos em dois grandes grupos: os métodos em que a evapotranspiração potencial pode ser estimada a partir de medidas diretas, como os lisímetros, balanço hídrico e controle de umidade do solo, e os métodos que utilizam dados meteorológicos, também chamados de métodos indiretos, nos quais a evaporação ou a evapotranspiração de referência são avaliadas por fórmulas empíricas e racionais.

Segundo Araújo et al. (2007), diversos pesquisadores em todo o mundo propuseram modelos indiretos para a estimativa da ETo, com as mais diferentes concepções e número de variáveis envolvidas. Antes de se eleger o modelo a ser utilizado para a estimativa da ETo, é necessário o conhecimento dos elementos climáticos disponíveis; a partir daí, verifica-se quais deles podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para determinado local de interesse fica na dependência dessas variáveis.

### 2.2.1 Método de Jensen - Haise (ET<sub>o</sub>JH)

Jensen e Haise (1963) definiram evapotranspiração potencial como sendo aquela que ocorre em campos irrigados em áreas áridas e semi-áridas. Nesse caso, é preferível chamá-la de ET<sub>c</sub>, pois na definição apresentada não há necessidade de área de bordadura homogênea, ilimitada e bem suprida de água conforme requer a definição de ET (PEREIRA et al., 1997).

Mendonça et al. (2003) realizando trabalho de comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência com lisímetro de pesagem na região Norte fluminense, Rio de Janeiro, concluíram que o método de Jensen-Haise atendeu satisfatoriamente à estimativa da ET<sub>o</sub>, principalmente em períodos de 7 e 10 dias.

Fernandes (2006) avaliando diversas equações empíricas de estimativa da evapotranspiração de referência na escala diária para Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, encontrou resultados em que a Equação de Jensen-Haise (1963), quando calibrada, superestimou a ET<sub>o</sub> nos meses de março a julho. Por outro lado, essa Equação subestimou a ET<sub>o</sub> de agosto a dezembro. Já nos meses de janeiro e fevereiro, não houve diferença entre as estimativas da Equação calibrada e a Equação Penman-Monteith-FAO.

### 2.2.2 Método de Ivanov (ET<sub>o</sub>IV)

O método de Ivanov, mesmo sendo pouco trabalhado quando comparado aos demais métodos utilizados neste trabalho, pode surpreender com resultados mais significativos do que os métodos que trabalham somente com temperatura, dependendo somente da qualidade dos dados ajustados localmente. O que diferencia esse método dos outros é simplesmente o fato de ele usar além de dados de temperatura, os de umidade relativa do ar e, segundo Conceição (2003), os métodos que empregam somente a temperatura do ar limitam a representatividade das condições climáticas para efeito de estimativa da evapotranspiração de referência. Isso porque, conforme as condições de umidade relativa do ar e vento, a demanda hídrica da atmosfera será diferente para os mesmos valores da temperatura do ar.

A metodologia proposta por Ivanov, explicitada por Jensen (1973), pode assumir destaque no manejo da irrigação em cultivos na região estudada, haja vista, os resultados recentes de estudos realizados no Distrito de Irrigação Jaguaribe - Apodi, em Limoeiro do Norte, Ceará, aliada à pequena necessidade de dados meteorológicos (SANTOS et al., 2008).

### 2.2.3 Método de Linacre (EToL)

Este método considera a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho como variáveis para determinação da ETo de um local. Na realidade, trata-se de uma simplificação do método de Penman (PEREIRA et al., 1997).

O modelo de Linacre é outro que foi idealizado para simular a ETo utilizando os conceitos básicos de Penman (1948) e utilizar o mínimo de dados climáticos como: temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho. Dois importantes estudos apresentados por Fontenot (2004) avaliaram o desempenho deste modelo com respeito a duas padronizações. Em um deles, apresentado em seu primeiro documento, foi mostrado que introduzir o modelo fornece resultados precisos quando comparados com os dados lisimétricos em Idaho - USA, na África, e na Dinamarca, mostrando diferenças de menos de  $1,0\text{mm dia}^{-1}$ , quando comparado à Penman (1948) no mesmo local. No outro, houve uma constatação que a precisão do seu modelo teve um aumento na escala temporal analisada.

### 2.2.4 Método de Hargreaves-Samani (EToHS)

Quando comparado a outros métodos, o método de Hargreaves-Samani possui uma vantagem na estimativa da evapotranspiração de referência, pois utiliza apenas dados de temperatura máxima, mínima e média e a radiação solar. Quando faltam dados para estimar a evapotranspiração de referência pela Equação padronizada pela FAO, a Equação de Hargreaves-Samani pode ser usada, desde que calibrada (TAGLIAFERRE, 2006).

Hargreaves e Allen (2003) afirmam que o método de Hargreaves (1985) é muitas vezes utilizado para fornecer previsões de ETo semanal ou para períodos mais longos. É também usado no planejamento regional, em estudos de operação de reservatórios, em

projetos de canais, no cálculo das necessidades regionais de irrigação e/ou drenagem, na determinação dos potenciais de chuva para a produção agrícola e, no âmbito de algumas situações, para calendários de irrigação. As atratividades do método são: confiabilidade, pouco requerimento de dados e a simplicidade dos cálculos.

Segundo Allen et al. (1998), a Equação de Hargreaves-Samani deveria ser verificada em cada nova região, comparando com as estimativas da Equação de Penman-Monteith FAO, em estações meteorológicas onde a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade relativa e a velocidade do vento são medidas.

A Equação de Hargreaves (1985) tem uma baixa exigência de dados meteorológicos, utilizando apenas temperatura máxima e mínima do ar. A Equação auto compensa a falta de dados de radiação solar e umidade relativa do ar, os quais são exigidos pelos métodos de Penman e Penman-Monteith. O parâmetro amplitude térmica da Equação implicitamente, descreve os efeitos da nebulosidade. Além disso, a amplitude térmica geralmente diminui com o aumento da nebulosidade, sendo que ela está correlacionada com umidade relativa e déficit de pressão de vapor que é inversamente influenciada pela velocidade do vento (HARGREAVES; ALLEN, 2003).

A seleção do método de estimativa da ETo deve basear-se na escala temporal de utilização dos dados, local de aridez, custos dos equipamentos, operação e manutenção e de requisitos de qualidade dos dados meteorológicos disponíveis, bem como a necessária simplicidade dos cálculos. O custo dos equipamentos é uma consideração, e quando a qualidade dos dados é questionável, ou sempre que os dados históricos são inexistentes ou reduzidos ambos os métodos de Penman-Monteith-FAO e Hargreaves (1985) são recomendados, uma vez que os dois métodos são surpreendentemente equivalentes ao longo de um vasto leque de climas (HARGREAVES; ALLEN, 2003).

Medeiros (2002) realizando trabalho em Paraipaba, Ceará, encontrou uma diferença média entre a evapotranspiração de referência estimada, na escala diária, pelo método de Hargreaves & Samani e Penman-Monteith-FAO. Na escala decenal a diferença média entre as estimativas de ETo pelo método de Hargreaves e Samani e o método padrão foi da ordem de  $0,40\text{mm dia}^{-1}$ . O autor concluiu que os resultados obtidos pelo método de Hargreaves-Samani para a estimativa de ETo, mostraram que ele não se adapta às condições de estudo, certamente em decorrência do fato de ser baseado somente na temperatura do ar.

### 2.2.5 Método de Makkink (EToM)

O método de Makkink utiliza dados de radiação solar e temperatura do bulbo molhado, no entanto, quando este último dado não está disponível pode-se utilizar a temperatura média do ar para calcular seu fator de ponderação (PEREIRA et al., 1997).

Vescove e Turco (2005) encontraram para a região de Araraquara, São Paulo, que o método de Makkink subestimou a evapotranspiração no período inverno-primavera, mais do que no período verão-outono quando comparado com a ETo do tanque classe “A”.

Fernandes (2006), trabalhando na escala diária, com a EToM encontrou valores subestimados em todos os meses do ano, com variações de 0,20mm em junho e de 1,04mm em fevereiro para Campo dos Goytacazes, no estado do Rio de Janeiro. Também apresentou erros de estimativa entre 14,8% (junho) e 23,4% (outubro), com valores inferiores a 20% no mês de janeiro e de março a julho. Nos demais meses analisados o erro foi superior a 20%.

### 2.2.6 Método de Penman-Monteith-FAO (EToPM)

Segundo Allen et al. (1998), em maio de 1990 foi realizada uma consulta a peritos e pesquisadores, organizada pela FAO, em colaboração com a Comissão Internacional para Irrigação e Drenagem - ICID e a Organização Meteorológica Mundial - OMM, para revisar e atualizar as metodologias e procedimentos propostos por Doorenbos e Pruitt (1977) nas exigências de água da cultura. Em uma primeira etapa a nova proposta da FAO é a adoção do método combinado de Penman-Monteith-FAO como novo padrão para estimar a evapotranspiração de referência e aconselhou os procedimentos para cálculo dos vários parâmetros. Aquele comitê solicitou que se fizessem testes em outras regiões para verificar a adequação de sua proposta (SANTIAGO, 2001).

Penman (1948) não incluiu a função de resistência do dossel à difusão do vapor d'água na sua Equação original. Para aplicações práticas, ele propôs uma Equação empírica em função do vento. Posteriormente, Monteith desenvolveu, com base na Equação de Penman, uma Equação que incluía a resistência aerodinâmica e a resistência ao fluxo de vapor d'água pela folha. A Equação combinada com os termos de resistência aerodinâmica e da superfície da planta passou a ser chamada de Equação de Penman-Monteith. Esta Equação,

não somente concilia os aspectos aerodinâmico e termodinâmico, como também inclui a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água no ar ( $r_a$ ), e a resistência da superfície (planta) à transferência de vapor d'água ( $r_c$ ) (SEDIYAMA, 1996). O método de Penman-Monteith é estruturado em conceitos físicos e utiliza informações meteorológicas padronizadas (LIMA, 2005).

