

PEDRO DE ALBUQUERQUE FERRAZ



**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0)
PARA REGIÃO DE RIO BRANCO - ACRE**

RIO BRANCO

2008

PEDRO DE ALBUQUERQUE FERRAZ

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)
PARA REGIÃO DE RIO BRANCO - ACRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Biológicas e da Natureza da Universidade Federal do Acre, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Washington de Sousa.

RIO BRANCO

2008

© FERRAZ, P. A. 2008.

Ficha Catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal do Acre

F331e FERRAZ, Pedro de Albuquerque. *Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Região de Rio Branco - Acre*. 2008. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco-Acre, 2008.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Washington de Sousa.

1. Evapotranspiração de referência, 2. Penman-Monteith, 3. Métodos, 4. Rio Branco-Acre, I Título

CDU 536.423.1:504.03 (811.2)

PEDRO DE ALBUQUERQUE FERRAZ

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)
PARA REGIÃO DE RIO BRANCO - ACRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Biológicas e da Natureza da Universidade Federal do Acre, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Aprovada em 26 de agosto de 2008.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Washington de Sousa
Universidade Federal do Acre - UFAC
Orientador

Prof. Ph.D. Irving Foster Brown
Universidade Federal do Acre - UFAC
1º Membro

Prof. Dr. Antônio Gilson Gomes Mesquita
Universidade Federal do Acre - UFAC
2º Membro

RIO BRANCO

2008

A Deus pela saúde e sabedoria.

A minha família pelo apoio para vencer mais este desafio.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o alcance desta vitória.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, Fonte inesgotável de inspiração e sabedoria.

Aos meus pais, José Nazareth Ferraz e Edna Conceição de Albuquerque Ferraz (in memória), responsáveis por minha existência e educação.

Ao professor Dr. Jorge Washington de Sousa que, como orientador, contribuiu definitivamente com precisão sempre que necessário no sentido de melhoria da qualidade final deste trabalho.

A Universidade Federal do Acre - UFAC, especialmente ao Curso de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade de dar continuidade a minha formação acadêmica.

Aos observadores meteorológicos Teodoro Solon Quitela (Aposentado - Ministério da Agricultura (MA), Antônio Carlos Chaim (MA), José Carlos Abmorad (MA) e Genésio Faustino de Souza (UFAC), pela dedicação na cessão dos elementos meteorológicos utilizados nesse trabalho, os quais foram obtidos na Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada na área experimental do Centro de Ciências Biológicas e da Natureza – CCBN - UFAC.

Aos Professores do curso de Pós-Graduação em Agronomia em especial ao Prof. Dr. Sebastião Elviro de Araújo Neto, Coordenador do Mestrado (2006-2007) e com muita gratidão ao Prof. Dr. Jorge Ferreira Kusdra, e a todos pelas informações recebidas e conhecimentos adquiridos em suas respectivas disciplinas.

Aos funcionários da UFAC em geral, especialmente aos companheiros do Parque Zoobotânico - PZ em todos os setores, principalmente ao Plínio Carlos Mitozo, Francisco Felix do Amaral (Geraldinho), Irio Rivero, Edílson Sá, Francisco Lima da Silva (Chiquinho), Nilson Alves Brilhante, João Soares, José de Souza Bandeira, Raimundo Nonato Pereira (porco), Jose Cláudio A. Braga (Bé), Manoel de Jesus Cardoso (Timbal), e com muita gratidão a Dra. Marilene de Campos Almeida (Diretora do PZ e ao MSc. João Lopes Firmino (Coordenador do LSF-PZ) pela paciência e compreensão na minha ausência durante o período desta jornada.

Aos Companheiros de turma Roberval Mendes, Francisco Chagas (Charles), Felicia Leite, Ana Suzete, Luana Almeida, Lya Beiruth, Wally Oliveira, Robson Galvão, Rodrigo Guedes e Marcos Aurélio, meus agradecimentos pelo companheirismo e convivência, durante todo o curso, valeu.

Aos componentes da banca examinadora presidente Dr. Jorge Washington de Sousa e aos membros Dr. Irving Foster Brown, Dr. Antonio Gilson Gomes Mesquita, Dr. Sebastião Elviro de Araújo Neto e Dra. Regina Lúcia Félix Ferreira, pela responsabilidade na avaliação e aprovação do trabalho final.

Enfim, a todos que não foram citados, mas que de alguma maneira direta ou indiretamente, contribuíram para que fosse possíveis a realização do trabalho de pesquisa, a elaboração dessa dissertação e a conclusão de mais uma etapa de minha formação acadêmica.

“Deus nos guia sempre, dando-nos a orientação correta de nossa vida”
(Carlos Torres Pastorino, 1995).

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no
entanto, é a coisa mais preciosa que temos.
(Albert Einstein, 1879 – 1955)

RESUMO

O presente trabalho objetivou comparar valores de evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Rio Branco-Acre, obtidos por nove métodos de estimativa, tendo o modelo Penman-Monteith-FAO como padrão, baseando-se em dados climatológicos obtidos em estação meteorológica convencional, referentes ao período de 1981 a 2006. A comparação entre os valores estimados da ET_o, se baseou no erro padrão da estimativa (SEE) e no coeficiente de determinação (r^2) das equações de regressão ajustadas, utilizando-se o erro padrão de estimativa ajustado (ASEE), conforme descrito por Jensen et al. (1990), citados por Oliveira et al. (2005). Posteriormente foi realizada a calibração dos modelos em relação ao padrão (ET_oPM), para a melhoria do desempenho dos mesmos. A classificação foi realizada por ordem crescente dos valores do erro padrão da estimativa ponderado (SEE_{Pond}) referentes aos modelos calibrados. Foi ainda utilizado um coeficiente de confiança ou desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que corresponde à multiplicação do coeficiente de correlação “r” pelo coeficiente de exatidão “d” proposto por Willmont et al. (1985) e descrito por Camargo e Sentelhas (1997). Os resultados indicaram que os modelos de Penman e Makkink, atendem satisfatoriamente à estimativa da ET_o na região de Rio Branco, AC, em comparação ao modelo padrão Penman-Monteith. Os métodos Penman-ET_oP, Jensen-Haise-ET_oJH, Priestley e Taylor modificado-ET_oPTm, Hargreaves-ET_oHG e Tanner e Pelton-ET_oTP superestimaram a ET_o, enquanto os modelos Makkink-ET_oMAKK, Penman Simplificado-ET_oPs e Radiação-ET_oRA, subestimaram a ET_o em relação ao modelo de Penman-Monteith para a localidade em estudo. A calibração regional mostrou-se relevante para o desempenho das equações empíricas.

PALAVRAS CHAVE: Evapotranspiração de referência; Penman-Monteith; Métodos; Rio Branco, Acre.

ABSTRACT

This study aimed to compare the reference values of evapotranspiração (ET_o) for the region of Rio Branco-Acre, obtained by nine methods to estimate, since the model Penman-Monteith-FAO as standard, based on climatic data obtained by meteorological station conventional, for the period from 1981 to 2006. The comparison between the estimated values of ET_o, was based on the standard error of estimate (ESS) and the coefficient of determination (r^2) of the regression equations adjusted, using the standard error of estimate adjusted (ASEE), as described by Jensen et al. (1990), cited by Oliveira et al. (2005). It was subsequently held the calibration of models in relation to the default (ET_oPM), to improve the performance of them. The classification was done in ascending order of the values of the standard error of the estimated weighted (SEEPond) for the model calibrated. It was also used a coefficient of confidence or performance "c" proposed by Camargo and Sentelhas (1997), which is multiplication of the correlation coefficient "r" by the coefficient of accuracy "d" proposed by Willmont et al. (1985) and described by Camargo and Sentelhas (1997). The results indicated that the models of Penman and Makkink, satisfactorily meet the estimate of ET_o in the region of Rio Branco, AC, compared to the standard Penman-Monteith. The models Penman-ET_oP, Jensen-Haise-ET_oJH, Priestley and Taylor modified-ET_oPTm, Hargreaves-ET_oHG and Tanner and Pelton-ET_oTP overestimated the ET_o, while the models Makkink-ET_oMAKK, Penman Simplified-ET_oPs and radiation-ET_oRA, underestimated the ET_o in relation to Penman-Monteith model for the town under study. The calibration regional proved to be relevant to the performance of empirical equations.

KEY WORDS: Evapotranspiration of reference; Penman-Monteith; Methods; Rio Branco, Acre.

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Critérios de interpretação do coeficiente “c” proposto por Camargo e Sentelhas.	50
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1– Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para a região de Rio Branco-Acre, com a variação da precipitação pluviométrica (P), evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), UFAC 2008.....	52
GRÁFICO 2 - Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para a região de Rio Branco-Acre, com o excedente e a deficiência hídrica mensal, UFAC, 2008.....	52
GRÁFICO 3 - Evapotranspiração de referência-ETo mensal (mm dia^{-1}) estimada a partir de dados climatológicos diários, para região de Rio Branco – Acre, UFAC 2008.....	55
GRÁFICO 4 - Evapotranspiração de referência (ETo) mensal (mm dia^{-1}) estimada a partir de dados climatológicos médios quiquidiais, para região de Rio Branco – Acre, UFAC 2008.....	64

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Correlações entre os valores da ETo estimados com dados climatológicos diários pelos modelos Makkink-EToMAKK (a), Jensen-Haise-EToJH (b), Penman-EToP (c), Priestley e Taylor modificado-EToPTm (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia^{-1} , para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008..... 59
- FIGURA 2 - Correlações entre os valores da ETo estimados com dados climatológicos diários pelos modelos Hargreaves-EToHG (a), Penman Simplificado-EToPs (b), Tanner e Pelton-EToTP (c), Radiação-EToRA (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia^{-1} , para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008..... 60
- FIGURA 3 - Correlações entre os valores quinqüidias da ETo estimados pelos modelos Makkink-EToMAKK (a), Penman-EToP (b), Jensen-Haise-EToJH (c), Priestley e Taylor modificado-EToPTm (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia^{-1} , para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008..... 68
- FIGURA 4 - Correlações entre os valores quinqüidias da ETo estimados pelos modelos Hargreaves-EToHG (a), Penman Simplificado-EToPs (b), Tanner e Pelton-EToTP (c), Radiação-EToRA (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia^{-1} , para a região de Rio Branco, AC..... 69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Evapotranspiração de referência mensal (mm dia^{-1}), estimada com dados climatológicos diários, pelos métodos de EToPM, EToMAKK, EToP, EToJH, EToPT _m , EToHG, EToTP, EToPS e EToRA, para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008.....	53
TABELA 2 -	Evapotranspiração de referência estimada com dados climatológicos diários, percentagem relativa em relação ao modelo padrão (EToPM), coeficientes das equações de regressão ajustadas (a e b), coeficiente de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (SEE), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008.....	57
TABELA 3 -	Coeficiente de calibração local (b_c), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), referentes aos modelos de estimativa da ETo para a região de Rio Branco - AC, a partir de dados climatológicos diários, UFAC 2008.....	61
TABELA 4 -	Coeficientes de correlação (r), exatidão (d), desempenho (c), variação (cv) e classificação dos métodos de estimativa da ETo com dados climatológicos diários, segundo os critérios de Camargo & Sentelhas (1997), para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008.....	62
TABELA 5 -	Evapotranspiração de referência mensal (mm dia^{-1}), estimada com dados climatológicos médios quinquidiais, pelos métodos de EToPM, EToMAKK, EToP, EToJH, EToPT _m , EToHG, EToTP, EToPS e EToRA, para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008.....	63
TABELA 6 -	Evapotranspiração de referência estimada com dados climatológicos quinquidiais, percentagem relativa em relação ao modelo padrão (EToPM), coeficientes das equações de regressão ajustadas (a e b), coeficiente de determinação (R^2), erro-padrão de estimativa (SEE), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), para a região de Rio Branco – AC, UFAC 2008.....	66
TABELA 7 -	Coeficiente de calibração local (b_c), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), referentes aos modelos de estimativa da ETo para a região de Rio Branco-AC, a partir de dados climatológicos médios quinquidiais, UFAC 2008.....	70
TABELA 8 -	Coeficientes de correlação (r), exatidão (d), desempenho (c), variação (cv) e classificação dos métodos de estimativa da ETo com dados climatológicos médios quinquidiais, segundo os critérios de Camargo & Sentelhas (1997), para a região de Rio Branco – AC, UFAC.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS

ET	- Evapotranspiração
SEE	- Erro Padrão da estimativa
r^2	- Coeficiente de determinação das equações de regressão ajustada
ASEE	- Erro padrão da estimativa ajustado
SEE_{pond}	- Erro Padrão da estimativa ponderado
ET _o	- Evapotranspiração de referência
ET _o PM	- Evapotranspiração de referência modelo Penman-Monteith-FAO
ET _o P	- Evapotranspiração de referência método PENMAN
ET _o MAKK	- Evapotranspiração de referência método MAKKINK
ET _o JH	- Evapotranspiração de referência método JENSEN-HAISE
ET _o PTm	- Evapotranspiração de referência método PRIESTLEY & TAYLOR modificado
ET _o HG	- Evapotranspiração de referência método HARGREAVES
ET _o TP	- Evapotranspiração de referência método TANNER & PELTON
ET _o Ps	- Evapotranspiração de referência método PENMAN simplificado
ET _o RA	- Evapotranspiração de referência método RADIAÇÃO
ETR	- Evapotranspiração de real
ETP	- Evapotranspiração potencial
ETC	Evapotranspiração da cultura
ET _m	- Evapotranspiração média
IAF	- Índice de área foliar
K _c	- Coeficiente de cultura
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
T _{max}	- Temperatura Máxima
T _{min}	- Temperatura Mínima
T _{med}	- Temperatura Média
ICID	- Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem
TCA	- Tanque Classe A
EMC	- Estação Meteorológica Convencional
EMA	- Estação Meteorológica Automática
CAD	- Capacidade de armazenamento disponível
Y _{pi}	- Estimativa da ET _o pelo modelo padrão

Y_{mi}	- Estimativa da ETo obtida para cada um dos métodos avaliados
$Y_{reg\ i}$	- Estimativa da ETo obtida pela regressão ajustada entre os métodos e o modelo padrão EToPM
n	- Número de observações
O_i	- Valores de ETo Obtidos pelo modelo EToPM
P_i	- Valores de ETo estimados pelos demais métodos em estudo
O	- Média dos valores estimados de ETo pelo modelo EToPM
E_a	- Evaporação do ar

LISTA DE SIGLAS

Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
AC	- Estado do Acre
UFAC	- Universidade Federal do Acre
PZ	- Parque Zoobotânico
LSF	- Laboratório de Sementes Florestais
CCBN	- Centro de Ciências Biológica e da Natureza
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
FAO	- Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
USA	- Estados Unidos da América (United States of America)

LISTA DE SÍMBOLOS

c_v	- Coeficiente de variação
α	- Albedo da cultura, considerado como 0,23
α	- Constante da equação de Priestley-Taylor (1972)
λ	- Calor latente requerido para evaporar uma unidade de água
H	- Calor sensível da camada limite
G	- Fluxo de calor sensível do solo
R_n	- Densidade de fluxo de radiação líquida
°C	- Grau Celsius
%	- Percentagem
Σ	- Somatória
λ	- Calor latente de evaporação
γ	Constante psicrométrica
λ_{evap}	- Calor latente de vaporização
γ^*	Constante psicrométrica modificada (kPa °C ⁻¹)
Δ	- Inclinação da curva de pressão de saturação de vapor
e_a	- Pressão parcial de vapor (kPa)
e_s	- Tensão de saturação de vapor de água (kPa)
Q_s	- Balanço de radiação de ondas curtas
Q_L	- Balanço de radiação de ondas longas
Q_o	- Radiação extraterrestre (MJ m ⁻² d ⁻¹)
R_g	- Radiação solar global (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Φ	- Latitude do local em graus
n	- Brilho solar medido em horas
N	- Duração astronômica do dia em horas
V_2	- Velocidade do vento a 2 m de altura
PA	- Pressão atmosférica
UR	- Umidade relativa do ar (%)
MJ	- Mega jaully
σ	- Constante de Stefan-Boltzmann
W	- Fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo úmido
C_p	- Calor específico do ar

ρ	- Massa específica do ar
Δ_e	- Déficit de pressão de vapor
r_a	- Resistência aerodinâmica (s. m ⁻¹)
P_i	- Evaporação de Piche (mm dia ⁻¹)
b_c	- Coeficiente de calibração local
t_{ar}	- Temperatura do ar
V_n	- Velocidade do vento ao nível de 2 m
Z_n	- Altura para qual deseja-se converter a velocidade do vento
m	- Metro
mm	- Milímetros
Km	- Quilômetro
h	- Horas
λ_{ET}	- Densidade de fluxo de calor latente
kPa	- Quilo Pascal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	23
2.2 FATORES QUE AFETAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	25
2.2.1 Radiação Solar	26
2.2.2 Velocidade do vento	28
2.2.3 Temperatura do ar	29
2.2.4 Umidade do ar	31
2.3 Métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência	32
2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET _o)	35
2.3.1 Penman-Monteith-ET _o PM (ALLEN et al., 1998)	35
2.3.2 Jensen-Haise-ET _o JH (JENSEN e HAISE 1963, citado por SEDYAMA, 1996)....	37
2.3.3 Hargreaves-ET _o HG (HARGREAVES 1974, citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997)	37
2.3.4 Makkink-ET _o MAKK (MAKKINK 1957, citado por PEREIRA et al., 1997).....	37
2.3.5 Penman-ET _o P (PENMAN 1948, citado por OMETTO, 1981)	38
2.3.6 Penman Simplificado-ET _o P _s (PENMAN 1948, citado por OMETTO, 1981).	39
2.3.7 Priestley e Taylor modificado-ET _o PT _m (PRIESTLEY E TAYLOR, 1972 citado por MEDEIROS, 1998).....	39
2.3.8 Tanner e Pelton-ET _o TP (TANNER e PELTON, 1960, citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997)	40
2.3.9 Radiação-ET _o RA (DOORENBOS e PRUITT, 1972)	40
2.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ET _o	40
2.5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA	43
2.6 CLIMATOLOGIA DA LOCALIDADE DE RIO BRANCO, AC.....	45
3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	48

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 CLIMATOLOGIA E BALANÇO HÍDRICO DA REGIÃO DE RIO BRANCO, ACRE	51
4.1.1 Caracterização climática da região do estudo	51
4.1.2 Balanço hídrico do solo na região em estudo.....	51
4.2 AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA ET_0 COM DADOS CLIMATOLÓGICOS DIÁRIOS	53
4.3 AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA ET_0 COM DADOS CLIMATOLÓGICOS QUINQUÍDIAS.....	62
5 CONCLUSÃO	72
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração constitui um dos componentes do ciclo hidrológico, o qual, juntamente com os demais controles climáticos: circulação geral da atmosfera, natureza da cobertura da superfície e condições topográficas predominantes, são os fatores determinantes do clima da Amazônia.

Segundo Ometto (1981), evapotranspiração consiste na perda conjunta de água do solo pela evaporação e da planta por transpiração.

A evapotranspiração depende de vários fatores relacionados ao solo, à planta e ao clima e constitui parâmetro agrometeorológico imprescindível na quantificação das necessidades hídricas das culturas e nos estudos sobre o aproveitamento dos recursos hídricos, tornando-se necessária a análise de métodos e modelos que melhor estimem essa variável. O conhecimento da demanda hídrica das culturas é essencial para a compreensão das relações no sistema solo-água-planta-atmosfera, para o dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação e o aperfeiçoamento de zoneamentos agroclimáticos (SEDYAMA, 1996).

A obtenção da evapotranspiração da cultura (ET_c) torna-se importante, na medida em que este parâmetro possibilita a determinação da lâmina de água a ser resposta ao solo, de forma a manter a produtividade da cultura em níveis que apresentem viabilidade econômica. Sendo a ET_c função da evapotranspiração de referência (ET_o), a determinação desta passa a ser fundamental no planejamento, nos projetos e no manejo de irrigação.

Dentre os diversos métodos de determinação da evapotranspiração, o método direto do lisímetro de pesagem é aquele que apresenta a maior precisão. No entanto, devido aos seus elevados custos de aquisição e manutenção, esse equipamento tem o seu uso restrito às instituições de ensino e pesquisa, aumentando o interesse para a obtenção de estimativas da evapotranspiração por meio de modelos matemáticos, devido à praticidade e à facilidade oferecida por alguns desses modelos.

Resultados de pesquisas em várias localidades, indicaram modelos indiretos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), com diferentes concepções e variáveis envolvidas. Todavia, de acordo com Berlato e Molion (1981), deve-se levar em consideração dois aspectos para a escolha de um determinado

método de estimativa da evapotranspiração: praticidade e acurácia. Esses mesmos autores relataram que os métodos teóricos e/ou métodos micrometeorológicos, apesar de serem baseados em princípios físicos e de possuírem alta precisão, apresentam limitações, principalmente quanto à instrumentação, o que impede em grande parte a sua utilização. Nesse sentido, as estimativas da evapotranspiração por meio de modelos, constituíram importante linha de pesquisa, pois possibilita a indicação da suplementação hídrica com maior precisão, visando minimizar os efeitos adversos da aplicação inadequada da água.

As características edafoclimáticas da região de Rio Branco, AC possibilitam o desenvolvimento satisfatório das culturas agrícolas durante a estação chuvosa que se estende de outubro a abril. No entanto, são observadas deficiências hídricas no período de junho a setembro, o que sugere a necessidade de implementação das técnicas da irrigação na região de Rio Branco.

Tendo em vista à inexistência de resultados locais sobre pesquisas nessa área do conhecimento, certamente o presente trabalho poderá contribuir para incrementar a agricultura irrigada na região, uma vez que o mesmo indicou métodos adequados para estimar a evapotranspiração de referência local.

Para a estimativa da evapotranspiração de referência, utilizam-se várias equações e várias medidas, com vistas à obtenção dos parâmetros necessários para o uso das metodologias disponíveis. O método de Penman-Monteith é considerado como o que possui melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima, sendo por isso recomendado pela FAO como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência e calibração de modelos empíricos (ALLEN et al., 1998).

Considerando-se a indisponibilidade de dados meteorológicos na Amazônia Sul-Occidental para a utilização do método de Penman-Monteith, foram testadas outras equações mais simples, algumas das quais, apresentaram elevadas correlações com o método padrão. Essas equações foram recomendadas para a região de Rio Branco principalmente para o período seco, ou seja, nos meses em que observa-se deficiência hídrica no solo.

Esta pesquisa objetivou comparar valores diários e quinqüidiais de evapotranspiração de referência para a região de Rio Branco, obtida pelos métodos de estimativa: Makkink-EToMAKK (MAKKINK (1957) citado por PEREIRA et al.,

1997), Penman-EToP (PENMAN (1948) citado por OMETTO, 1981), Penman simplificado-EToPs (PENMAN (1948) citado por OMETTO, 1981), Jensen-Haise-EToJH (JENSEN e HAISE (1963) citado por SEDYAMA, 1996), Priestley e Taylor modificado-EToPTm (PRIESTLEY e TAYLOR (1972) citado por MEDEIROS, 1998), Hargreaves-EToHG (HARGREAVES, 1974, citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997), Tanner e Pelton-EToTP (TANNER e PELTON (1960) citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997), e Radiação-EToRA (DOORENBOS e PRUITT, 1972), com os valores da ETo obtidos pelo modelo padrão de Penman-Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998).

Baseando-se em dados climatológicos da região em estudo, obtidos em estação meteorológica convencional, referente ao período de 26anos, conforme a calibrados com base nas escalas diárias e quinqüidial, tendo como referência o modelo padrão de Penman-Monteith, foi possível melhorar o desempenho dos mesmos para a região em estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Na agricultura, informações quantitativas da evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem (HENRIQUE e DANTAS, 2006).

O conceito de evapotranspiração (ET) foi introduzido inicialmente por Thornthwaite¹ et al. (1944), citado por Camargo, (1962), nos Estados Unidos, para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e de transpiração, numa superfície vegetada. Alguns anos mais tarde, Thornthwaite (1948) citado por (SEDYAMA, 1996), definiu como evapotranspiração potencial (ETp) a evapotranspiração que ocorre nas seguintes condições de contorno: extensa superfície vegetada cobrindo totalmente o solo, em crescimento ativo e sem restrição hídrica, de modo que somente o balanço vertical de energia interfira no processo.

Quase que simultaneamente, Penman² (1948) citado por (SEDYAMA, 1996), na Inglaterra, também definiu a ETp, ressaltando que a vegetação deveria ser baixa e com altura uniforme. Posteriormente, Penman (1956) citado por Medeiros, (1996) conceituou a evapotranspiração potencial como a quantidade de água utilizada na unidade de tempo por uma cultura de porte baixo e verde, cobrindo totalmente a superfície, com altura uniforme e sem deficiência hídrica.

A definição de evapotranspiração de referência (ETo) surgiu apenas na década de 70, visto que as definições originais, não especificavam o tipo de vegetação, o grau e a altura da cobertura vegetal em relação ao solo, as dimensões da superfície e as condições de bordadura. Nesse sentido, Jensen (1973) citado por

¹ THORNTHWAITTE, C.W.; WILM, H.G. Report of the Com-mite on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. **Washington, D.C.: Transactions of the American Geo-physical Union**, 1944. p.686-693.

² PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society of London**. Série A, v. 193, p.120-145, 1948.