A Equação de Penman-Monteith-FAO é uma representação simples dos fatores físicos e fisiológicos que governam o processo de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

Jensen et al. (1990 apud MEDEIROS, 2002) relatam que a Equação de Penman-Monteith é mais precisa, quando usada na base horária e somando os valores para obter estimativa diária de ETo. Segundo os autores, exemplos de cálculos mostram claramente que, quando usados elementos climáticos diários, a Equação de Penman-Monteith proporciona estimativas precisas da evapotranspiração de referência.

Num estudo realizado pela American Society of Civil Engineers - ASCE, relatado por Jensen et al. (1990) e por Smith et al., (1996), foi analisado o desempenho de 20 métodos para estimar a ETo em condições padronizadas, que comparados com dados de 11 lisímetros em locais com condições climáticas diversas, mostrou a superioridade do modelo de Penman-Monteith tanto para regiões áridas como para regiões úmidas. No entanto, nenhum resultado de experimento brasileiro foi considerado nesse estudo norte-americano, embora seja significativa nossa contribuição nessa área de pesquisa (SANTIAGO, 2001).

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos com o intuito de avaliar os métodos de estimativa da ETo com lisímetros de pesagem ou até mesmo com a própria Equação padronizada pela FAO. Como referências citam-se: Sentelhas (1998), Machado e Mattos (2000), Santiago (2001), Medeiros (2002), Conceição (2003), Andrade Júnior et al. (2003) e Lima (2005).

Sentelhas (1998) trabalhando com estimativa da ETo diária com dados de estação meteorológica convencional e automática encontrou uma resposta ao método de Penman-Monteith-FAO a qual mostrou tendência de melhores estimativas da ETo, considerando-se o período integral das análises. Porém, analisando-se distintamente os períodos seco e úmido, foram observados resultados diferentes dos demais métodos, ou seja, superestimativa no período úmido e subestimativas no período seco, da ordem de 14 e 10% respectivamente.

Santiago et al. (2002) realizaram trabalho que teve por objetivo estudar o desempenho do modelo de Penman-Monteith-FAO, seguindo as parametrizações propostas pela FAO para estimativa da ETo nas escalas decenal e mensal, comparando-as com medidas em lisímetro de pesagem automática chegaram na conclusão que, face às

dificuldades de mensuração lisimétrica de ETo, a performance da parametrização proposta pela FAO para a Equação de Penman-Monteith pode ser considerada como adequada tanto para estimativas mensais como decendiais.

Medeiros (2002) realizando pesquisa em Paraipaba, Ceará, encontrou resultados que revelaram, por um lado, que o problema relacionado à representatividade dos dados medidos em lisímetro, pode estar ligado a uma série de variáveis, porém, há a necessidade de verificação da validade dos procedimentos de cálculo de ETo, de acordo com o método de Penman-Monteith-FAO. Entretanto, considerando que o método de Penman-Monteith-FAO é uma referência internacional e que o mesmo usa uma cultura hipotética a qual permite se obter resultados confiáveis do potencial de evapotranspiração de um local, como vem sendo observado por vários autores, conclui-se que a sua utilização é a mais aceita como parâmetro de comparação envolvendo dispositivos lisimétricos.

## **2.3 Fatores que afetam a evapotranspiração de referência**

Os fatores meteorológicos que afetam a evapotranspiração são elementos climáticos que fornecem energia para vaporização e removem vapor d'água da superfície evaporante (ALLEN et al., 1998).

### **2.3.1 Radiação Solar**

A radiação solar é a fonte primária de todos os fenômenos atmosféricos e de processos físicos, químicos e biológicos observados em ecossistemas agrícolas, podendo ser aproveitada sob várias formas, tais como a captura pela biomassa, o aquecimento do ar e da água para fins domésticos e industriais, fotoeletricidade para pequenos potenciais e fontes para ciclos termodinâmicos variados (PEREIRA et al., 2002). Conceição e Mandelli (2006) complementam que informações sobre a radiação solar incidente ( $R_s$ ) são importantes em diversos estudos meteorológicos como, por exemplo, na utilização de modelos de produção vegetal e em estimativas da evapotranspiração.



Segundo Pereira et al. (1997), a evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas. A disponibilidade de energia depende do local e da época do ano. O local é caracterizado pelas coordenadas geográficas (Latitude e Longitude) e pela topografia da região. A Latitude determina o total diário de radiação solar potencialmente possível de ser utilizado no processo evaporativo. Num terreno plano, o total diário de radiação solar é modulado pela época do ano, que determina o ângulo de incidência dos raios solares. Numa topografia acidentada, dependendo da estação do ano, terrenos com faces distintas terão disponibilidades diferentes de energia.

O processo de evapotranspiração é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água. Radiação solar é a maior fonte de energia e pode transformar grandes quantidades de água líquida em vapor. A quantidade potencial de radiação que pode chegar à superfície evaporante é determinada por sua localização e época do ano. Devido às diferenças na posição do sol, a radiação potencial é diferente nas várias latitudes e nas diferentes estações. A quantidade de radiação solar que chega à superfície evaporante depende do estado da atmosfera e da presença de nuvens que refletem e absorvem parte desta radiação. Quando se avalia o efeito de radiação solar na evapotranspiração, deve-se também ter em mente que não é usada toda a energia disponível para vaporizar a água. Parte da energia solar é usada para aquecer a atmosfera e o perfil do solo (ALLEN et al., 1998).

Meza e Varas (2000) afirmam que os modelos empíricos para estimar a radiação solar global são uma ferramenta conveniente, se os parâmetros forem calibrados para os diferentes locais. Esses modelos têm a vantagem de utilizar dados meteorológicos que são comumente disponíveis.

Borges (2004) trabalhando com estimativa da evapotranspiração de referência para Paraipaba, Ceará utilizando a Equação de Penman-Monteith-FAO e diferentes metodologias de cálculo da radiação solar global, encontrou resultados nos quais as equações se adequaram ao cálculo do balanço hídrico climatológico na escala mensal, entretanto não são recomendados utilizá-los no manejo diário da irrigação.

Conceição e Mandelli (2005) comparando valores diários da evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO com os valores estimados empregando-se métodos baseados na temperatura do ar e na radiação solar incidente, sob as condições de Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, concluíram que os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) que empregaram a radiação solar incidente

apresentaram desempenhos superiores aos que utilizaram somente valores de temperatura do ar.

### 2.3.2 Temperatura do Ar

A temperatura do ar tem sua importância pelo fato de ser um dos elementos climáticos mais disponíveis em estações meteorológicas. Na ausência de dados de radiação, esse elemento meteorológico pode ser usado como indicativo de energia no sistema estudado. A radiação absorvida pela atmosfera aumenta a temperatura do ar, contribuindo para o aumento do processo de evapotranspiração. Dessa forma, a temperatura do ar interfere nas condições ambientais, interagindo com outras variáveis de importância para o processo de evapotranspiração (MEDEIROS, 2002).

Em climas ensolarados quentes, a perda de água por meio da evapotranspiração é maior que em tempo nublado e fresco. A radiação solar de ondas curtas absorvida pela atmosfera e a radiação de ondas longas emitida pela terra elevam a temperatura do ar durante o dia. O calor sensível do ar circunvizinho transfere energia para a cultura e exerce como tal uma influência, controlando a taxa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

A confirmação da atuação da temperatura do ar na demanda evaporativa está ligada a radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pela superfície cultivada. O ar aquecido na camada próxima a cultura além de transferir energia para a planta na forma de calor sensível elevando as taxas evapotranspiratórias, também interfere na atividade fotossintética das plantas. As reações da fotossíntese se tornam menores em situações que a temperatura do ar é menor e maiores com o aumento dessa variável meteorológica, salientando que, cada cultura possui seus limites de resistência térmica (TEIXEIRA et al., 2004).

Conceição (2003) realizando um trabalho na região do Baixo Rio Grande, São Paulo, com o objetivo de estimar os valores da evapotranspiração de referência a partir de dados médios mensais de temperatura, utilizando-se de diferentes métodos de estimativa, encontrou melhores resultados com os métodos de Thornthwaite modificado e o de Hargreaves-Samani, pois apresentaram os melhores desempenhos para a estimativa mensal da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar, em comparação com modelo-padrão de Penman-Monteith parametrizado pela FAO.

Lima (2005) afirma que o método da amplitude de temperatura é recomendado para localidades onde não é apropriado importar dados de radiação de uma estação climaticamente heterogênea ou devido à falta de dados para um dado local.

Allen et al. (1998) recomendam que quando dados de radiação solar, e/ou dados de umidade relativa e dados de velocidade do vento são perdidos, a Equação de Hargreaves surge como uma alternativa para estimar a ETo.

Já Conceição e Mandelli (2005) conduzindo uma pesquisa em Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul encontraram resultados satisfatórios dentre os métodos que utilizaram somente a temperatura do ar.

### 2.3.3 Umidade Relativa do Ar

O vapor d'água é um dos constituintes variáveis do ar atmosférico, chegando a ter 4% em volume. Esse volume é determinado pela temperatura do ambiente, pois a capacidade de contenção do vapor d'água na atmosfera é função da temperatura do ar. Como o vapor d'água é oriundo da superfície do solo, a sua concentração máxima é próxima a ele e diminui a medida que se afasta da superfície (OMETTO, 1981).

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 (TUBELIS; NASCIMENTO, 1992).

Allen et al. (1998) dizem que, enquanto o fornecimento de energia do sol e do ar circunvizinho é a força motriz principal para a vaporização da água, a diferença entre a pressão de vapor da água à superfície de evapotranspiração e no ar circunvizinho é o fator determinante para a remoção do vapor. Campos bem úmidos em regiões áridas quentes e secas consomem grandes quantidades de água devido à abundância de energia e a força de dessecar da atmosfera. Em regiões tropicais úmidas, apesar da alta energia disponível, a alta umidade do ar reduzirá a demanda da evapotranspiração. Em um tal ambiente, o ar já se encontra perto da saturação, de forma que menos água adicional pode ser armazenada e conseqüentemente a taxa de evapotranspiração é mais baixa do que em regiões áridas.

Para Medeiros (2002) a oferta de energia, proveniente do sol e do ar, é a principal fonte de energia para evaporar a água, sendo a diferença entre pressão de vapor na superfície e no ar ao redor, fator determinante na transferência de vapor para atmosfera. Áreas bem úmidas em regiões áridas, secas e quentes, consomem mais água devido à maior disponibilidade de energia, e poder evaporante da atmosfera. Em climas úmidos de regiões tropicais, apesar da elevada quantidade de energia, a alta umidade relativa do ar reduz a evapotranspiração, pois este está sempre próximo da saturação. A umidade relativa local e a temperatura determinam o déficit de pressão de vapor.

O déficit de pressão de vapor (DPV) é um parâmetro climático muito importante na estimativa da ETo, esse parâmetro indica a capacidade de evaporação do ar e é dado pela diferença entre a pressão de vapor saturação e a pressão parcial de vapor. O DPV é um parâmetro de entrada fundamental em muitos modelos de evaporação e crescimento da plantas (LIMA, 2005).

Oliveira et al. (1998) compararam doze equações de estimativa de evapotranspiração, sendo dez variações da Equação de Penman–Monteith, usando diferentes métodos de cálculo do déficit de pressão de vapor e as equações de Hargreaves 1974 e 1985, no período de janeiro a setembro de 1997, divididos em período seco e chuvoso. Os autores observaram melhores estimativas de evapotranspiração, durante o período chuvoso do que o período seco. De acordo com os autores, o método de cálculo de déficit de pressão de vapor, que proporcionou melhores resultados combinados aos modelos de Penman-Monteith, para as condições de estudo, foi calculado com base na média de pressão de vapor.

Borges (2004) realizando trabalho com estimativa da evapotranspiração de referência (diária ou mensal), com a metodologia de Penman-Monteith/FAO, no município de Paraipaba, Ceará, afirma que se pode empregar, no cálculo da umidade relativa média do ar, qualquer uma das metodologias apresentadas no seu trabalho, contudo, 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.

#### 2.3.4 Velocidade do Vento

A análise dessa variável não é muito simples, vez que o aquecimento e o resfriamento do solo e da atmosfera derivam da diferença de pressão atmosférica, que

promove o movimento do ar originando assim a dinâmica complexa desse escoamento. Portanto, o vento se torna fraco, moderado ou forte dependendo da diferença entre as zonas de alta pressão atmosférica e as de baixa, sendo a topografia local também um fator que influencia a velocidade do vento (MENDONÇA, 2008).

Pereira et al. (1997) relatam que numa área vegetada a maior parte da energia é utilizada na evapotranspiração, resultando em menor aquecimento do ar. Essa situação induz ao aparecimento de um gradiente térmico entre duas áreas e havendo deslocamento do ar da área seca para a vegetada, haverá transporte horizontal de calor sensível para área úmida.

O processo de remoção do vapor depende em grande parte do vento e turbulência do ar que transferem grandes quantidades de ar de cima da superfície evaporante. Quando a água é vaporizada, o ar fica gradualmente saturado sobre a superfície evaporante com vapor de água. Se este ar não é continuamente substituído por ar seco, a força motriz para remoção de vapor de água e a taxa de evapotranspiração diminuirão (ALLEN et al., 1998).

A velocidade do vento é um elemento climático necessário no cálculo da evapotranspiração. O vento remove a camada de ar acima da superfície evaporante, criando uma condição favorável à formação de um gradiente de pressão de vapor, aumentando, dessa forma, o poder evaporante do local (LIMA, 2005).

Medeiros (1998) afirma que em condições áridas, pequena variação na velocidade do vento, proporciona grande variação na taxa de evapotranspiração.

Para o cálculo da evapotranspiração, a velocidade do vento é uma variável relevante. Como a velocidade do vento em um determinado local varia com o tempo, é necessário expressar isto como uma média, em um determinado período de tempo. Ventos fortes são freqüentemente associados com baixa umidade relativa, e ventos leves e médios com umidade relativa alta. Assim, tendências em variação da umidade relativa máxima e mínima diária deveriam ser semelhantes em ambas às localizações (ALLEN et al., 1998).

## **2.4 Estimativa e medida da evapotranspiração de referência**

A medida direta da evapotranspiração de referência é extremamente difícil e onerosa. Difícil porque exige instalações e equipamentos especiais; e onerosa porque tais estruturas são de alto custo, justificando-se apenas em condições experimentais (PEREIRA et al., 1997).

De acordo com Faria et al. (2006) a quantificação do fluxo de vapor d'água para a atmosfera proveniente de superfícies úmidas, como áreas cultivadas ou em pousio, é de grande interesse para a estimativa das necessidades hídricas de cultivos e disponibilidade hídrica do solo. Dentre os métodos disponíveis, os lisímetros determinam a evaporação ou evapotranspiração pelo balanço de massa ou volume de água, e são considerados padrão para aferição dos demais.

Os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração podem ser agrupados em três categorias: (1) Não-pesáveis com lençol freático de nível constante. Estes são mais utilizados em áreas onde o lençol freático é elevado; (2) Não-pesáveis com drenagem livre. Estes são os mais utilizados em áreas de alta precipitação; e (3) Lisímetros de pesagem mecânica, onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem. Além disso, são também classificados, quanto ao tipo de perfil (reconstruído ou monolítico), e ao sistema de drenagem (a vácuo ou por gravidade) (SILVA et al., 1999).

Os mesmos autores ainda comentam que os lisímetros de pesagem determinam diretamente a evapotranspiração (ET) pelo balanço de massa de água, ao contrário dos lisímetros não-pesáveis, que a estimam indiretamente, pelo balanço de volume. Existem vários tipos de lisímetros, sendo que o tamanho e o projeto de montagem de cada um dependem do requerimento específico do estudo e das condições de construção e de custos envolvidos.

Para Silva (2003) o lisímetro de pesagem, também conhecido como evapotranspirômetro, é um equipamento que mensura a evapotranspiração real de uma cultura que nele é cultivada, por meio do balanço hídrico. É tido por muitos autores como o valor real, ou seja, fornece a medida da evapotranspiração. Porém esse fato é questionado por outros autores, que consideram os valores obtidos, como uma estimativa da evapotranspiração.

O uso de lisímetros de pesagem serve como uma ferramenta padrão em estudos de perda de água das culturas, pois tais equipamentos medem diretamente a evapotranspiração de culturas agrônômicas que cobrem ou não totalmente o solo. Esses equipamentos quando bem projetados, calibrados e manejados medem precisamente e representativamente a evapotranspiração das culturas, integrando fatores ambientais que regem tal processo (CAMPECHE, 2002).

Machado e Mattos (2001) afirmam que os lisímetros de pesagem são peças fundamentais na medida da evapotranspiração, pois, além de permitirem a sua determinação direta, servem de instrumento de calibração para os métodos empíricos.

Santiago (2001) constatou que uma condição que dificulta bastante a qualidade das medidas de ETo com lisímetros de pesagem é o efeito da variação brusca da velocidade do vento, mesmo para dia sem chuvas. Quanto mais sensível for o sistema de pesagem maior será o efeito do arrasto provocado pelo vento, transferindo momento para a superfície com conseqüente oscilação na massa do sistema, mas sem que tenha realmente ocorrido saída ou entrada de água no lisímetro.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização do Local do Experimento**

O presente trabalho foi realizado na região da Chapada do Apodi, no município de Limoeiro do Norte, Ceará, cujas coordenadas geográficas de acordo com informações obtidas no DNOCS (2008) são: 5°20' de Latitude Sul, 37°52' de Longitude Oeste e altitude de 143m, clima semi-árido, BSw'h' de acordo com a classificação de Koppën, com os seguintes elementos climáticos apresentando valores médios anuais: precipitação, 772mm, temperatura do ar, 28,5°C; umidade relativa, 62%; insolação, 3.030 horas ano<sup>-1</sup>.

Foram utilizados dados provenientes da estação meteorológica automática pertencente à Unidade de Ensino e Pesquisa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Limoeiro do Norte, sendo que estes foram coletados no período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2007. As variáveis meteorológicas utilizadas foram: radiação solar global, Rs; umidade relativa do ar, UR; temperatura do ar, T; velocidade do vento,  $u_2$  (2,0 m de altura) e saldo de radiação, Rn.

#### **3.2 Análise dos Dados**

Os dados foram armazenados por um datalogger CR10X, da Campbell Scientific, programado para realizar as leituras dos sensores a cada minuto, com registros das médias ou totais a cada 60 minutos. No intervalo de até 15 dias, os dados foram coletados na estação e transferidos, com um cabo, para um microcomputador fazendo-se uso do software PC208W, onde foram convertidas em planilhas eletrônicas MS Excel. 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 coleta dos dados de referência para este trabalho apresenta, entre outros, os seguintes sensores e características:

#### **Velocidade do Vento**

- Marca Met One, modelo 034 A – L12;
- Faixa de medida de 0 a 45 m s<sup>-1</sup>;
- Limiar de partida de 0,4 m s<sup>-1</sup>; e
- Resolução de 0,1 m s<sup>-1</sup>.

#### **Temperatura do Ar**

- Marca Vaisala, modelo HMP45C;
- Faixa de medida de – 40°C;
- Precisão de 0,2°C a 20°C; e
- Elemento sensor PRT de 1000 Ohms.

#### **Umidade Relativa do Ar**

- Marca Vaisala, modelo HMP45C;
- Faixa de medida de 0 a 100%;
- Precisão de 2% (0 a 90%) e 3% (90 a 100%); e
- Elemento sensor Polímero Capacitivo.