(SEDYAMA, 1996), propôs a cultura da alfafa como referência e definiu a ETo, como aquela que se verifica em uma área sem deficiência hídrica, com bordadura mínima de 100 m, cultivada com a referida cultura, e apresentando um porte de 0,30 a 0,50 m de altura.

Doorenbos e Pruitt³, (1977) citados por (SILVA, 2003), definiram a evapotranspiração de referência como sendo a taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície gramada com altura uniforme entre 0,08 e 0,15 m, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem déficit de água. No entanto, para (SMITH, 1991), a evapotranspiração de referência é aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo (Relação entre a radiação solar refletida ou dispersada pela superfície da Terra e o total que nela incide) igual a 0,23 e resistência ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m⁻¹. Estas características, segundo Pereira et al. (1997a), seriam encontradas em um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem deficiência hídrica.

Neste sentido a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação-FAO recomendou a adoção do método de Penman-Monteith como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998) até mesmo para locais com deficiência de dados meteorológicos necessários ao seu uso, fornecendo procedimentos e parametrizações adequadas em diversas escalas de tempo (diária, decenal, e mensal).

Allen et al. (1998) redefiniram no Boletim FAO 56, a evapotranspiração de referência como sendo aquela de um gramado hipotético, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor d'água de 70 s m⁻¹. De acordo com Pereira et al. (1997a), um gramado nessas condições possui índice de área foliar (IAF) ao redor de 3 e assemelha-se a uma superfície verde sombreando totalmente o solo, bem suprido de umidade, e em crescimento ativo.

No que se refere à cultura de referência, predomina no Brasil o uso da grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), originária das Américas do Sul e Central. Essa gramínea apresenta boa adaptação a quase todo tipo de solo, crescendo vigorosamente naqueles com boa fertilidade e umidade, mas com aspectos xeromórficos, nos solos pobres e sob condições de seca (SANTIAGO, 2001).

³ DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

De acordo com Alcântara e Bufarah (1982), citado por (MEDEIROS, 2002), a grama batatais é considerada planta colonizadora, pois vegeta desde o nível do mar até altitudes em torno de 2.500 m, apresentando razoável resistência ao pisoteio, ao fogo e a geada, o que viabiliza seu uso em posto meteorológico, sob diversos tipos de clima. Pereira et al. (1997a) relatam que a grama batatais foi tomada como padrão, em razão da sua utilização nos postos meteorológicos.

Havendo necessidade de comparação das estimativas de ETo obtidas com grama e com alfafa utiliza-se uma relação entre elas. Allen et al. (1989) citado por (MEDEIROS, 2002) apresentam uma tabela, relacionando a ETo da alfafa e da grama para várias condições de latitude e altitude, que variam de 0° em Yangambi, Zaire, a 38° S em Aspendale, Austrália e de -30 m de altitude em Brawley, Califórnia a 2774 m em South Park, Colorado, compreendendo locais áridos e úmidos. Os autores obtiveram, em média, ET alfafa/ET grama= 1,32 (mm dia⁻¹). Essa relação foi mais baixa para climas úmidos.

Por outro lado Medeiros e Folegatti (2000) numa análise de dados de Pentecoste, Ceará, encontraram uma relação entre evapotranspiração calculada a partir do modelo de Penman-Monteith, entre grama e alfafa de 0,9395 (mm dia⁻¹) e alfafa e grama de 1,064 (mm dia⁻¹). Esses resultados estão próximos dos encontrados por Allen et al. (1989) citados por Medeiros (2002), cujos valores variam de 1,15 a 1,25 (mm dia⁻¹).

2.2 FATORES QUE AFETAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO

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

e a arquitetura foliar, estágio de desenvolvimento, resistência do dossel e aqueles que geralmente estão associados ao valor do coeficiente de cultura (K_c).

Do mesmo modo, Medeiros (2002), relata que a evapotranspiração depende de fatores climáticos como: radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, chuva e pressão de vapor, são as principais variáveis.

2.2.1 Radiação Solar

Denomina-se fluxo de radiação a quantidade de energia radiantes recebida, transmitidas ou emitidas por unidade de tempo. Quando este fluxo de radiação é expresso por unidade de área costuma-se chamar de densidade de fluxo radiante. A Organização Meteorológica Mundial-OMM recomenda o uso dos termos emitância, para designar o fluxo de radiação emitido e irradiância, para representar o fluxo de radiação incidente Varejão-Silva (2000). A irradiância em um determinado ponto da superfície é determinada pelo ângulo formado entre os raios solares e a normal da superfície em questão, que varia em função da hora do dia, das diferentes latitudes e estações do ano (ALLEN et al., 1998).

Segundo Tubelis e Nascimento (1992), ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar é afetada por processos seletivos de reflexão, difusão e absorção. A radiação solar direta, não interage com a atmosfera e incide diretamente na superfície, enquanto a radiação difusa atinge a mesma superfície após sofrer espalhamento na atmosfera. Estes dois fluxos de energia, que chegam simultaneamente, representam o total de radiação solar que atinge a superfície terrestre, denominada radiação solar global. No entanto, Borges (2004) ressalta que parte da radiação global é refletida pela superfície da terra, o que depende das características da cobertura dessa superfície, sendo 5% para o caso da água e em torno de 25% para maioria dos cultivos.

A radiação solar que incide sobre a superfície terrestre é absorvida e armazenada pela mesma, posteriormente devolvida para a atmosfera, aquecendo-a. Essa transferência de energia é uma das mais importantes interações entre a biosfera e a atmosfera. A quantidade de energia disponível na superfície da Terra, resultado da diferença entre os ganhos (fluxos descendentes) e as perdas (fluxos

ascendentes) radiativas, denomina-se saldo de radiação Ometto (2001). Ao longo do dia, nas horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, pois os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores às frações refletidas e emitidas, por outro lado, durante a noite os valores do saldo de radiação tendem a serem negativos, pois o fluxo incidente passa a ser somente atmosférico e, a energia emitida pela superfície tende a ser superior a este, resultando em um saldo de radiação negativo (PEZZOPANE et al., 1995).

A quantificação da radiação solar que incide em um ponto da superfície terrestre é de grande importância para as diversas atividades humanas, principalmente aquelas que tratam do aproveitamento dos recursos naturais, uma vez que a radiação solar é a principal fonte de energia disponível para os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema terra-atmosfera, além de interferir em outros elementos meteorológicos como a evaporação, evapotranspiração, temperatura e umidade relativa, dentre outros (TEIXEIRA et al., 2004).

Segundo Blad e Baker (1972) citado por Sousa (2002), sobre a magnitude do saldo de radiação, interferem diversos fatores relacionados com os componentes de ondas curtas e ondas longas, destacando-se a latitude, altitude, época do ano, cobertura de nuvens, composição espectral da radiação incidente, propriedades espectrais da cultura, grau de cobertura do solo pela cultura, disponibilidade hídrica no solo e temperatura da superfície e da atmosfera.

Para Villa Nova et al. (1976), o saldo de radiação é o principal elemento meteorológico que influencia a evapotranspiração. De acordo com Allen et al. (1994), a evapotranspiração é um processo governado por trocas de energia de uma superfície vegetada e é limitado pela quantidade de energia disponível. Assim, é possível prever a taxa de evapotranspiração através do balanço de fluxos de energia, conforme a equação: $\lambda ET = R_n - H - G$, em que: λET é a densidade de fluxo de calor latente; H é o calor sensível da camada limite; G é o fluxo calor sensível do solo; R_n é a densidade de fluxo de radiação líquida e λ é o calor latente requerido para evaporar uma unidade de água, expresso como umidade de energia por unidade de massa.

Em estudo realizado por Mukammal e Bruce (1968) citado por Silva (2003), concluíram que a importância relativa do saldo de radiação solar, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento na ET_o é da ordem de 80:6:14,

respectivamente, dependendo da localização geográfica e das condições meteorológicas observadas. No entanto, Villa Nova (1987) ressalta que é difícil separar a ação de cada um desses fatores, pois os mesmos agem simultaneamente e se interrelacionam.

Embora a irradiação solar global possa ser medida por piranômetros, existem diversos métodos para sua estimativa, sendo o modelo empírico proposto por Angstron em 1924, o mais utilizado. (HENRIQUE, 2006),

Tubelis e Nascimento (1992) recomendam para quando não se dispuserem das constantes da equação de Angström, que se possam utilizar os valores propostos por Glover e Mcculloch (1958): a sendo igual ao produto de 0,29 pelo cosseno da latitude da localidade em estudo, e b igual a 0,52. Para Allen et al. (1998) os coeficientes a e b da equação de Angström podem variar com as condições atmosféricas e a declinação solar. Todavia, quando não dispusermos de dados confiáveis para aplicação na equação de Angström, recomenda-se utilizar os valores de $a = 0,25$ e $b = 0,50$.

Dantas et al. (2000) determinaram os coeficientes a e b da equação de Angström em Cabaceiras, PB e Belém do Brejo do Cruz-PB, obtendo valores da ordem de (0,28 e 0,38) e (0,22 e 0,46), respectivamente.

De acordo com Allen et al. (1998), a estimativa do saldo de radiação em superfícies planas pode ser realizada a partir da associação das equações de Angström-Prescott, para o balanço de ondas curtas (BOC), e de Brunt, para o balanço de ondas longas (BOL), sendo esse procedimento recomendado pela FAO, quando o objetivo é estimar a ETo pela metodologia descrita por Penman-Monteith a partir de dados de estações meteorológicas convencionais.

2.2.2 Velocidade do vento

Segundo Pereira et al. (1997a), a evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia do meio, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água para as plantas no solo. A demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar relacionado à velocidade do vento e ao déficit de pressão de vapor.

De acordo com Sentelhas (1998), para uma dada região, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e velocidade do vento, e quanto menor for a umidade relativa, maior deverá ser a taxa de evapotranspiração de referência.

Segundo Medeiros (2002), o processo de transferência de vapor depende da velocidade do vento e da turbulência do ar, a qual transfere grandes quantidades de ar sobre a superfície evaporante. O vento remove a camada logo acima da superfície evaporante, criando uma condição favorável ao aparecimento de um gradiente de pressão de vapor, aumentando dessa forma o poder evaporante no local.

De acordo com Pereira et al. (1997a) diferença entre a pressão de vapor saturado e a atual, define a deficiência de pressão de vapor, ou quanto de vapor é necessário para saturar determinado volume de ar, tornando-se assim, um indicador da capacidade evaporativa do ar, sendo que a demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar (E_a) relacionado à velocidade do vento e ao déficit de pressão de vapor, e quanto maior o valor de E_a , maior será a evaporação.

Em áreas que apresentam advecção, (Movimento horizontal de uma massa de ar, que causa alterações em temperatura ou em outras propriedades físicas do ar), a importância relativa da radiação líquida decresce, e em adição a ela, a advecção ou transferência de calor sensível das áreas secas circunvizinhas, contribuirá no processo evapotranspirativo, aumentando desta forma, a importância relativa da velocidade do vento e da umidade relativa do ar na evapotranspiração.

Nesse sentido, Pereira et al. (1997a) relatam que a evapotranspiração, em áreas vegetadas circundadas por áreas secas, é maior na interface dessas áreas e decresce com a distância, à medida que o vento avança na área úmida. Na área úmida, a evapotranspiração diminui na direção dos ventos predominantes até um valor limite inferior, que é resultante somente do balanço vertical de energia.

2.2.3 Temperatura do ar

Para Tubelis e Nascimento (1992), o curso anual da radiação solar é o principal fator que determina a variação da temperatura do ar, portanto, à medida

que aumentamos a latitude, a temperatura média do ar diminui, em decorrência da menor incidência de radiação solar global. Outro fator que altera inversamente o valor da temperatura do ar é a altitude, em média, à medida que se eleva para 100m, ocorre um resfriamento na ordem de 0,65 °C.

Segundo Medeiros (2002), a temperatura do ar tem sua importância na determinação da evapotranspiração de referência, 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 a intensificação do processo de evapotranspiração. Dessa forma a temperatura do ar interfere nas condições ambientais, interagindo com outras variáveis relevantes para o processo de evapotranspiração.

De acordo com Silva (2003), as principais variáveis climáticas a qual proporcionam energia para vaporização e remoção de vapor de água, a partir de superfícies evaporantes são: a radiação solar, a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, o déficit de pressão de vapor e a nebulosidade.

Allen et al. (1998) relatam que na ausência de dados de radiação solar, esse elemento pode ser obtido a partir da diferença de temperaturas. A diferença entre temperatura máxima do ar ($T_{máx}$) e mínima do ar ($T_{mín}$), está relacionada ao grau de cobertura de nuvens no local. Condições de céu claro proporcionam uma $T_{máx}$ elevada e baixa $T_{mín}$, pois um maior percentual de radiação de ondas curtas penetra e um menor percentual radiação de ondas longas, é absorvido pela atmosfera.