#### **Radiação Solar Global (piranômetro)**

- Marca Kipp & Zonen, modelo SP-LITE;
- Elemento sensor de silício, sensibilidade de 100 microV W<sup>-1</sup> m<sup>2</sup>;
- Range espectral de 400 a 1100 nm;
- Precisão melhor que 3% (típico);
- Temperatura de operação de –30°C a +70°C; e
- Faixa de medida de 0 a 2000 W m<sup>-2</sup>.

### **Saldo de Radiação**

- Marca Kipp & Zonnen, modelo NR-LITE;
- Faixa de medida de  $-2000$  a  $+2000 \text{ W m}^{-2}$ ;
- Sensibilidade de  $10 \text{ microV W}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (nominal); e
- Elemento sensor termopilhas, proteção do elemento sensor de Teflon (não necessita de cúpulas).

### **Coletor de Dados Remoto**

- Marca Campbell Scientific Inc, modelo SM4M;
- Descarregamento de dados em campo;
- Capacidade de armazenamento de 4 MB;
- Inclui cabos de conexão modelos SC12 e SC25PS;
- Interface para computador PC modelo SC532A; e
- Software para descarregamento de dados, processamento e supervisão de dados, modelo PC208W.

### 3.2.2 Equação de Jensen-Haise

Trabalhando em regiões semi-áridas americanas, Jensen e Haise, propuseram a seguinte relação para  $ET_{oJH}$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) (PEREIRA et al., 1997):

$$ET_{oJH} = R_s \cdot (0,0252T + 0,078) \quad (1)$$

em que:

$ET_{oJH}$  = evapotranspiração de referência, por Jensen-Haise,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$R_s$  = radiação solar ao nível do solo,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

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

### 3.2.3 Equação de Ivanov

Para a estimativa da evapotranspiração de referência foi utilizada a Equação 2, descrita por Jensen (1973):

$$ET_{oIV} = 0,006(25 + T)^2 \cdot \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (2)$$

em que:

$ET_{oIV}$  = evapotranspiração de referência, por Ivanov, mm dia<sup>-1</sup>;

$T$  = temperatura média do ar, °C;

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

### 3.2.4 Equação de Linacre

A evapotranspiração de referência pelo método de Linacre, em mm dia<sup>-1</sup>, pode ser obtida em função da altitude, latitude e das temperaturas diárias máxima, mínima e do ponto de orvalho, através da Equação 3 (LINACRE, 1977):

$$ET_{oL} = \frac{\frac{J \cdot (T + 0,006h)}{100 - \phi} + 15 \cdot (T - T_o)}{80 - T} \quad (3)$$

em que:

$ET_{oL}$  = evapotranspiração de referência, por Linacre, mm dia<sup>-1</sup>;

$J$  = constante igual a 500, no caso de vegetação;

$h$  = altitude do local (m);

$\phi$  = Latitude do local em módulo (graus);

$T$  = temperatura média do ar, °C;

$T_o$  = temperatura média mensal do ponto de orvalho (°C).

O valor de  $(T-T_o)$  foi calculado de acordo com a Equação 4:

$$(T - T_o) = 0,0023h + 0,37T + 0,53.(T_{max} - T_{min}) + 0,35.R - 10,9 \quad (4)$$

em que:

R = diferença entre as temperaturas médias dos meses mais quentes e mais frios (°C).

Essa Equação foi desenvolvida usando-se 222 conjuntos de dados da África e da América do Sul. Pereira et al. (1997) afirmaram que para as condições brasileiras esta Equação deve ser usada com reservas, pois não existem estudos que substanciem esta proposição.

### 3.2.5 Equação de Hargreaves-Samani

O método proposto por Hargreaves e Samani (1985), para a estimativa da evapotranspiração de referência, é uma alternativa para situações em que não se têm dados medidos de radiação solar à superfície, umidade relativa do ar e velocidade do vento (TAGLIAFERRE, 2006).

Usando dados obtidos no lisímetro de Davis, Califórnia, com gramado, Hargreaves e Samani (1985) propuseram a Equação 5 para a estimativa da evapotranspiração de referência diária (PEREIRA et al., 1997).

$$ET_{oHS} = 0,0023R_o.(T_{max} - T_{min})^{0,5}.(T + 17,8) \quad (5)$$

em que:

$ET_{oHS}$  = evapotranspiração de referência, por Hargreaves e Samani, mm dia<sup>-1</sup>;

$R_o$  = radiação solar extraterrestre ou no topo da atmosfera, mm dia<sup>-1</sup>;

$T_{max}$  = temperatura máxima diária, °C;

$T_{min}$  = temperatura mínima diária, °C.

Para a estimativa da radiação solar extraterrestre ( $R_o$ ), foi utilizada Equação 6 usando a metodologia recomendada por Allen et al. (1998).

$$R_o = \frac{24.(60)}{\pi} . G_{CS} . d_R ( H.\text{sen}\theta.\text{sen}\delta + \text{cos}\theta.\text{cos}\delta.\text{sen}H) \quad (6)$$

em que:

$R_o$  = radiação solar extraterrestre ou no topo da atmosfera,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$G_{CS}$  = constante solar com valor médio de  $0,082 \text{ MJ m}^2 \text{ min}^{-1}$ ;

$d_R$  = inverso da distância relativa da Terra ao Sol;

$\theta$  = latitude do local, radianos;

$\delta$  = declinação solar;

$H$  = ângulo horário do pôr-do-sol, em radianos, que foi calculado pela Equação 7:

$$\text{cos}H = -\text{tg}\theta.\text{tg}\delta \quad (7)$$

Para o cálculo do inverso da distância relativa da terra ao sol ( $d_R$ ) e da declinação solar ( $\delta$ ), Allen et al. (1998) propuseram as equações 8 e 9:

$$d_R = 1 + 0,033.\text{cos}\left(\frac{2.\pi}{365} . J\right) \quad (8)$$

$$\delta = 0,4093\text{sen}\left(\frac{2.\pi}{365} . J - 1,405\right) \quad (9)$$

em que:

$J$  = dia Juliano.

### 3.2.6 Equação de Makkink

Usando dados de evapotranspiração potencial de um gramado em lisímetro de lençol freático constante, Makkink (1957) obteve correlação entre ETP diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e a radiação solar ao nível da superfície expressa em equivalente de evaporação ( $R_s$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) (PEREIRA et al., 1997):

$$ET_{oM} = 0,61 \cdot W \cdot R_s - 0,12 \quad (10)$$

em que:

$ET_{oM}$  = evapotranspiração de referência, por Makkink ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$R_s$  = radiação solar global ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$W$  = fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo molhado ( $T_u$ ), que pode ser calculado através das equações 11 e 12 propostas por Wilson e Rouse (1972) e Viswanadham et al. (1991) (PEREIRA et al., 1997).

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T_u \quad 0 < T_u < 16^\circ C \quad (11)$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_u \quad 16,1 < T_u < 32^\circ C \quad (12)$$

em que:

$T_m$  = temperatura média diária,  $^\circ C$ .

Ao invés da temperatura do bulbo molhado ( $T_u$ ), usou-se a temperatura média diária ( $T_m$ ), condição mais comum, conforme descrita por Pereira et al. (1997).

### 3.2.7 Equação de Penman-Monteith FAO

Uma equipe de peritos recomendou a adoção do método combinado de Penman-Monteith como novo padrão para estimar a evapotranspiração de referência e aconselhou os

procedimentos para cálculo dos vários parâmetros. Definindo a cultura de referência como uma cultura hipotética com uma altura assumida de 0.12 m que têm uma resistência de superfície de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e um albedo de 0,23, se assemelhando à evaporação de uma superfície extensa de grama verde de altura uniforme, em crescimento ativo e com a umidade do solo adequada, foi desenvolvido o método FAO Penman-Monteith. O método supera as desvantagens do método anterior de Penman-FAO e fornece valores mais consistentes com o uso de água pela cultura real com dados mundiais (ALLEN et al., 1998).

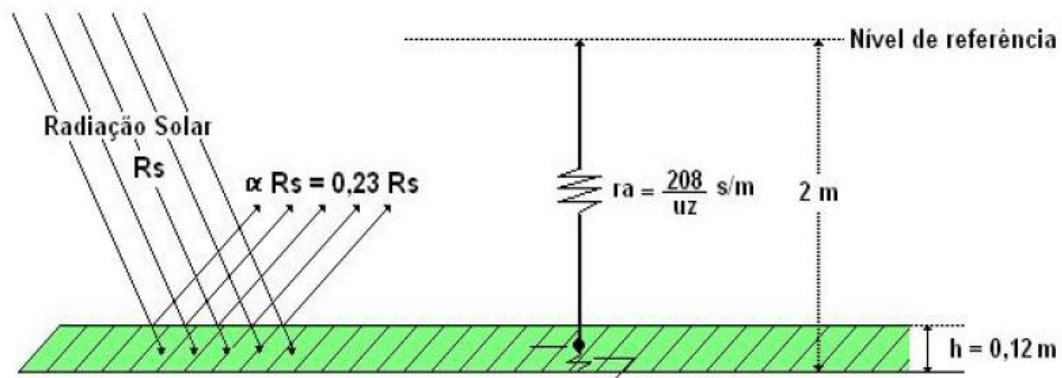


Figura 2 - Características da cultura hipotética de referência, adaptado de Allen et al. (1998).

Para estimar a evapotranspiração de referência diária utilizou-se o modelo de Penman-Monteith, Equação 13, padronizado pela FAO e descrito por Allen et al. (1998):

$$ET_{oPM} = \frac{0,408\Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34u_2)} \quad (13)$$

em que:

$ET_{oPM}$  = evapotranspiração de referência, por Penman-Monteith FAO ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$R_n$  = saldo de radiação solar à superfície vegetada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );

$G$  = densidade de fluxo de calor sensível no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );

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

$u_2$  = velocidade do vento medida a 2,0 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  = pressão de vapor da água na saturação (kPa);

$e_a$  = pressão de vapor da água atual (kPa);

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

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$\gamma$  = constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Na estimativa da evapotranspiração de referência, o valor de G foi considerado a zero. Segundo Allen et al. (1998) o efeito do fluxo de calor no solo (G) é ignorado para cálculos diários porque a magnitude do fluxo neste caso é relativamente pequena, contudo os mesmos autores comentam que quando o solo está esquentando (primavera) e esfriando (outono), o fluxo de calor no solo para períodos mensais pode se tornar significativo utilizando então Rn mensal médio.

A pressão atmosférica, P, é a pressão exercida pelo peso da atmosfera na terra. A evaporação em altas altitudes é causada devido à baixa pressão atmosférica como está expressa na constante psicrométrica, sendo utilizada a seguinte Equação (ALLEN et al., 1998):

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (14)$$

em que:

P = pressão atmosférica (kPa);

z = elevação sobre o nível do mar (altitude) (m).

Com os dados da pressão foi calculado a constante psicrométrica, utilizando a Equação 15 (ALLEN et al., 1998):

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,665 * 10^{-3} P \quad (15)$$

em que:

$\gamma$  = constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>);

P = pressão atmosférica (kPa);

$\lambda$  = calor latente de vaporização, 2,45 (MJ kg<sup>-1</sup>);

$c_p$  = calor específico do ar à pressão constante, 1,013 10<sup>-3</sup> (MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>);

$\varepsilon$  = relação peso molecular de vapor de água/ar seco = 0,622.

Como a pressão de vapor do ar saturado é relacionada com a temperatura do ar, pode ser calculado a partir da Equação a seguir, descrita por Allen et al. (1998):



$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27.T}{T + 237,3}\right) \quad (16)$$

em que:

$e_s$  = pressão de vapor da água na saturação (kPa);

$T$  = temperatura média do ar (°C).

Para o cálculo da pressão parcial de vapor d'água foi utilizada a seguinte Equação (ALLEN et al., 1998):

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100} \quad (17)$$

em que:

$e_a$  = pressão parcial do vapor d'água do ar (kPa);

$e_s$  = pressão de vapor da água na saturação (kPa);

UR = umidade relativa do ar (%).

Para o cálculo da evapotranspiração de referência, a declividade da relação entre a pressão de vapor saturado e temperatura do ar é requerida. A declividade da curva a uma determinada temperatura é dada pela Equação 18 (ALLEN et al., 1998):

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (18)$$

Alguns parâmetros foram considerados como constantes, embora apresentando uma pequena variação, devido a aceitação científica e a fraca variabilidade durante o período das estimativas como exemplo, o valor da massa específica do ar atmosférico ( $\rho$ ), considerada como  $1,26 \text{ kg m}^{-3}$  e o calor latente de evaporação da água ( $\lambda$ ) considerado como  $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  (AZEVEDO, 1999).

### 3.3 Análise dos resultados da estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

Para a comparação dos dados das estimativas da evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith padronizado pela FAO com as demais equações empregadas neste trabalho, utilizaram-se visualizações gráficas, análises de regressão, coeficiente de determinação e o índice de precisão (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), sendo sua classificação descrita na Tabela 1 por Hoppinks (2002). A classificação do coeficiente de desempenho ou confiança “c” é apresentada na Tabela 2 e corresponde a multiplicação do índice de exatidão (d) pelo índice de precisão (r) proposto por Willmott et al. (1985). Os demais índices estatísticos serão descritos em seguida:

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de correlação ou índice de precisão

Valor de “r”	Precisão
0,9-1,0	Quase perfeito
0,7-0,9	Muito alto
0,5-0,7	Alto
0,3-0,5	Moderado
0,1-0,3	Baixo
0,0-0,1	Muito baixo

Fonte: Hoppkins, (2002).

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de desempenho

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas, (1997).

#### 3.3.1 Coeficiente de correlação ou índice de precisão

É o grau de relação entre as variáveis e, determina o quanto uma Equação linear descreve, ou “explica” a relação existente entre as variáveis. O coeficiente de correlação (r) mede a quantidade de dispersão em torno da Equação linear ajustada através do método dos mínimos quadrados. O (r) é uma estimativa do parâmetro ( $\rho$ ), medindo os desvios em relação

à reta ajustada. O coeficiente de correlação ( $r$ ) será definido como a razão entre a covariância e a raiz quadrada do produto das variâncias de  $X$  e  $Y$  (MAIA, 2008).

$$r = \frac{\Sigma(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\left[ \Sigma(X - \bar{X})^2 \right] \left[ \Sigma(Y - \bar{Y})^2 \right]}} \quad (19)$$

onde:  $X$  e  $Y$  são os valores medidos e ambas as variáveis. As médias aritméticas de ambas as variáveis  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$ , são representados por:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X \quad (20)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y \quad (21)$$

### 3.3.2 Índice de concordância, exatidão ou Willmott

A concordância se refere à exatidão ou à aproximação dos dados estimados aos verdadeiros observados; pode ser avaliada graficamente pelo afastamento dos pontos cotados no gráfico de regressão em relação à reta de valores iguais, 1:1. Para quantificar matematicamente essa aproximação, foi desenvolvido por Willmott (ROBINSON; HUBBARD, 1990) um coeficiente designado concordância ou exatidão, representado pela letra  $d$ . Seus valores variam de 0,0 para nenhuma concordância e, 1,0 para concordância perfeita entre eles (CAMARGO; CAMARGO, 2000).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (20)$$

### 3.3.3 Índice de Desempenho

Este índice foi utilizado “c”, para indicar o desempenho dos métodos, reunindo os índices de precisão “r” e de exatidão “d”, sendo expresso da seguinte forma:

$$c = r.d \quad (21)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Evapotranspiração de referência na escala diária

Analisando os dados meteorológicos diários obtidos no período do trabalho, com a finalidade de estimar a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na escala diária, observa-se na Figura 3A que o método de Jensen-Haise foi o que melhor correlacionou-se com o padrão, apresentando coeficiente de determinação  $R^2 = 0,82$ , seguido por Makkink (Figura 3E) com  $R^2 = 0,79$ , valor esse diferente do encontrado por Conceição e Mandelli (2005) que realizando pesquisa em Bento Gonçalves, no estado do Rio Grande do Sul encontraram um valor de  $R^2 = 0,92$ . O método de Linacre foi o que obteve o menor coeficiente de determinação com valor de  $R^2 = 0,48$  (Figura 3C).

Já o método de Jensen-Haise (Figura 3A), apesar de ter apresentado uma boa correlação com o método padrão, o mesmo superestimou a ET<sub>o</sub>. O método de Makkink (Figura 3E) subestimou a ET<sub>o</sub>. Os métodos de Ivanov (Figura 3B) e Hargreaves-Samani (Figura 3D) apresentaram valores de  $R^2 = 0,62$  e  $0,54$ , respectivamente.

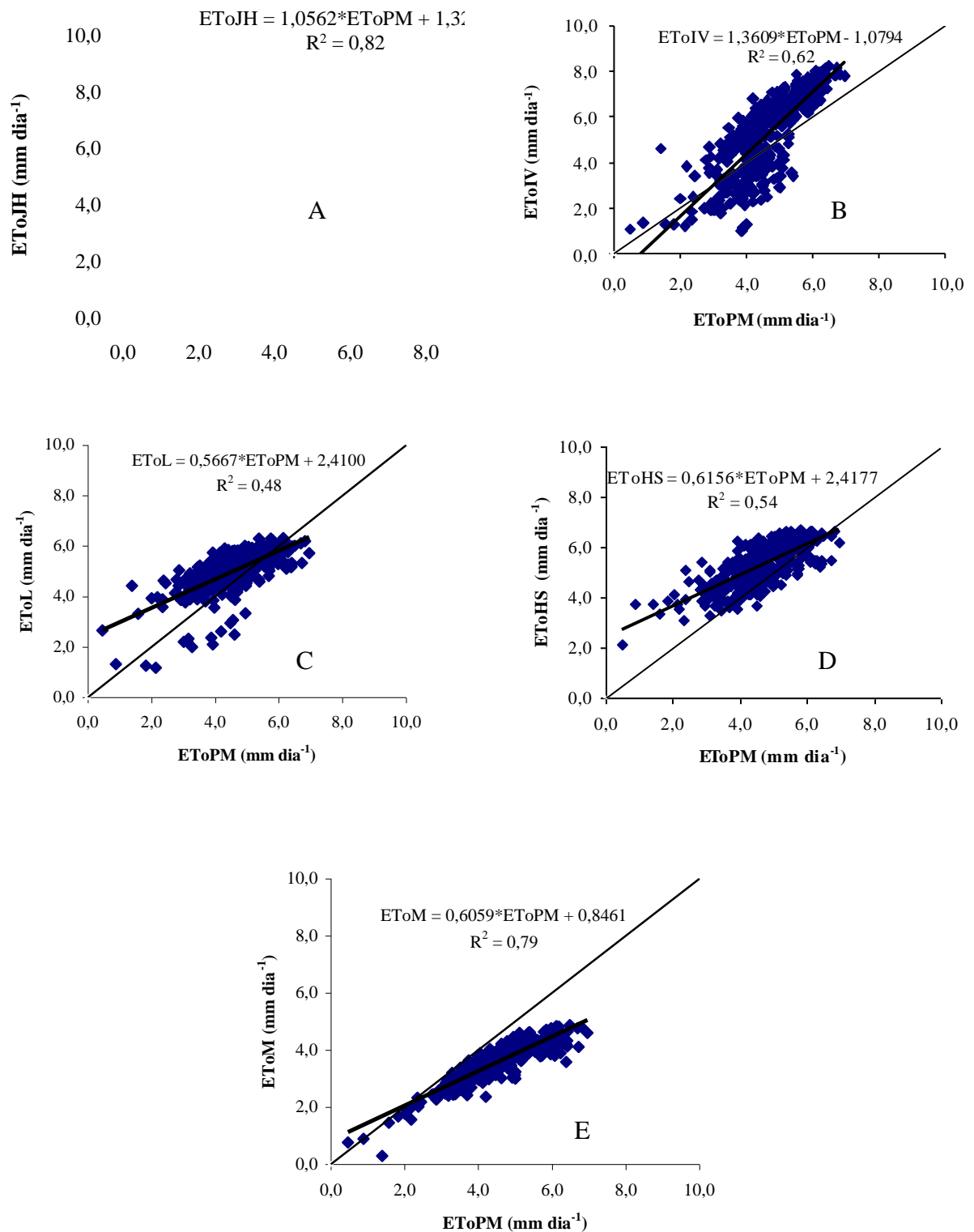


Figura 3 - Relação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO (EToPM) e a evapotranspiração de referência estimada por Jensen-Haise (A), Ivanov (B), Linacre (C), Hargreaves-Samani (D) e Makkink (E) na escala diária, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007.