Caso contrário, sob condições de nebulosidade, $T_{máx}$ é relativamente menor, porque parte da radiação não alcança a superfície da terra, sendo absorvida e refletida pelas nuvens. Portanto, a diferença entre temperatura máxima e mínima é um bom indicador da fração de radiação no topo da atmosfera, que alcança a superfície da terra. Esse princípio tem sido usado por Hargreaves e Samani para desenvolver estimativas de ETo usando somente dados de temperatura do ar.

A temperatura do ar à superfície da terra apresenta comportamentos cíclico, passando por uma temperatura máxima e uma mínima durante o dia. Pela própria definição, a temperatura média diária do ar deveria ser considerada como a média aritmética de todas as temperaturas observadas a intervalos regulares e curtos. No

entanto, no Brasil, assim como em quase todos os países, esta “média” é estimada através de um parâmetro denominado “temperatura compensada” cujo valor é calculado através de fórmula específica (VAREJÃO SILVA, 2000).

Segundo Allen e Pruitt (1986) citados por Medeiros (2002), a irrigação interfere na evapotranspiração, devido às modificações causadas nas condições microclimáticas locais, resfriando o ar, tornando mais úmido, além de reduzir a turbulência nas massas de ar que avançam de áreas não irrigadas para as áreas irrigadas, provocando a redução do potencial evaporativo das massas de ar e conseqüentemente, a evapotranspiração. Esses autores relatam que estudos anteriores têm demonstrado uma redução na temperatura média do ar de 2 °C a 5 °C em áreas irrigadas, quando comparadas com áreas sem irrigação, com aumento correspondente de umidade relativa e decréscimo no déficit de pressão de vapor.

Silveira (2000) analisou a importância relativa de diferentes variáveis envolvidas no cálculo de evapotranspiração, com base em séries mensais de dados. Os dados foram coletados nas bacias de Fortaleza (bacia metropolitana), Sobral (bacia do Acaraú), Pentecoste (bacia do Curu), Iguatú e Tauá (bacia do Alto Jaguaribe) e Quixeramobim (bacia do Banabuiú). As variáveis testadas foram: precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa e razão de insolação. A componente de maior influência para todas as bacias estudadas, foi o gradiente de pressão de vapor do ar.

2.2.4 Umidade do ar

Na floresta Amazônica, cerca de 50% do vapor de água que se transforma em chuvas é proveniente da evapotranspiração real observada na floresta, exercendo, dessa maneira, papel importante no transporte vertical do vapor de água para a atmosfera e para a precipitação média anual (SALATI, 1985). Essa contribuição local é considerada elevada se comparada com latitudes temperadas, onde a evapotranspiração real estimada, gira em torno de 10% da precipitação local (MOLION E DALLAROSA, 1990)

A disponibilidade de energia oriunda da radiação solar aliada ao fluxo de calor sensível são as principais fontes 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 (MEDEIROS, 2002).

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, observa-se uma retenção de vapor d'água na atmosfera, a qual poderá aumentar e atingir a condição de saturação. Quando a pressão está estabilizada e a temperatura aumenta, maior será a capacidade do ar em reter vapor d'água. A diferença entre a pressão de vapor saturado, e a atual, define o déficit de pressão de vapor, isto é, o quanto de vapor é necessário para saturar determinado volume de ar, tornando-se assim um indicador da capacidade evaporativa do ar (TUBELIS e NASCIMENTO, 1992).

Oliveira et al. (2001), 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, 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, sendo que o método de cálculo de déficit de pressão de vapor, com melhores resultados combinados aos modelos de Penman-Monteith, para as condições de estudo, foi calculado com base na média de pressão de vapor. No entanto, Allen et al. (1998) relatam que a pressão de vapor saturado para determinados períodos, deve ser calculada como a média entre a pressão de vapor à temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e a temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$) diária, no referido período.

2.2.5 Métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

Na ausência de medidas diretas, como as obtidas por meio dos lisímetros, a evapotranspiração pode ser estimada por diversos métodos, os quais, segundo Pereira et al. (1997b) pode-se dividi-los de acordo com os princípios envolvidos em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlações dos turbilhões. Os métodos empíricos, tais como: tanque Classe A, Thornthwaite, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Hargreaves-Samani, Blaney-

Criddle, Jensen-Haise e Linacre são, normalmente, resultantes de correlações entre a evapotranspiração medida em condições padronizadas e os elementos meteorológicos medidos em postos meteorológicos.

Segundo Fernandes (2006), observa-se em âmbito nacional o uso inadequado de equações empíricas, motivado muitas vezes, pela falta de dados para avaliação e calibração local dessas equações, antes de sua utilização.

O método aerodinâmico é um método micrometeorológico (é o ramo da meteorologia que se dedica ao estudo dos escoamentos atmosféricos de escala temporal inferior a uma hora e espacial inferior a um quilometro) com embasamento físico-teórico da dinâmica dos fluídos e transporte turbulento. O método do balanço de energia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície, a citar: Razão de Bowen e Priestley-Taylor. Os métodos combinados retratam os efeitos do balanço de energia com aqueles do poder evaporante: Penman, Slatyer e McIlroy; Penman simplificado e Penman Monteith. O método dos turbilhões baseia-se nos deslocamentos verticais da atmosfera e conseqüente transporte das suas propriedades (PEREIRA et al., 1997a).

Vários autores (AL-GHOBARI, 2000; MARIN, 2000; OLIVEIRA et al., 2001; MEDEIROS, 2002) ressaltam, que apesar da existência de diversos modelos para a estimativa da evapotranspiração de referência, os mesmos são utilizados em condições climáticas e agronômicas muito diferentes daquelas em que inicialmente foram concebidos. Razão pela qual, ser de extrema importância, avaliar o grau de exatidão desses modelos, antes de utilizá-los para nova condição, sendo a equação Penman-Monteith, a referência padrão para esses ajustes.

Nesse sentido, Allen et al. (1998) relatam que desde a década de 30 do século XX, várias formulações empíricas foram criadas para se tentar estimar a evapotranspiração. Porém, por mais rigoroso que seja o procedimento que envolve a determinação da evapotranspiração por um método empírico, este é limitado, necessitando de novas calibrações, quando a fórmula é aplicada em outro local distinta dos utilizados para definição da sua expressão original.

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a FAO, recomendam o método de Penman-Monteith como padrão de estimativas da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos, sendo também indicado para avaliar outros métodos (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998). Diversos trabalhos confirmam que o desempenho desse método é satisfatório, quando

comparado com medidas em lisímetros: Jensen et al. (1990), Allen et al. (1994) em outros países, e Alves Sobrinho et al. (1996), Camargo e Sentelhas (1997), Pereira (1998), Santiago (2001) e Medeiros (2002) no Brasil. Todavia, em algumas situações, o emprego do método de Penman-Monteith é restringido pela indisponibilidade de dados meteorológicos, o que acaba exigindo o uso de métodos mais simples.

As pesquisas sobre o modelo de Penman-Monteith podem ser divididas em três frentes principais. A primeira e mais difundida é o uso da equação Penman-Monteith-FAO 56, para avaliação e calibração de equações empíricas; a segunda forma de uso da equação padrão é a avaliação e melhoria do seu desempenho em diversas condições climáticas; a terceira vertente de estudos sobre essa equação padrão revela o seu crescente uso em modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos, bem como aliada ao sensoriamento remoto (FERNANDES, 2006).

Um estudo da American Society of Civil Engineers, relatado por Jensen et al. (1990) analisou o desempenho de 20 métodos para estimar a evapotranspiração de referência em condições padronizadas, que comparados com dados de 11 lisímetros instalados em locais com condições climáticas diversas, mostrou a superioridade do modelo de Penman-Monteith tanto para regiões áridas como úmidas. Allen et al. (1998) relatam que estudos realizados nos Estados Unidos e na Europa, confirmam a precisão e consistência do método de Penman-Monteith, para climas úmidos e áridos.

Vários métodos de estimativa da evapotranspiração têm sido desenvolvidos e testados, variando desde métodos simples, que requerem apenas dados de temperatura mensal até métodos mais complexos baseados em modelos físicos, tais como os modelos de Penman e suas modificações Oliveira et al., (2005). Resultados obtidos em várias partes do mundo, têm apresentado com elevada frequência, superestimativa da ETo pelo modelo de Penman Smith (1991). Essa tendência também foi constatada no Brasil, nas condições de São Paulo, com superestimativa na ETo da ordem de 20% em escala mensal (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

2.3 MÉTODOS UTILIZADOS NA ESTIMATIVA DA (ET_o) PARA REGIÃO DE ESTUDO.

2.3.1 Penman-Monteith-ET_oPM (ALLEN et al., 1998)

$$ET_{oPM} = (\Delta / \Delta + \gamma^*) (R_n - G) / \lambda_{evap} + (\gamma / \Delta + \gamma^*) 900 / (T_{med} + 273) v_2 (e_s - e_a) \quad (1)$$

Em que:

ET_oPM- evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (mm dia⁻¹);
Δ- inclinação da curva de pressão de saturação de vapor versus temperatura do ar (kPa °C⁻¹), determinado conforme a equação a seguir:

$$\Delta = 4098 e_s / (T_{med} + 273,3)^2 \quad (2)$$

Em que:

T_{med} - temperatura média do ar (°C) obtida pela equação :

$$T_{med} = 2 t_{ar} + 24 TMG + t_{ar} + 12 TMG + t_{max} + t_{min} / 5 \quad (3)$$

e_s- pressão de saturação de vapor (kPa) dada por:

$$e_s = 0,6108 \exp [(17,27 T_{med} / (T_{med} + 273,3))] \quad (4)$$

γ* - constante psicrométrica modificada (kPa °C⁻¹), obtida pela seguinte equação:

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0,33 v_2) \quad (5)$$

Em que:

v₂- velocidade do vento a altura de 2 m. Considerando que a velocidade do vento foi medida a 10 m de altura, e tendo em vista a necessidade de obtenção da velocidade do vento na altura requerida por esta equação (2 m), foi utilizada a seguinte expressão:

$$V_n / V_{10} = (Z_n / Z_{10})^{1/7} \quad (6)$$

Onde V_n é a velocidade do vento ao nível de 2 m, Z_n é altura para qual deseja-se converter a velocidade do vento.

γ- constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), conforme a equação:

$$\gamma = 0,0016286 P / \lambda_{evap} \quad (7)$$

Onde, P é a pressão atmosférica (kPa) e λ_{evap} é o calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹), obtido pela seguinte equação:

$$\lambda_{evap} = 2,501 - (2,36 \cdot 10^{-3}) T_{med} \quad (8)$$

Em que:

T_{med}- temperatura média do ar (°C).

G- fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), tendo sido considerado igual a zero.

Rn- representa o saldo de radiação da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), obtido segundo a equação:

$$Rn=Q_s+Q_L \quad (9)$$

Em que:

Q_s - balanço de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dado pela equação:

$$Q_s=Rg (1-\alpha) \quad (10)$$

Em que:

Rg- radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), estimada pela relação proposta por Glover & Mc Culloch (1958) citada por Pereira et al. (1997a):

$$Rg=Q_0 (0,29 \cos \Phi+0,52 n/N) \quad (11)$$

Em que:

Q_0 - radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

Φ - latitude do local em graus;

n- brilho solar medido (h);

N- duração astronômica do dia (h);

α - albedo da cultura, considerado como 0,23;

Q_L - representa o balanço de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dado pela equação a seguir:

$$Q_L=(0,9 n/N+0,1) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \sigma (T_{\max}^4+T_{\min}^4) 0,5 \quad (12)$$

Em que:

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($4,9 \cdot 10^{-9} \text{MJ m}^{-2} \text{k}^{-4} \text{d}^{-1}$);

T_{\max} - temperatura máxima do ar diária (k);

T_{\min} - temperatura mínima do ar diária (k);

e_a - representa a pressão parcial de vapor (kPa), determinada pela equação a seguir:

$$e_a=e_s UR/100 \quad (13)$$

Em que:

UR- umidade relativa do ar (%);

e_s - tensão de saturação de vapor de água (kPa) de acordo com a equação 4.

2.3.2. Jensen-Haise-EToJH (JENSEN e HAISE, 1963, citado por SEDYAMA, 1996)

$$ETJH=Rg(0,078+0,0252T_{\text{med}}) \quad (14)$$

Em que:

EtoJH- evapotranspiração de referência pelo método de Jensen-Haise (mm dia^{-1});

Rg- radiação global (mm dia^{-1});

T_{med}- temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.3 Hargreaves-EToHG (HARGREAVES, 1974, citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997)

$$\text{EToHG} = 0,0135 R_g (T_{\text{med}} + 17,8) \quad (15)$$

Em que:

EToHG- evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves (mm dia^{-1});

Rg- radiação solar global ($\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

T_{med} é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.4 Makkink-EToMAKK (MAKKINK, 1957, citado por PEREIRA et al., 1997a)

$$\text{EToM} = 0,61 W R_s - 0,12 \quad (16)$$

Em que:

EToM- evapotranspiração de referência pelo método de Makkink (mm dia^{-1});

R_s- radiação solar global disponível ao nível da superfície (mm dia^{-1});

W- fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo úmido (Tu) e do coeficiente psicrométrico (γ), calculado a partir da seguinte equação:

$$W = \Delta / (\Delta + \gamma) \quad (17)$$

Onde:

Δ - inclinação da curva de pressão de saturação de vapor versus temperatura do ar ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), calculado analiticamente pela equação 2.

γ - constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) obtida pela equação 7.

2.3.5 Penman-EToP (PENMAN, 1948, citado por OMETTO, 1981)

$$EToP = W (Rn - G) / \lambda_{evap} + (1-W) 86400 \rho C_p (\Delta_e / \gamma \lambda_{evap} r_a) \quad (18)$$

Em que:

EToP- evapotranspiração de referência pelo método de Penman (mm d⁻¹);

W- fator de ponderação entre temperatura e o coeficiente psicrométrico segundo VISWANADHAM et al. (1991):

$$W = 0,407 + 0,0145T \quad \text{para } 0 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{med} \leq 16 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (19)$$

$$W = 0,483 + 0,01T \quad \text{para } 16,1 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{med} \leq 32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20)$$

Em que:

T_{med}- temperatura média do obtida pela equação 3;

Rn- representa o saldo de radiação à superfície (MJ m⁻² d⁻¹), obtido segundo a equação 9;

G- fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹) que foi considerado igual a zero, λ_{evap} o calor latente de evaporação obtido pela equação 8;

ρ- massa específica do ar (1,26 kg m⁻³);

C_p- o calor específico do ar (0,001013 MJ kg⁻¹ °C⁻¹);

γ- coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹).

$$\Delta_e = (e_s - e_a) \quad (21)$$

Onde:

Δ_e- déficit de pressão de vapor (kPa);

e_s- pressão de saturação de vapor obtida pela equação 4;

e_a- pressão parcial de vapor calculada de acordo com a equação 13;

γ- constante psicrométrica (kPa °C⁻¹) obtida conforme a equação 7;

r_a- resistência aerodinâmica (s m⁻¹), obtida pela equação a seguir:

$$r_a = 250 / (1 + 0,526 v_2) \quad (22)$$

Em que:

v₂- velocidade do vento a altura de 2 m, obtida mediante a equação 6.

2.3.6 Penman Simplificado-EToP_s (PENMAN, 1948, citado por OMETTO, 1981)

$$EToP_{S_{oi}} = Q_o (0,17 + 0,11n/N) + 0,28 p_i \quad (23)$$

Onde:

EToPS_{oi}- evapotranspiração de referência pelo método de Penman Simplificado nas estações outono-inverno (mm d⁻¹), ou seja, no período de abril a setembro;

Q₀- radiação extraterrestre (mm dia⁻¹);

n- brilho solar (h);

N- duração astronômica do dia (h);

Pi- evaporação de Piche (mm dia⁻¹). Para o período de outubro a março, ou estações primavera-verão, estimou-se a evapotranspiração de referência pelo método de Penman Simplificado, mediante a equação:

$$EToPS_{pv} = Q_0 (0,19 + 0,23n/N) + 0,28 pi \quad (24)$$

Onde:

EToPS_{pv}- evapotranspiração de referência pelo método de Penman Simplificado nas estações primavera-verão (mm d⁻¹).

2.3.7 Priestley e Taylor modificado-EToPT_m (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972, citado por MEDEIROS, 1998).

$$EToPTM = 1,26 W R_n \quad (25)$$

Em que:

EToPTM- evapotranspiração de referência pelo método de Priestley & Taylor modificado (mm d⁻¹);

R_n- saldo de radiação à superfície (mm dia⁻¹);

W- fator de ponderação modificado entre temperatura e coeficiente psicrométrico obtido pelas equações 19 e 20. Na equação de Priestley & Taylor, a variável t representa a temperatura média do termômetro de bulbo úmido, utilizada no método original de Linacre. Entretanto, este elemento meteorológico é menos disponível que a temperatura média do termômetro de bulbo seco. Nesse sentido, Medeiros (1998), modificou esse método, substituindo a temperatura do termômetro bulbo úmido, pela temperatura do termômetro seco, conforme as equações 19 e 20.

2.3.8 Tanner e Pelton-EToTP (TANNER e PELTON, 1960 citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997)

$$ETTP=1,12 (Rn/59) - 0,11 \quad (26)$$

Em que:

EToRA - evapotranspiração de referência pelo método da Radiação;

Rn - saldo de radiação solar ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

2.3.9 Radiação-EToRA (DOORENBOS e PRUITT, 1972)

$$EToRA= W.Rs \quad (27)$$

Em que:

EToRA - evapotranspiração de referência pelo método da Radiação;

W – obtido pela equação (17) descrita anteriormente no item 3.1.4 desta.

Rs - radiação solar global disponível ao nível da superfície (mm dia^{-1}).

2.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ETO

Doorenbos e Pruitt (1977) citados por (SILVA, 2003), comparando a ETo estimadas por equações, em Davis, no Estado da Califórnia, com dados medidos em lisímetro de 30m^2 de área, encontraram boas estimativas com os métodos de Penman, Makkink e Jensen e Haise. Allen et al. (1989) citados por (MEDEIROS, 2002), compararam estimativas de evapotranspiração de referência obtidas pelos métodos de Penman, Penman corrigido, Kimberly-Penman e Penman-Monteith com medições lisimétricas e observaram que o modelo de Penman-Monteith, foi o que mais se ajustou aos dados obtidos através de medições diárias e mensais. Al-Ghobari (2000) observou bons ajustes entre dados medidos em lisímetros em Riyadh e as equações baseadas em Penman, Blaney-Criddle e Tanque de Evaporação.

Na escala diária, ELTINK et al. (1997) verificaram que a ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Priestley-Taylor, foram os que apresentaram a

melhor correlação com dados de lisímetros, em comparação aos métodos de Camargo e Tanque Classe A. Em Piracicaba, SP, Sentelhas (1998), também verificou que o método de Penman-Monteith apresentou estimativas mais consistentes da ETo, quando comparado com o método de Penman e Priestley e Taylor, utilizando o lisímetro de pesagem como referência.

O desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) foi avaliado em São Paulo, SP, por Machado e Mattos (2000) utilizando dados decendiais obtidos em lisímetro de lençol freático, comparados com os modelos de Penman, Tanque Classe A e Tanque de 20 m², a partir do coeficiente de correlação "r" e do índice de concordância de Willmott "d". Os resultados mostraram que a melhor estimativa foi obtida com o método de Penman, devido ao seu melhor ajuste aos dados lisimétricos, apresentando uma concordância muito boa, com o índice "d" igual a 0,91.

Com o objetivo gerar informações consistentes para a correção dos valores estimados de evapotranspiração de referência (ETo) para 16 municípios do Estado do Ceará, Cabral (2000), constatou que o método de Hargreaves subestimou a evapotranspiração de referência, em relação a Penman-Monteith, em todos os municípios estudados. Silva et al. (2001), realizaram a estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith, Hargreaves e Tanque "Classe A" e concluíram que a evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith superestima os valores obtidos pelo método de Hargreaves em períodos mensais e semanais, e que na ausência de variáveis climatológicas necessárias para a aplicação do modelo recomendado atualmente pela FAO, a equação de Hargreaves pode ser utilizada com precisão na estimativa da evapotranspiração de referência. Do mesmo modo Mendonça (2001), comparou o desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte Fluminense-RJ, avaliou cinco métodos indiretos (Radiação Solar FAO, Makkink, Linacre, Jensen-Haise e Hargreaves-Samani) e dois evaporímetros (Atmômetro SEEI Modificado e Tanque Classe A) em relação ao modelo de Penman-Monteith, e concluiu que com exceção ao método do Atmômetro SEEI Modificado, todos os demais métodos avaliados, podem ser utilizados satisfatoriamente na estimativa da ETo, com o melhor desempenho e ajustamento regional em períodos de 5 e 10 dias.

Em estudos destinados à comparação de três métodos de estimativa da

evapotranspiração de referência utilizando dados de estações meteorológicas convencional (EMC) e automática (EMA), Oliveira e Volpe (2003) constataram que os valores da ETo obtidos pelos métodos de Penman e Penman-Monteith, foram semelhantes quando comparados aos obtidos com o tanque Classe A, e que as estimativas da ETo com dados da EMC excederam em média 7% e 10%, para os períodos seco e úmido, respectivamente, os valores estimados pela EMA.

Para Vescove (2004) em Jaboticabal, SP, avaliou cinco métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo): Makkink, Radiação Solar , Hargreaves e Samani, Thornthwaite modificado por Camargo e Tanque Classe A, em relação ao método de Penman-Monteith, em dois períodos distintos das fases de desenvolvimento da cultura de citrus, com dados médios quinzenais para os períodos inverno-primavera e verão-outono, e concluiu que o método do Tanque Classe A superestimou a ETo em 26% no período verão-outono e em 24% no período inverno-primavera, enquanto o método de Makkink, subestimou a ETo nos dois períodos analisados.

Conceição e Mandelli (2005) compararam estimativas de ETo para Bento Gonçalves, RS, obtidas pelos modelos de Samani, Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Hargreaves-Makkink com aquelas obtidas pela equação de Penman-Monteith-FAO, e observaram que os métodos de Makkink e da Radiação, que empregam a radiação global incidente como variável, foram os que apresentaram os melhores resultados, com desempenhos classificados como ótimos.

Na região de Dourados, MS Fietz et al. (2005) avaliaram seis métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, na escala diária, a partir de dados obtidos em um lisímetro de pesagem, e concluíram que o modelo Penman-Monteith FAO foi o que estimou mais satisfatoriamente a ETo. Os métodos de Priestley-Taylor e do tanque classe A também apresentaram um desempenho muito bom, enquanto os métodos de Hargreaves-Samani e Makkink superestimaram a ETo. O método de Camargo teve o desempenho mais insatisfatório, tendendo a subestimar a ETo.

Carvalho et al. (2006), avaliaram a estimativa da ETo para a região de Seropédica, RJ, correlacionando medidas obtidas em lisímetro de pesagem com os métodos de Penman-Monteith (P-M), Hargreaves-Samani (H-S) e tanque Classe A (TCA) considerando dados diários de evapotranspiração de referência, e concluíram que as equações de regressão linear entre as medidas lisimétricas e os métodos P-

M, H-S e TCA, apresentaram coeficientes de determinação de 0,59, 0,46 e 0,81, respectivamente.

Com o objetivo de estudar métodos de controle de irrigação numa cultura de Crisântemo em ambiente protegido, Fernandes et al. (2006) estimaram a evapotranspiração de referência em Botucatu, SP, pelos métodos Tanque evaporimétrico, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Penman, Penman-piche e Penman-Monteith. Os resultados foram comparados com dados obtidos em lisímetro. Os métodos que apresentaram melhores estimativas da ETo foram: Jensen-Haise, Penman, Radiação Solar, Makkink e Penman-Monteith.

Henrique e Dantas (2006), propuseram em Campina Grande, PB uma fórmula empírica para a estimativa diária da evapotranspiração de referência, baseada na amplitude térmica (EToT), a qual, foi comparada com os métodos de Penman-Monteith-FAO (EToPM), Hargreaves (EToH) e Linacre (EToL), e concluíram que as correlações entre o modelo proposto (EToT) e Hargreaves obtiveram o melhor ajuste, cujos coeficientes de determinação foram: 0,9796 (verão), 0,8253 (outono), 0,878 (inverno), 0,914 (primavera) e 0,7882 (ano). Os métodos de EToPM e EToL não apresentaram um bom ajuste, o que indica a viabilidade da utilização do modelo proposto.

2.5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

Reichardt (1985), define a evapotranspiração máxima da cultura (ETc) como a máxima perda de água que certa cultura sofre em dado estágio de desenvolvimento, quando não existe restrição de água no solo. Ele afirma também, que a evapotranspiração real (ETr), é a que de fato ocorre.

Segundo Villa Nova e Reichardt (1989), a evapotranspiração real ou atual (ETr) é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área e das condições de umidade do solo. Doorenbos e Kassam (1994) citados por (FREITAS et al., 1999) relatam que a evapotranspiração máxima da cultura (ETc) refere-se às condições em que a água é suficiente para o crescimento e desenvolvimento de uma cultura sadia, sem restrição, cultivada em grandes áreas

sob condições ótimas de manejo agrônômico e de irrigação.