Como pode ser visto na Tabela 3, o método de Jensen-Haise apresentou valor de índice de precisão  $r = 0,91$ , classificado como quase perfeito, segundo Hoppinks (2002). E ainda, índice de concordância ( $d$ ) com valor de  $0,65$ . Vale ressaltar que, não é possível avaliar o quanto o método se adapta a região de estudo apenas por tais índices.

O método de Makkink também apresentou um valor significativo quanto ao índice de precisão, com  $r = 0,89$ , que foi classificado segundo Hoppinks (2002) como muito alto. Já o método de Linacre obteve o menor valor de índice de precisão, com  $r = 0,69$ , classificado como alto, segundo Hoppinks (2002).

Camargo e Sentelhas (1997) propuseram em trabalho realizado no estado de São Paulo, um índice no qual é possível classificar o método analisado quanto ao seu desempenho, sendo que para esta escala temporal foi observado, para o método de Jensen-Haise, o valor de  $c = 0,59$ , sendo classificado como sofrível.

Tabela 3 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação ou precisão ( $r$ ), índice de Willmott ou concordância ( $d$ ), índice de desempenho ( $c$ ), entre a ETo estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO com os demais métodos na escala diária, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007

MÉTODOS	$R^2$	$r$	$d$	$c$
Jensen-Haise	0,82	0,91	0,65	0,59
Ivanov	0,62	0,79	0,78	0,62
Linacre	0,48	0,69	0,78	0,54
Hargreaves-Samani	0,54	0,74	0,76	0,56
Makkink	0,79	0,89	0,40	0,35

O valor do índice de concordância obtido pelo método de Makkink apresentou  $d = 0,40$ , bem diferente do valor encontrado por Conceição e Mandelli (2005) com  $d = 0,95$ . Já o desempenho do método foi classificado como péssimo com um valor de  $c = 0,35$ , também divergindo de Conceição e Mandelli (2005) que para Bento Gonçalves, no estado do Rio Grande do Sul, encontraram um  $c = 0,91$ , classificando-o como ótimo.

Os índices de concordância encontrados para os métodos de Ivanov e Linacre obtiveram valores semelhantes com  $d = 0,78$ . O método de Hargreaves-Samani apresentou um valor de  $d = 0,76$ . O índice de desempenho ( $c$ ) encontrado através do método de Ivanov foi igual a  $0,62$ , sendo classificado como mediano. Utilizando o método de Linacre para estimar a ETo. Conceição (2003) encontrou um valor de  $c = 0,65$ , classificando-o como mediano para as condições do Baixo Rio Grande, no estado de São Paulo. No entanto, esse valor descoberto pelo pesquisador difere do encontrado no presente trabalho, no qual os métodos de Linacre e

Hargreaves-Samani obtiveram índices de desempenho  $c = 0,54$  e  $0,56$ , respectivamente, sendo classificados como sofrível.

Para o método de Hargreaves-Samani, Medeiros (2002) realizando trabalho em Paraipaba, no estado do Ceará, classificou o método como mau, porém, não ficando muito distante da classificação encontrada no presente estudo. Entretanto, Conceição e Mandelli (2005) classificaram este método como muito bom, para as condições de Bento Gonçalves, no estado do Rio Grande do Sul. Uma possível discordância entre os trabalhos pode ser devida ao clima das regiões estudadas, já que o clima do estado do Ceará é mais seco do que o clima do estado do Rio Grande do Sul, e a amplitude térmica diária dos estados é diferenciada, podendo influenciar diretamente no desempenho dos métodos.

## 4.2 Evapotranspiração de referência na escala decedial

Com os dados de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) estimados na escala decedial, observou-se que o método de Jensen-Haise (Figura 4A) apresentou o melhor coeficiente de determinação  $R^2 = 0,81$ , superestimando a ET<sub>o</sub> em relação ao método de Penman-Monteith-FAO. Já Mendonça et al. (2003) encontraram um  $R^2 = 0,82$  para a Região Norte Fluminense, no estado do Rio de Janeiro, valor este muito próximo ao descoberto neste trabalho.

O método de Makkink (Figura 4E) apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,79$ , superestimando a ET<sub>o</sub>, concordando com Mendonça et al. (2003) que também encontraram um valor de  $R^2 = 0,79$ , no período de setembro de 1997 a dezembro de 2000. Verificou-se que o método de Linacre (Figura 4C) foi o que obteve o menor valor para o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,51$ , superestimando a ET<sub>o</sub>, portanto, discordando de Mendonça et al. (2003) que encontraram um  $R^2 = 0,82$  para a Região Norte Fluminense, no estado do Rio de Janeiro.

O método de Ivanov (Figura 4B) apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,71$ , com tendência para superestimar da ET<sub>o</sub>. O método de Hargreaves-Samani (Figura 4D) apresentou valor do coeficiente de determinação  $R^2 = 0,66$ , com uma leve melhoria em relação a escala diária. Entretanto, este valor encontrado diferiu do observado por Medeiros (2002) para o município de Paraipaba, no estado do Ceará, com valor de  $R^2 = 0,48$ .



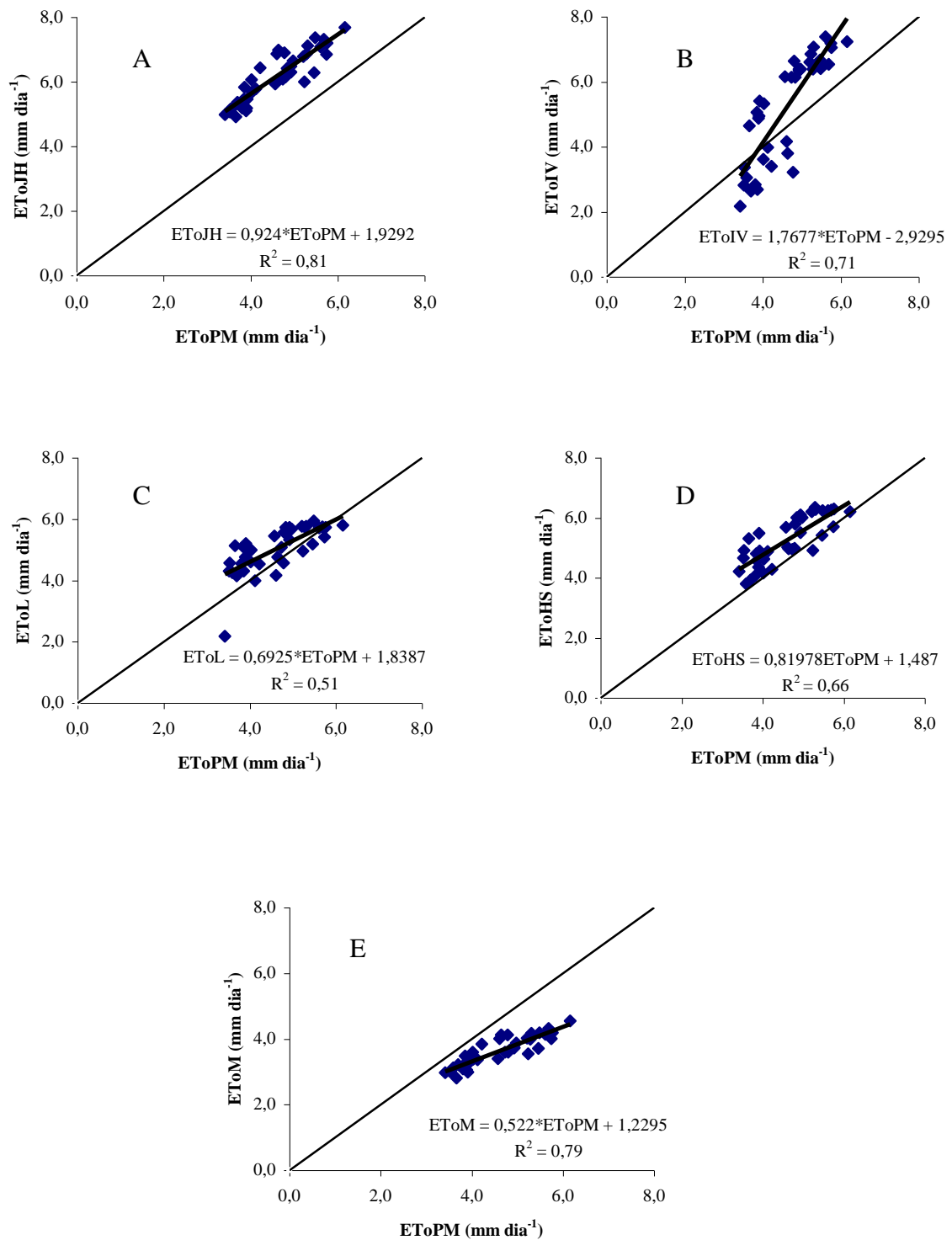


Figura 4 - Relação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO (EToPM) e a evapotranspiração de referência estimada por Jensen-Haise (A), Ivanov (B), Linacre (C), Hargreaves-Samani (D) e Makkink (E) na escala decencial, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007.