De acordo com Reichardt (1985), caso haja água disponível no solo e o fluxo de água na planta atender à demanda atmosférica, a E_{Tr} será igual a E_{Tc} , se houver restrição de água no solo e a demanda atmosférica não for atendida, a E_{Tr} será menor que a E_{Tc} . A disponibilidade de água afeta a produtividade, e a situação ideal para a cultura seria a E_{Tr} igual a E_{Tc} . Ocorrendo $E_{Tr} < E_{Tc}$, existe restrição de água e a produtividade pode ser afetada, razão pela qual a E_{Tm} é utilizada para se calcular a demanda climática máxima de uma cultura, em projetos de irrigação.

Na elaboração e no manejo geral de um projeto de irrigação, um dos fatores de maior importância é a quantificação precisa do volume de água necessário para o desenvolvimento normal das culturas desejadas, durante o ciclo das mesmas. Isto pode ser feito através do conhecimento da evapotranspiração máxima da cultura (E_{Tc}) referente a cada espécie vegetal (MAIA et al., 1999).

A FAO, através do Boletim 24 Dorenbos e Pruitt (1977) citados por (SILVA, 2003), sugeriu a estimativa da evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) a partir da evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultura (K_c), em três estádios: 1) determinação do efeito do clima no requerimento de água pelas culturas, dados pela evapotranspiração de referência (E_{To}), 2) o efeito das características da cultura no requerimento de água, dado pelo coeficiente da cultura (K_c) e 3) o efeito das condições locais e práticas agrícolas no requerimento de água pelas culturas, advecção, dimensão do campo, disponibilidade de água, salinidade e métodos de cultivo e irrigação.

Nesse sentido, a evapotranspiração da cultura é obtida através do valor da evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (E_{To}) corrigida pelo coeficiente da cultura (K_c), sendo este, dependente do tipo de cultura e seu estágio de desenvolvimento. O coeficiente de cultura utilizado nessa metodologia é adimensional, tendo sido proposto inicialmente por Van Wilk e De Vries (1954), citados por (MELO, 2001) e calculado pela razão entre a evapotranspiração máxima de uma cultura e a evapotranspiração de referência.

A evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) é determinada a partir de medidas diretas, baseadas no balanço hídrico em volume de solo conhecido. A E_{Tc} pode ser obtida a partir do lisímetro, também conhecido como evapotranspirômetro, que é um equipamento constituído de uma caixa impermeável, contendo um volume de solo, que permite conhecer detalhadamente alguns dos termos do balanço de água no

volume amostrado (PEREIRA et al., 1997a).

Segundo Faria et al. (2000) avaliando a evapotranspiração de referência na demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho na bacia do Rio Verde Grande, MG, não observaram diferenças expressivas na demanda suplementar de irrigação no ciclo da cultura do milho quando se utilizou a evapotranspiração de referência estimada por meio de equações ajustadas entre Penman-Monteith e Hargreaves.

Pacheco (2000) estudando a necessidade de água para o cultivo da Crotalária (*Crotalaria juncea* L.) em Santo Antônio do Leverger-MT, observou que não houve diferença significativa entre as estimativas da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman, Penman-Monteith e Tanque Classe A. Resultados semelhantes foram obtidos por Curi (2000), avaliando o consumo de água na cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) nessa mesma localidade.

2.6 CLIMATOLOGIA E REGIME HIDRICO DA REGIÃO DE RIO BRANCO – ACRE

O clima da região de Rio Branco, Acre, segundo os critérios adotados por W. Köppen, foi classificado como Am, clima quente, megatérmico e úmido (SOUSA et al., 2008).

O método de Thornthwaite e Mather (1955), foi utilizado para realizar o monitoramento da variação do armazenamento de água no solo na escala diária ou mensal, utilizando-se valores médios da normal climatológica da localidade. Os dados utilizados para o cálculo do balanço hídrico foram a precipitação, a evapotranspiração potencial e a capacidade de armazenamento disponível (CAD), que corresponde ao máximo de água que o solo pode reter com o teor de umidade na capacidade de campo. Esse modelo considera que, sendo a precipitação superior à evapotranspiração potencial, a evapotranspiração real será igual à evapotranspiração potencial e o restante de água será utilizado para recarregar o armazenamento do solo ou convertido em excedente hídrico.

Caso a precipitação não seja suficiente para se manter a evapotranspiração real, o modelo retira água armazenada no solo. Porém, esta retirada apresenta resistência, fazendo com que a evapotranspiração real seja inferior a potencial, gerando déficit

hídrico. A resistência à retirada de água do solo aumenta, à medida que se diminui a quantidade de água armazenada neste, devido principalmente ao acréscimo do potencial matricial no solo. Já a entrada de água no solo não recebe nenhuma resistência.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados na presente pesquisa foram oriundos do acervo da Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, localizada na área experimental do Centro de Ciências Biológicas e da Natureza – CCBN, na Universidade Federal do Acre, em Rio Branco, Acre, que apresenta as seguintes coordenadas geográficas: latitude 09° 57' 32" S, longitude 67° 52' 06" W e altitude de 159 m. Essa estação de meteorologia executa as observações e registros meteorológicos, conforme as normas estabelecidas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os dados climatológicos diários utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência foram a insolação, a temperaturas do ar (máxima, mínima e média), a temperatura do bulbo úmido, a pressão atmosférica, a evaporação de Piche e a velocidade do vento medida a 10 m de altura, referentes ao período de 1981 a 2006.

Visando o acompanhamento da variação do armazenamento de água no solo, foi calculado o balanço hídrico para a região de Rio Branco, Acre, com base de dados diários referentes ao período 1981 a 2006. Os cálculos foram realizados, adotando-se o método de Thornthwaite e Mather (1955) citado por (SOUSA, 2002), para uma capacidade de água disponível no solo de 100 mm. A estimativa da evapotranspiração potencial baseou-se no método de Thornthwaite⁴ (1948), citado (SOUSA, 2002).

A evapotranspiração de referência diária e a relativa ao período de cinco dias (qüinqüídios), foi estimada pelos modelos de Penman-Monteith-EToPM (ALLEN et al., 1998), Makkink-EToMAKK (MAKKINK (1957) citado por PEREIRA et al., 1997a), Penman-EToP e Penman simplificado-EToPs (PENMAN (1948) ambos citado por OMETTO (1981), Jensen-Haise-EToJH (JENSEN e HAISE (1963) citado por SEDYAMA, 1996), Priestley e Taylor modificado-EToPTm (PRIESTLEY e TAYLOR (1972) citado por MEDEIROS, 1998), Hargreaves-EToHG (HARGREAVES, 1974, citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997), Tanner e Pelton-EToTP (TANNER e PELTON (1960) citado por CAMARGO e SENTELHAS, 1997), e Radiação-EToRA (DOORENBOS e PRUITT, 1972), empregando-se o software Origin 6.0.

⁴THORTWAITE, G. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geophysical Review**, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948

3.1 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Antes de submeter os dados experimentais a uma análise estatística e comparativa, eles foram tratados objetivando-se detectar e filtrar possíveis medidas discrepantes, visando obter um conjunto de dados representativo da ETo para a região de Rio Branco - Acre. Essa filtragem foi possível em função de ETo ter limites de variação bem definidos e impostos pela disponibilidade regional de energia, e sempre que um dia apresentava valores discrepantes sua causa foi investigada, e em alguns casos, excluídos da base de dados.

A seleção dos métodos de estimativa da ETo que melhor se ajustaram às condições da região de Rio Branco-AC, foi realizada comparando-se os resultados obtidos pelos métodos de EToMAKK, EToP, EToPs, EToJH, EToPTm, EToHG, EToTP e EToRA com o método EToPM, considerado como padrão recomendado pela FAO. A partir dos valores diários e quinúidiais de evapotranspiração de referência estimados pelos diferentes métodos, foram ajustadas às equações de regressão, para fins de análise das relações da evapotranspiração de referência entre o método de Penman-Monteith e os demais métodos inseridos nesta pesquisa.

A análise dos resultados foi realizada empregando-se o software estatístico Origin 6.0 desenvolvido pela Microcal Inc. (USA), utilizando-se análise de regressão, em que a variável dependente foi o método de Penman-Monteith, e os demais métodos avaliados nesse trabalho, foram considerados as variáveis independentes.

A comparação entre os valores estimados da ETo pelo método padrão (EToPM) e os demais métodos, se baseou no erro padrão da estimativa (SEE) e no coeficiente de determinação (R^2) das equações de regressão ajustadas, utilizando-se o erro padrão de estimativa ajustado (ASEE), conforme descrito por Jensen et al. (1990), citados por (OLIVEIRA et al. 2005). Na determinação do SEE, foi utilizada a equação:

$$SEE=[(\sum(y_{pi}-y_{mi})^2)/(n-1)]^{1/2} \quad (28)$$

Em que:

y_{pi} - estimativa da ETo pelo modelo padrão de Penman-Monteith;

y_{mi} - estimativa da ETo obtida por cada um dos modelos avaliados;

n- número de observações. Para a determinação do ASEE foi empregada a seguinte equação:

$$ASEE=[(\sum(y_{pi}-y_{regr\ i})^2/(n-1))]^{1/2} \quad (29)$$

Em que:

y_{pi} - estimativa da ETo pelo modelo padrão de Penman-Monteith;

$y_{regr\ i}$ - estimativa da ETo obtida pelo emprego da equação de regressão ajustada entre o métodos de Penman-Monteith e os demais métodos;

n- número de observações.

Na classificação dos modelos de estimativa da ETo, empregou-se o SEE_{Pond} , obtido pela ponderação dos valores de SEE e ASEE, conforme descrito por Jensen et al. (1990), citados por (OLIVEIRA et al. 2005):

$$SEE_{Pond}=0,67\ SEE+0,33\ ASEE \quad (30)$$

Conforme recomendação de alguns autores (GAVILÁN ZAFRA, 2005; OLIVEIRA et al., 2005; FERNANDES, 2006), foi realizada a calibração local dos métodos em relação ao padrão (EToPM), para a melhoria do desempenho dos mesmos, o que foi implementado, forçando-se a passagem da reta de regressão pela origem, onde a declividade da mesma (b_c), representa o coeficiente de calibração local. A classificação foi realizada por ordem crescente dos valores de SEE_{Pond} referentes aos métodos calibrados.

A calibração dos métodos é recomendada por diversos autores no Brasil e no exterior, e visa, sobretudo, aumentar a eficiência dos métodos para a localidade em estudo, a qual, é obtida forçando-se a passagem da reta de regressão pela origem, onde a declinação da reta de regressão constitui o coeficiente de calibração.

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação (r) que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados da ETo em relação aos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith. Matematicamente essa aproximação é dada pelo índice de concordância "d" proposto por Willmont et al., (1985), cujos valores, variam desde zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita, conforme a equação a seguir:

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum [(|P_i - O_i|) + (O_i - O)]^2} \quad (31)$$

Em que:

P_i- valores de ETo estimados pelos demais métodos;

O_i- valores de ETo obtidos pelo modelo de Penman-Monteith;

O- a média dos valores estimados de ETo pelo modelo de Penman-Monteith.

Ao correlacionar os valores estimados de evapotranspiração de referência pelos métodos testados em relação ao modelo de Penman-Monteith, foi utilizado um coeficiente de confiança ou desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que corresponde à multiplicação do coeficiente de correlação “r” pelo coeficiente de exatidão “d”, conforme mostra o Quadro 1,

QUADRO 1. Critérios de interpretação do coeficiente “c” proposto por Camargo & Sentelhas.

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)

A ordem crescente de prioridade dos métodos de estimativa da ETo para a região de Rio Branco, segundo os critérios propostos por Camargo e Sentelhas (1997), foi estabelecida pelos métodos que apresentaram coeficiente de confiança ou desempenho “c” superior a 0,65.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CLIMATOLOGIA E BALANÇO HÍDRICO DA REGIÃO DE RIO BRANCO, AC.

4.1.1 Caracterização climática da região de estudo

A série de dados utilizada compreende um período de 26 anos (1981 a 2006) disponibilizando dados de temperaturas máxima, mínima e média do ar, pressão atmosférica, evaporação de Piche, insolação, umidade relativa e velocidade do vento medida a 10m de altura.

A climatologia local indica para o citado período de estudo, temperaturas médias mensais variando de 23,6 °C em julho a 26,3 °C (outubro), com média anual de 25,3°C. A precipitação média mensal oscila de 30,6 mm (junho) a 292 mm (janeiro), apresentando média anual de 1987 mm. A umidade relativa média mensal varia de 79% (agosto) a 88% nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, com média anual de 85%. A velocidade média mensal do vento oscila de 5,2 km h⁻¹ em junho a 6,4 km h⁻¹ (outubro), apresentando média anual de 5,8 km h⁻¹.

Segundo os critérios adotados por Thornthwaite, o clima da região de Rio Branco, classifica-se como Clima Úmido, com pequena deficiência de água, megatérmico e com vegetação durante todo o ano, representado pela seguinte fórmula climática: B₁ rA'a'.

4.1.2 Balanço hídrico do solo na região de estudo

No Gráfico 1 observa-se o balanço hídrico climatológico segundo Thornthwaite e Mather (1955) para a região de Rio Branco, indicando a variação da precipitação pluviométrica-P (mm mês⁻¹), evapotranspiração potencial-ETP (mm mês⁻¹) e real-ETR (mm mês⁻¹), onde podemos constatar que as maiores precipitações concentraram-se no período de janeiro a abril e nos meses de novembro e dezembro, com valores superiores a 200mm mês⁻¹. No período de janeiro a maio e outubro a novembro, a ETP e a ETR apresentam valores iguais. Todavia, nos demais meses do ano, a ETR é inferior a ETP, gerando assim deficiência hídrica na região em estudo.

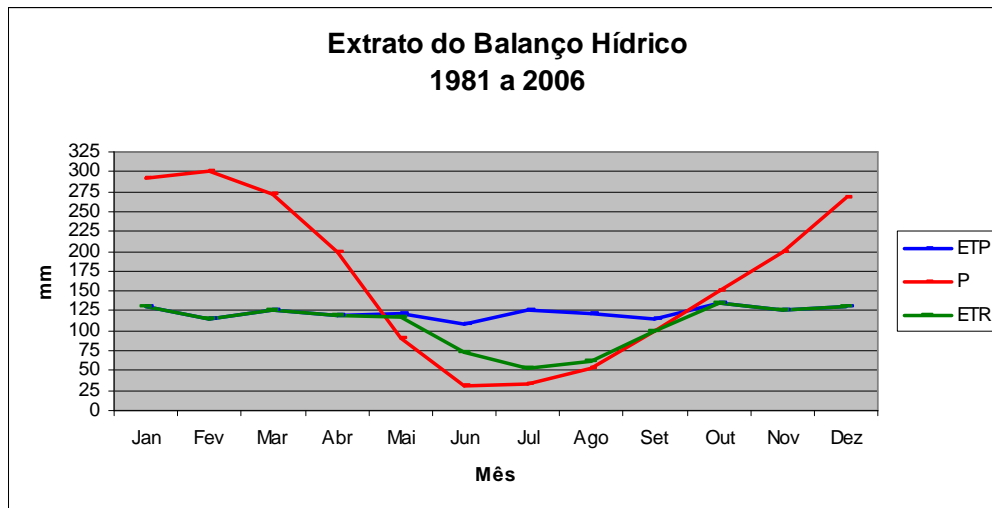


Gráfico 1 - Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para a região de Rio Branco-Acre, com a variação mensal da precipitação pluviométrica (P), evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), UFAC, 2008.

O Gráfico 2 retrata os resultados dos períodos com excedente hídrico (mm mês^{-1}) e deficiência hídrica (mm mês^{-1}) baseados em dados climatológico diários, calculados pela metodologia de Thornthwaite e Mather (1955) para a região de Rio Branco, Acre. Constata-se no período de dezembro a abril, valores de excedentes hídrico superiores a 75mm mês^{-1} . No entanto, no período de junho a setembro, ocorre deficiência hídrica regional.

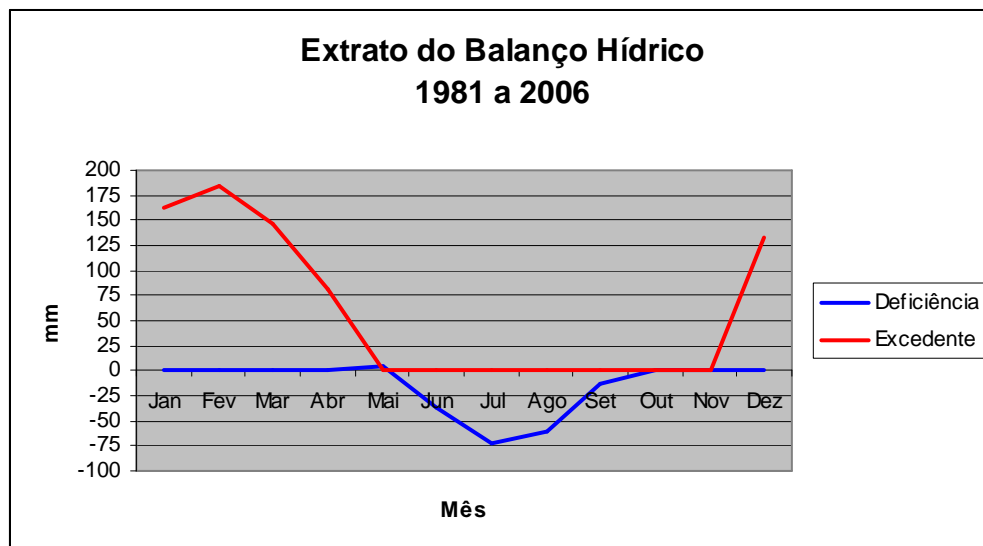


Gráfico 2: Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para a região de Rio Branco-Acre, com o excedente e a deficiência hídrica mensal, UFAC, 2008.

4.2 AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA ETo COM DADOS CLIMATOLÓGICOS DIÁRIOS

Os valores mínimos, máximos e médios mensais da evapotranspiração de referência (ETo) estimados para o município de Rio Branco (mm dia⁻¹), pelos métodos Penman-Monteith (EToPM), Makkink (EToMAKK), Penman (EToP), Jensen-Haise (EToJH), Priestley e Taylor modificado (EToPT_m), Hargreaves (EToHG), Tanner e Pelton (EToTP), Penman simplificado (EToPs) e Radiação (EToRA), a partir de dados diários. (Tabela 1). Observa-se no método Padrão (EToPM), que os valores mínimos variaram desde 0,89 mm dia⁻¹ no mês de junho a 4,97 mm dia⁻¹ em abril, enquanto os máximos mensais das ETo estimadas, oscilaram desde 4,29 mm dia⁻¹ no mês de junho a 7,35 mm dia⁻¹ no mês de agosto, com médias mensais variando de 2,79 mm dia⁻¹ em junho a 3,95 mm dia⁻¹ em outubro, apresentando média anual de 3,39 mm dia⁻¹ (Tabela 1).

TABELA 1 - Evapotranspiração de referência mensal (mm dia⁻¹), estimada com dados climatológicos diários, pelos métodos de EToPM, EToMAKK, EToP, EToJH, EToPT_m, EToHG, EToTP, EToPS e EToRA, para o município de Rio Branco.

Modelos	Valor	jan	fev	mar	abr	maio	jun	Jul	ago	set	out	nov	dez	anual
EToPM	Mín	2,09	2,09	1,94	1,67	1,43	0,89	1,20	1,59	1,60	1,85	1,69	1,96	0,89
	Máx	5,78	5,88	5,59	4,97	4,30	4,29	4,81	7,35	6,00	6,42	6,22	6,15	7,35
	Méd	3,49	3,36	3,38	3,20	2,95	2,79	3,12	3,37	3,70	3,95	3,77	3,61	3,39
EToMAKK	Mín	1,87	1,77	1,75	1,49	1,30	1,11	1,12	1,34	1,51	1,71	1,62	1,85	1,11
	Máx	5,52	5,55	5,14	4,71	4,26	4,04	5,55	4,89	4,99	5,36	5,74	5,39	5,74
	Méd	3,03	2,91	2,94	2,87	2,75	2,73	3,14	3,08	3,21	3,46	3,32	3,15	3,05
EToP	Mín	2,43	2,36	2,21	2,06	1,78	1,25	1,64	1,97	2,04	2,29	2,06	2,38	1,25
	Máx	6,80	6,72	6,58	6,16	5,01	4,99	5,65	8,03	7,03	7,42	7,02	7,69	8,03
	Méd	3,94	3,78	3,82	3,59	3,35	3,19	3,59	3,86	4,22	4,49	4,26	4,08	3,85
EToJH	Mín	2,97	2,76	2,56	2,00	1,78	1,10	1,34	1,77	2,05	2,46	2,10	2,87	1,10
	Máx	9,50	9,33	8,85	7,90	7,15	6,72	8,72	9,98	8,99	9,40	9,60	9,13	9,98
	Méd	5,04	4,84	4,90	4,76	4,52	4,38	4,98	5,01	5,32	5,80	5,53	5,26	5,03
EToPT_m	Mín	2,93	2,74	2,69	2,26	1,99	1,26	1,01	2,11	2,29	2,55	2,54	2,88	1,01
	Máx	7,12	7,09	6,59	5,94	5,17	4,55	5,19	7,96	6,39	7,36	7,35	6,80	7,96
	Méd	4,21	4,10	4,07	3,84	3,49	3,24	3,50	3,74	4,14	4,61	4,54	4,38	3,98
EToHG	Mín	2,50	2,35	2,28	1,89	1,67	1,40	1,41	1,70	1,92	2,20	2,03	2,44	1,40
	Máx	7,47	7,39	6,96	6,29	5,71	5,37	7,20	7,30	6,92	7,30	7,52	7,21	7,52
	Méd	4,07	3,91	3,96	3,85	3,68	3,62	4,13	4,10	4,30	4,65	4,45	4,23	4,08
EToTP	Mín	3,53	3,34	3,32	2,96	2,58	2,07	1,20	2,73	2,75	2,96	3,40	3,52	1,20
	Máx	8,14	8,17	7,64	6,93	5,95	5,26	6,26	8,14	7,32	8,21	8,42	7,93	8,42
	Méd	4,97	4,79	4,75	4,49	4,10	3,85	4,19	4,41	4,84	5,36	5,29	5,11	4,68
EToPs	Mín	2,25	2,27	2,18	1,60	1,52	1,37	1,29	1,67	1,82	2,20	2,24	2,27	1,29
	Máx	5,63	5,82	5,46	3,77	3,59	3,42	4,17	4,03	4,22	5,69	6,16	5,65	6,16
	Méd	3,47	3,37	3,38	2,59	2,50	2,45	2,70	2,74	2,89	3,87	3,77	3,59	3,11
EToRA	Mín	1,74	1,64	1,63	1,40	1,23	1,07	1,08	1,27	1,42	1,59	1,52	1,72	1,07
	Máx	4,92	4,94	4,58	4,21	3,82	3,62	4,94	4,37	4,45	4,78	5,11	4,60	5,11
	Méd	2,75	2,64	2,67	2,60	2,50	2,48	2,84	2,79	2,90	3,12	3,00	2,85	2,76

Observa-se no Gráfico 3 que o modelo EToPs estimou satisfatoriamente a ETo nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro em relação ao padrão (EToPM), enquanto nos demais meses do ano, apresentou tendência de subestimativa da ETo em relação ao modelo padrão. Os valores mínimos da ETo variaram de 1,29 mm dia⁻¹ no mês de junho a 2,27 mm dia⁻¹ nos meses de fevereiro e dezembro, com máximos mensais oscilando desde 3,42 mm dia⁻¹ no mês de junho a 6,16 mm dia⁻¹ em novembro, enquanto as médias mensais da ETo variaram de 2,45 mm dia⁻¹ em junho a 3,87 mm dia⁻¹ no mês de outubro, apresentando média anual de 3,11 mm dia⁻¹, conforme a Tabela 1.

Observou-se que o método de EToMAKK subestimou em todos os meses do ano os valores da ETo em relação ao modelo EToPM (Gráfico 3). Os valores mínimos variaram de 1,11 mm dia⁻¹ em junho a 1,87 mm dia⁻¹ em janeiro, com máximos mensais variando desde 4,04 mm dia⁻¹ no mês de junho a 5,74 mm dia⁻¹ no mês de novembro, enquanto as médias mensais variaram de 2,73 mm dia⁻¹ em junho a 3,46 mm dia⁻¹ em outubro, apresentando média anual de 3,05 mm dia⁻¹ (Tabela 1), confirmando os resultados obtidos por Araújo et al., (2007) em Boa Vista, Roraima, onde o modelo de Makkink, subestimou o método padrão em todos os meses do ano. Do mesmo modo, Vescove (2004) também observou que o modelo de Makinkk, apresenta tendência de subestimativa da ETo em relação ao método EToPM.

O método EToP apresentou tendência de superestimar a ETo em relação ao modelo EToPM durante todos os meses do ano (Gráfico 3), com mínimos variando desde 1,25 mm dia⁻¹ em junho a 2,43 mm dia⁻¹ em janeiro, enquanto os máximos mensais variaram de 4,99 mm dia⁻¹ no mês de junho a 8,03 mm dia⁻¹ no mês de agosto, apresentando médias mensais oscilando de 3,19 mm dia⁻¹ em junho a 4,49 mm dia⁻¹ em outubro, com média anual de 3,85 mm dia⁻¹ (Tabela 1), concordando com os resultados obtidos por Jensen et al. (1990), que constataram uma superestimativa da ETo pelo método de Penman, em relação ao padrão (EToPM), na faixa de 15 a 20%, para regiões consideradas úmidas. Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores, que observaram uma tendência do método de Penman em superestimar a ETo, em relação ao método atualmente recomendado pela FAO (EToPM) (OLIVEIRA e CARVALHO, 1998, OLIVEIRA e VOLPE, 2003, OLIVEIRA et al., 2005)..