Observa-se na Tabela 4 que, o método de Jensen-Haise apresentou valor de índice de precisão  $r = 0,90$  que, segundo Hoppinks (2002), classifica-se como quase perfeito, sendo este valor igual ao encontrado por Mendonça et al. (2003) para a Região Norte Fluminense, no estado do Rio de Janeiro. Já os métodos de Ivanov, Linacre, Hargreaves-Samani e Makkink apresentaram índices de precisão  $r = 0,84, 0,72, 0,81, 0,89$ , respectivamente, portanto, todos sendo classificados como muito alto. Entretanto, o método de Linacre, segundo Mendonça et al. (2003), foi classificado como quase perfeito para a Região Norte Fluminense, no estado do Rio de Janeiro, discordando do resultado apresentado neste trabalho. Para o método de Hargreaves-Samani, Medeiros (2002) encontrou  $r = 0,69$ , em Paraipaba, no estado do Ceará. Porém, Mendonça et al. (2003) observaram  $r = 0,89$ , para a Região Norte Fluminense, no estado do Rio de Janeiro, expondo assim a divergência dos resultados encontrados para cada região.

Tabela 4 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação ou precisão ( $r$ ), índice de Willmott ou concordância ( $d$ ), índice de desempenho ( $c$ ), entre a ETo estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO com os demais métodos na escala decenal, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007

MÉTODOS	$R^2$	$r$	$d$	$c$
Jensen-Haise	0,81	0,90	0,55	0,49
Ivanov	0,71	0,84	0,75	0,63
Linacre	0,51	0,72	0,78	0,56
Hargreaves-Samani	0,66	0,81	0,77	0,62
Makkink	0,79	0,89	0,63	0,56

Os métodos de Linacre, Hargreaves-Samani e Ivanov foram os que apresentaram os maiores valores quanto ao índice de concordância  $d = 0,78, 0,77$  e  $0,75$ , respectivamente. O método de Makkink apresentou  $d = 0,63$  e, para Jensen-Haise encontrou-se  $d = 0,55$ .

O índice de desempenho encontrado através do método de Ivanov foi de  $c = 0,63$ , sendo classificado como mediano. Vale ressaltar que, esse valor obtido se aproximou do valor encontrado na escala diária. Observou-se que o método de Hargreaves-Samani obteve um índice de desempenho  $c = 0,62$ , sendo classificado como mediano, porém, Medeiros (2002) encontrou um valor de  $c = 0,44$ , sendo classificado como mau para as condições do município de Paraipaba, no estado do Ceará.

Coincidentemente os métodos de Linacre e Makkink apresentaram o mesmo valor para o índice de desempenho, sendo  $c = 0,56$ , classificando-se como sofrível. Segundo Pereira et al. (1997), uma das possíveis causas do método de Linacre ter obtido este desempenho, pode ser porque o mesmo utiliza apenas a temperatura do ar como variável para estimar a

ET<sub>o</sub>, sendo que este foi desenvolvido para estimar a evapotranspiração mensal média de uma área bem suprida de umidade. Utilizando a metodologia de Linacre para estimar a ET<sub>o</sub>, Conceição (2003) encontrou um valor de  $c = 0,65$ , classificando-o como mediano, para as condições do Baixo Rio Grande, no estado de São Paulo. Entretanto, esse valor descoberto pelo pesquisador difere do encontrado neste trabalho, pois, os métodos de Linacre e Hargreaves-Samani obtiveram índices de desempenho  $c = 0,54$  e  $0,56$ , respectivamente, sendo classificados como sofrível. O método de Jensen-Haise apresentou um índice de desempenho  $c = 0,49$ , sendo classificado como mau.

### 4.3 Evapotranspiração de referência na escala mensal

Assim como nas escalas diária e decenal, na escala mensal os métodos de Jensen-Haise (Figura 5A) e Makkink (Figura 5E) foram os que apresentaram os maiores valores de coeficientes de determinação  $R^2 = 0,85$  e  $0,81$ , respectivamente, sendo que o método de Jensen-Haise superestimou a ET<sub>o</sub> em relação ao método de Penman-Monteith-FAO. Já Araújo et al. (2007) encontraram através do método de Makkink um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,71$  para a cidade de Boa Vista, no estado de Roraima, diferindo do valor encontrado no presente trabalho.

Os métodos de Linacre e Hargreaves-Samani apresentaram coeficientes de determinação  $R^2 = 0,75$  e  $0,73$ , respectivamente. Trabalhando na cidade de Boa Vista, no estado de Roraima, Araujo et al. (2007) encontraram um  $R^2 = 0,62$  para o método de Hargreaves-Samani, diferindo do valor encontrado neste trabalho.

Pode se notar na Figura 5B que o método de Ivanov apresentou um  $R^2 = 0,71$ , divergindo do valor encontrado por Santos et al. (2008), onde estes autores conduzindo uma pesquisa em Limoeiro do Norte, no estado do Ceará, encontraram  $R^2 = 0,98$ . Entretanto, deve ser levado em consideração a série histórica usada em cada trabalho, haja vista o período utilizado neste.

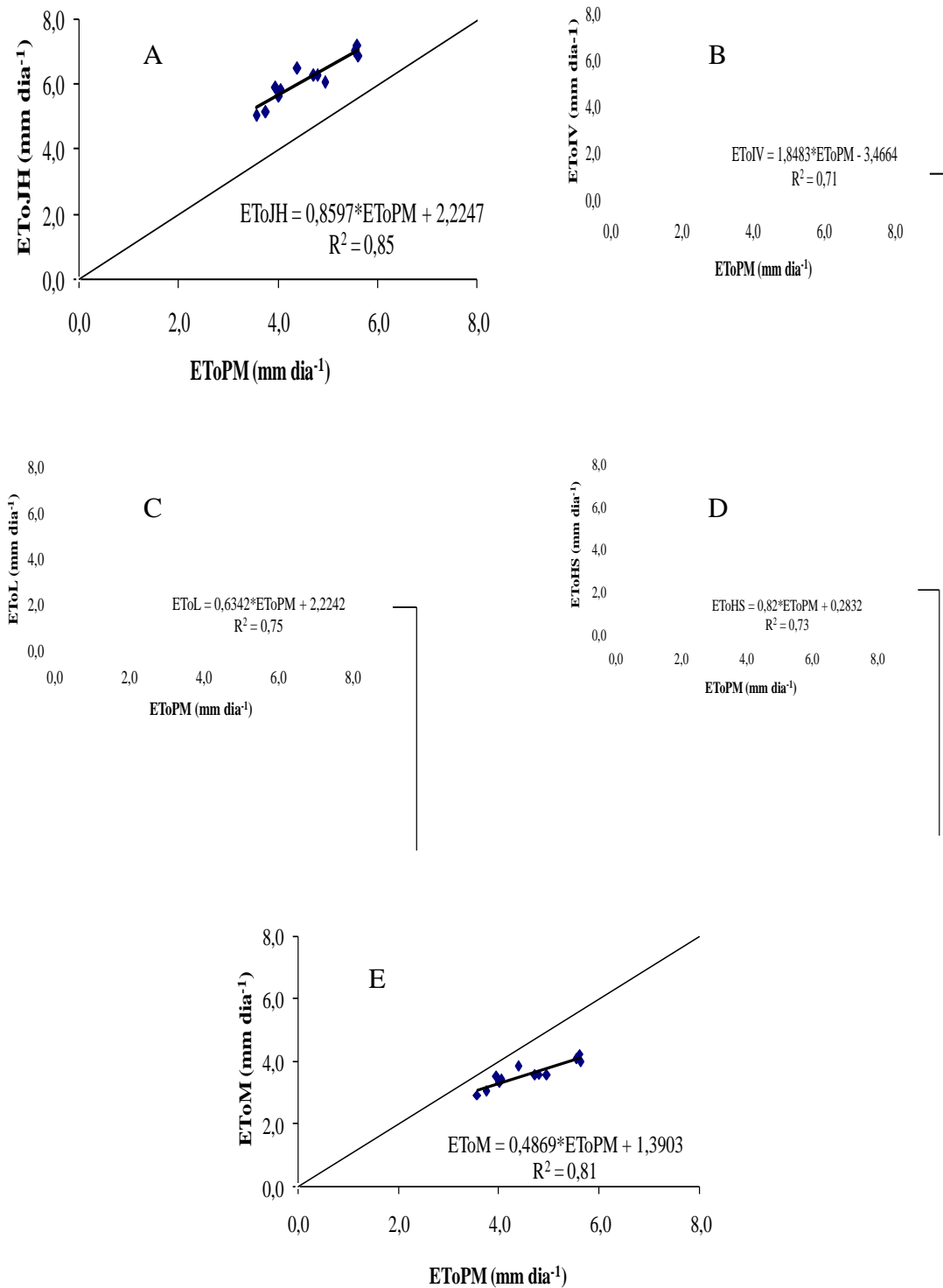


Figura 5 - Relação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO (EToPM) e a evapotranspiração de referência estimada por Jensen-Haise (A), Ivanov (B), Linacre (C), Hargreaves-Samani (D) e Makkink (E) na escala mensal, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007.

Como pode ser visto na Tabela 5, os métodos de Jensen-Haise e Makkink apresentaram valores de índices de precisão  $r = 0,92$  e  $0,90$ , respectivamente, classificados como quase perfeito, de acordo com Hoppinks (2002). Entretanto, Araújo et al. (2007) encontraram  $r = 0,84$  para Boa Vista, no estado de Roraima, valor este classificado como muito alto.

Tabela 5 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), correlação ou precisão ( $r$ ), índice de Willmott ou concordância ( $d$ ), índice de desempenho ( $c$ ), entre a ETo estimada pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO com os demais métodos na escala mensal, em Limoeiro do Norte, Ceará, em 2007

MÉTODOS	$R^2$	$r$	$d$	$c$
Jensen-Haise	0,85	0,92	0,53	0,50
Ivanov	0,71	0,84	0,76	0,64
Linacre	0,75	0,87	0,76	0,66
Hargreaves-Samani	0,73	0,86	0,77	0,66
Makkink	0,81	0,90	0,61	0,54

Já o método de Linacre apresentou índice de precisão  $r = 0,87$ , sendo classificado como muito alto. Os métodos de Hargreaves-Samani e Ivanov apresentaram índices de precisão  $r = 0,86$  e  $0,84$ , respectivamente, classificando-se como muito alto. Entretanto, o método de Hargreaves-Samani, segundo Araújo et al. (2007), também foi classificado como muito alto para Boa Vista, no estado de Roraima, concordando com a classificação obtida neste trabalho. Já para o método de Ivanov, Camargo e Sentelhas (1997) conduzindo um trabalho nas cidades de Campinas, Ribeirão Preto e Pindamonhangaba, no estado de São Paulo, observaram valores de  $r = 0,26$ ,  $0,31$  e  $0,61$ , respectivamente, divergindo do valor obtido no presente trabalho.

O método de Hargreaves-Samani apresentou o maior valor para o índice de concordância  $d = 0,77$ , discordando do valor encontrado,  $d = 0,57$ , por Araújo et al. (2007) em Boa Vista, no estado de Roraima. Os métodos de Linacre e Ivanov, coincidentemente, apresentaram os mesmos valores para o índice de concordância, sendo  $d = 0,76$ . Para o método de Ivanov, Camargo e Sentelhas (1997) conduzindo um trabalho nas cidades de Campinas, Ribeirão Preto e Pindamonhangaba, no estado de São Paulo, observaram valores de  $d = 0,49$ ,  $0,51$  e  $0,76$ , respectivamente.

Para os métodos de Makkink e Jensen-Haise foram encontrados os valores de índices de concordância  $d = 0,61$  e  $0,53$ , concomitantemente. Trabalhando na cidade de Boa Vista, no estado de Roraima, Araújo et al. (2007) encontraram um  $d = 0,17$  para o método de Makkink, diferindo consideravelmente do valor encontrado neste trabalho.

Para o método de Hargreaves-Samani, foi encontrado o índice de desempenho  $c = 0,66$ , classificado como bom, porém, discordando de Araújo et al. (2007) que para o município de Boa Vista, no estado de Roraima, classificou esse método como sofrível, com  $c = 0,57$ .

Para os métodos de Linacre, Ivanov, Makkink e Jensen-Haise, o presente trabalho encontrou os valores de índices de desempenho  $c = 0,66, 0,64, 0,54$  e  $0,50$ , sendo estes classificados como bom, mediano, sofrível e mau, respectivamente. Divergindo destes resultados, Camargo e Sentelhas (1997) conduzindo trabalho nas cidades de Campinas, Ribeirão Preto e Pindamonhangaba, no estado de São Paulo, observaram valores médios de  $c = 0,46, 0,25, 0,70$  e  $0,58$ , para os métodos de Linacre, Ivanov, Makkink e Jensen-Haise, sendo classificados como mau, péssimo, bom e sofrível, respectivamente.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que:

O método de Ivanov obteve o melhor desempenho quanto à estimativa da evapotranspiração de referência na escala diária.

Os métodos de Ivanov e Hargreaves-Samani apresentaram os melhores desempenhos quanto à estimativa da evapotranspiração de referência na escala decenal.

Os métodos de Linacre, Hargreaves-Samani e Ivanov apresentaram os melhores desempenhos quanto à estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Utilizar o método de Hargreaves-Samani devido à maior facilidade de obtenção de seus dados e a praticidade no seu cálculo, embora os métodos de Ivanov e Hargreaves-Samani tenham apresentado os melhores índices de desempenho na escala decedial.

Utilizar na estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal os métodos de Linacre e Hargreaves-Samani, pois, os mesmos necessitam apenas de dados de temperatura do ar.

Instalar lisímetros de pesagem nas estações meteorológicas para medir a evapotranspiração de referência.



## 7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 300p.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. A. G. da. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 63-68, 2003.
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. dos. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) Pará. **Caatinga** (Mossoró, Brasil), v.20, n.4, p.84-88, julho/setembro 2007.
- 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 de Doutorado em Agronomia), Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2006. 625p.
- BORGES, R. L. M. **Evapotranspiração de referência utilizando diferentes metodologias para o cálculo da radiação solar global, da temperatura e da umidade relativa do ar**. 2004. 60 f. (Dissertação de Mestrado em Agronomia), Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- BURMAN, R. D. et al. Water Requiriments. IN: JENSEN, M. E. ed. **Design and operation of farm irrigation systems** . St. Joseph: ASAE, 1983. Cap.6, p. 189-232.
- CAMARGO, A. P. de.; CAMARGO, M. B. P. de. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial**. *Bragantia*, Campinas, 59 (2), 125-137, 2000.
- CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida**. 2002. 120p. (Tese de Doutorado em Agronomia) Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A.. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica – RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2., p. 187-195, 2006.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Reference evapotranspiration based on class A pan evaporation. **Scientia Agrícola**, v.59, n.3, p.417-420, jul./set. 2002.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. **Estimativa diária da radiação solar incidente com base no número de horas de brilho solar para a região de Bento Gonçalves, RS**. Embrapa Uva e Vinho, 2006. 12 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 12).

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS (DNOCS). **Perímetro Irrigado Jaguaribe-Apodi**. 2008. Disponível em:  
<<http://apoena.dnocs.gov.br/~apoena/php/projetos/projetos.php>>. Acesso em: 19 jun. 2008.

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).

FARIA, R. T. de; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.10, n.1, p.237–242, 2006.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ.** 2006. 160p. (Dissertação de Mestrado em Ciência em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

FONTENOT, R. L. **An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana.** 2004. 83p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Ciências Naturais) - Louisiana State University & Colégio Agrícola e Mecânica, Louisiana, 2004.

HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R.G. History and evaluation of the Hargreaves Evapotranspiration equation. **Journal Irrigation Drainage.** Eng., 53-63. 2003.

HENRIQUE, F. A. N. **Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande-PB.** 2006. 107p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

HOPPKINS, W. G. **A scale of magnitudes for effect statistics.** 2002. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>>. Acesso em: 19 jun. 2008.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration and irrigation water requirements** New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 329p. (ASCE. Manual and Reports on Engineering Practices, 70).

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, 89: 15-41, 1963.

LIMA, E. P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperatura máxima e mínima de Minas Gerais.** 2005. 85 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2005.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature data alone. **Agric. Meteorol.**, 18:409-424, 1977.

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

MAIA, F. Z. 2008. **Regressão, Correlação e Causalidade.** Disponível em: <[http://sol.ccsa.ufrr.br/ccsa/areas/cont/ppgcc/ftp\\_disciplinas\\_mq/conceitos%20basicos%20de%20regress%E3o%20e%20causalidade.doc](http://sol.ccsa.ufrr.br/ccsa/areas/cont/ppgcc/ftp_disciplinas_mq/conceitos%20basicos%20de%20regress%E3o%20e%20causalidade.doc)>. Acesso em: 16 dez. 2008.

MEDEIROS, S. L. P. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 105-109, 1998.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da Equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. 120p. (Tese de Doutorado em Agronomia), Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo.

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

MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology** 100 (2000) p.231–241.

OLIVEIRA, C. W.; SOUZA, F.; YODER, R. E. et al. **Estimating reference evapotranspiration in northeastern Brazil**. Orlando: ASAE, 1998. 14p. (ASAE. Paper, 982184).

OLIVEIRA, A. D. de.; VOLPE, C. A. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, utilizando dados de estações meteorológicas convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 253-260, 2003.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**. Proc. R. Soc. London, A193:120-146, 1948.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agrícola**, v.59, n.2, p.211-216, abr/jun. 2002.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. S. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

ROBINSON, J. M.; HUBBARD, K. G. Soil water assessment model for several crops in the High Plains. **Agronomy Journal**, Madison, v.82,p.1141-1148, 1990.

ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; AZEVEDO, H. M. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.263-268, 2003.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal**. 2001. 37 p. Mestrado (Física do Ambiente Agrícola). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2001.

SANTIAGO, A. V.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 57-66, 2002

SANTOS, F. S. S.; FERREIRA, T. T. S.; SILVA, M. N. C.; OLIVEIRA, K. M. L.; SILVEIRA, E. M. C.; MOURA, A. L. A. Avaliação do desempenho de diferentes metodologias para a determinação da evapotranspiração de referência no distrito de irrigação Jaguaribe-Apodi, Ceará. In: II Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação & I Simpósio Brasileiro sobre o uso Múltiplo da Água, 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2008. p. 768-773.

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

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. 1998. 97 p. (Tese de Doutorado em Irrigação e Drenagem), Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo.

SENTELHAS, P. C.; FOLEGATTI, M. V. Class A pan coefficients ( $K_p$ ) to estimate daily reference evapotranspiration ( $ET_o$ ). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SILVA, F. C. da.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. **Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga**. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-58, 1999.

SILVA, L. D. B. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. 2003. 104 p. (Tese de Doutorado em Irrigação e Drenagem), Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo.

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

SMITH, M.; ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: CAMP, C. R.; SADLER, E. J.; YODER, R. E. (Ed.) **Evapotranspiration and irrigation scheduling.** St. Joseph: ASAE, 1996. p.116- 123.

TANNER, C. B. Measurement of evapotranspiration. In: HAGAN, R. M.; HAISE, H. R.; EDMINSTER, T. W., eds, **Irrigation of agricultural lands.** Madison, 1967. p. 320-29.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. **Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration,** 1943-1944. Washington, D. C.: Transactions of the American Geophysical Union, 1944. p. 686-693.

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

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. **Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.3, p.713-721, set./dez. 2005.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. et al. Statistics for the evaluation and comparision of models. **Journal of Geophysical Research,** Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.