Observou-se que o método EToJH superestimou a ETo em relação ao

modelo padrão EToPM ao longo do ano. Os valores mínimos variaram desde 1,10 mm dia⁻¹ no mês de junho a 2,97 mm dia⁻¹ em janeiro, com máximos mensais das ETo oscilando desde 6,72 mm dia⁻¹ no mês de junho a 9,98 mm dia⁻¹ em agosto, enquanto as médias mensais variaram de 4,38 mm dia⁻¹ em junho a 5,80 mm dia⁻¹ no mês de outubro, exibindo média anual de 5,03 mm dia⁻¹, conforme a Tabela 1.

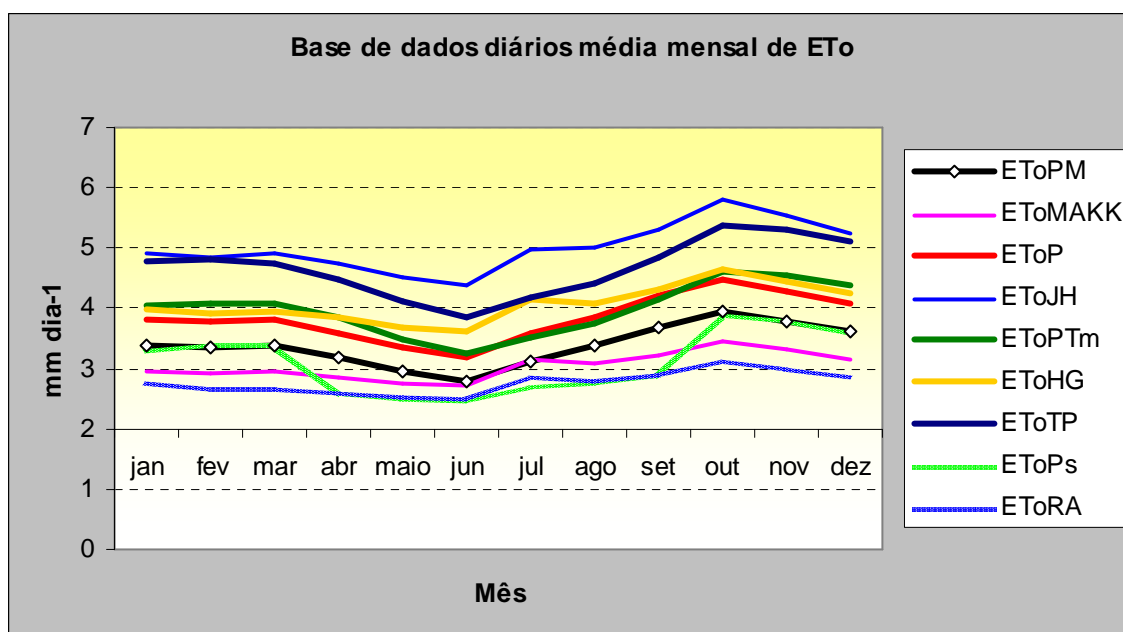


Gráfico 3. Evapotranspiração de referência - ETo mensal (mm dia⁻¹) estimada a partir de dados climatológicos diários, para a região de Rio Branco – Acre, UFAC,2008.

O método EToPT_m apresentou tendência de superestimativa dos valores da ETo em relação ao modelo padrão (EToPM) ao longo do ano (Gráfico 3), cujos mínimos variaram de 1,01 mm dia⁻¹ em julho a 2,93 mm dia⁻¹ em janeiro, com valores máximos mensais variando desde 4,55 mm dia⁻¹ no mês de junho a 7,96 mm dia⁻¹ no mês de agosto, apresentando variação das médias mensais de 3,24 mm dia⁻¹ em junho a 4,61 mm dia⁻¹ em outubro e média anual de 3,98 mm dia⁻¹ (Tabela 1).

Constata-se no Gráfico 3, que o modelo EToHG superestimou a ETo ao longo do ano em relação ao modelo EToPM. Os valores mínimos da ETo variaram desde 1,40 mm dia⁻¹ em junho e julho a 2,50 mm dia⁻¹ em janeiro, enquanto os máximos mensais da ETo oscilaram de 5,37 mm dia⁻¹ em junho a 7,52 mm dia⁻¹ no mês de novembro, com médias mensais variando desde 3,62 mm dia⁻¹ em junho a 4,65 mm dia⁻¹ em outubro, exibindo média anual de 4,08 mm dia⁻¹ (Tabela 1).

O método EToTP apresentou tendência de superestimativa da ETo em

relação ao modelo EToPM durante todos os meses do ano (Gráfico 3), com variação dos valores mínimos de 1,20 mm dia⁻¹ em julho a 3,53 mm dia⁻¹ em janeiro, enquanto os máximos mensais variaram de 5,26 mm dia⁻¹ em junho a 8,41 mm dia⁻¹ no mês de novembro, apresentando médias mensais oscilando de 3,85 mm dia⁻¹ em junho a 5,36 mm dia⁻¹ em outubro, com média anual de 4,68 mm dia⁻¹ (Tabela 1).

Observa-se no Gráfico 3, que o modelo EToRA subestimou a ETo em relação ao modelo padrão (EToPM) nos 12 meses do ano. Os valores mínimos variaram desde 1,07 mm dia⁻¹ no mês de junho a 1,74 mm dia⁻¹ em janeiro, com máximos mensais das ETo oscilando desde 3,62 mm dia⁻¹ no mês de junho a 5,11 mm dia⁻¹ em novembro, enquanto as médias mensais variaram de 2,48 mm dia⁻¹ em junho a 3,12 mm dia⁻¹ no mês de outubro, exibindo média anual de 2,76 mm dia⁻¹, conforme a Tabela 1.

As médias mensais das ETo (mm dia⁻¹) ao longo do ano estimadas para a região de Rio Branco, Acre, pelos modelos EToPM, EToMAKK, EToP, EToJH, EToPT_m, EToHG, EToTP, EToPs e EToRA, a partir de dados diários, onde observa-se que as metodologias avaliadas apresentaram comportamento sazonal semelhante, o que evidencia uma possível correlação entre os métodos avaliados (Gráfico 3). Segundo Oliveira et al. (2005), a verificação da correlação entre os modelos, possibilita um ajuste local entre os demais modelos e o padrão (EToPM). Observa-se ainda que os valores estimados da ETo apresentam-se decrescentes de janeiro a junho e crescentes de julho a outubro, decrescendo em seguida nos meses de novembro e dezembro, com valores mínimos da ETo no mês de junho.

Constatou-se ainda, uma tendência de superestimativa da ETo ao longo do ano em relação ao modelo padrão (EToPM), em cerca de 63% dos modelos avaliados (EToP, EToJH, EToPT_m, EToHG, EToTP), (Gráfico 3). Enquanto a tendência de subestimativa da ETo em relação ao modelo EToPM, foi constatada em apenas 37% das metodologias avaliadas nesta pesquisa (EToMAKK, EToRA, EToPs).

Os resultados das análises estatísticas, referentes aos modelos utilizados nas estimativas da ETo, a partir de dados diários, onde constata-se que de acordo com a percentagem relativa das estimativas da ETo em relação ao modelo padrão (EToPM), os modelos EToP, EToJH, EToPT_m, EToHG e EToTP superestimaram a ETo, em 14% (0,46 mm dia⁻¹), 48% (1,64 mm dia⁻¹), 17% (0,59 mm dia⁻¹), 20% (0,69 mm dia⁻¹) e 38% (1,29 mm dia⁻¹), respectivamente, enquanto os modelos EToMAKK,

EToPs e EToRA, subestimaram a ETo, respectivamente em 10% (0,34 mm dia⁻¹), 8% (0,63 mm dia⁻¹) e 19% (0,69 mm dia⁻¹), (Tabela 2). Esses resultados, corroboram com os obtidos por Fernandes (2006), no Rio de Janeiro, onde foi observado que os modelos de Jensen-Haise e Priestley e Taylor modificado superestimaram a ETo em relação ao método de Penman-Monteith, enquanto o método Makkink, subestimou os valores da ETo em relação ao método padrão.

Do mesmo modo Jensen et al. (1990) citados por (Machado e Mattos, 2000) comparando os dados da ETo medidos em lisímetros de precisão, instalados em onze diferentes locais (oito nos Estados Unidos, um na Austrália, um no Zaire e um na Dinamarca) com os dados determinados utilizando vinte métodos de estimativa, constataram uma superestimativa para o método de Penman na faixa de 15 a 20%, para as regiões consideradas úmidas.

TABELA 2 - Evapotranspiração de referência estimada com dados climatológicos diários, percentagem relativa em relação ao modelo padrão (EToPM), coeficientes das equações de regressão ajustadas (a e b), coeficiente de determinação (r²), erro-padrão de estimativa (SEE), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), para o município de Rio Branco-AC.

Métodos	ETo mm dia ⁻¹	%	a	b	r ²	SEE mm dia ⁻¹	ASEE mm dia ⁻¹	SEEp mm dia ⁻¹
EToMAKK	3,05	90	0,7327*	0,8714*	0,8488*	0,4867	0,3282	0,4344
EToP	3,85	114	0,0358*	0,8719*	0,9769*	0,4899	0,1279	0,3704
EToJH	5,03	148	0,7412*	0,5269*	0,8942*	1,8073	0,2744	1,3014
EToPT _m	3,98	117	0,1888*	0,8033*	0,8827*	0,6889	0,2889	0,5569
EToHG	4,08	120	0,7511*	0,7926*	0,9012*	0,8485	0,8435	0,8468
EToTP	4,68	138	0,0860*	0,7061*	0,8701*	1,3636	0,3039	1,0139
EToPs	3,11	92	0,6295*	0,8885*	0,6453*	0,5829	0,5023	0,5563
EToRA	2,76	81	0,6281*	1,0001*	0,8486*	0,7089	0,0328	0,5833

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste t

Observou-se ainda na Tabela 2, que os modelos avaliados exibiram coeficientes de determinação superiores a 0,80 (R²), com exceção do método EToPs (R²=0,6453), evidenciando que os ajustes das equações à partir do método padrão (EToPM) foram satisfatórios, destacando-se o ajuste observado pelo modelo de Penman, com R² de 0,9769, o que justifica-se, pelo fato desse modelo apresentar quase as mesmas exigências do modelo padrão (EToPM). Segundo SAMPAIO (1998), a ocorrência de um coeficiente de determinação (R²) reduzido faz com que as estimativas propostas não sejam confiáveis, seja pela instabilidade da variável

estudada ou simplesmente pelo fato do modelo testado não está adequado à dispersão dos resultados observados.

Baseando-se nos valores de SEE (Tabela 2), pode-se realizar uma classificação prévia dos modelos de estimativa da ETo, tendo o modelo EToPM como padrão, em ordem decrescente de prioridade: EToMAKK (0,4867 mm dia⁻¹), EToP (0,4899 mm dia⁻¹), EToPs (0,5829mm dia⁻¹), EToPT_m (0,6889mm dia⁻¹), EToRA (0,7089 mm dia⁻¹), EToHG (0,8485 mm dia⁻¹), EToTP (1,3636 mm dia⁻¹) e EToJH (1,8073 mm dia⁻¹).

Os métodos apresentaram decréscimo nos valores dos erros padrões de estimativa (SEE) em relação ao erro-padrão de estimativa ajustado pela regressão (ASEE), ou seja, ocorre decréscimo nos desvios, com o ajuste feito pela regressão, (Tabela 2). O que segundo Oliveira et al. (2005), indica a possibilidade de melhorar a estimativa da ETo pelos modelos avaliados, mediante calibração na região de Rio Branco, Acre.

Com o dados da Tabela 2, observou-se uma variação nas estimativas da ETo pelos modelos avaliados, indicando a necessidade de adoção na localidade, de métodos que apresentem estimativas com elevados níveis de correlação com a metodologia recomendada pela FAO.

As Figuras 1 (a) a 1 (d) mostram as relações de dispersão a partir de dados diários entre as modelos avaliados, ou seja, a variável independente (eixo vertical) e o modelo padrão de EToPM, a variável dependente (eixo horizontal), onde observa-se que o modelo EToP (Figura 1 c) obteve a maior exatidão e o melhor coeficiente de ajuste em relação ao modelo EToPM com valor de 0,9769, em seguida, tem-se o modelo EToJH, R² de 0,8941 (Figura 1b), EToPT_m com coeficiente igual a 0,8827 (Figura 1d), e EToMAKK que apresentou a maior dispersão dos pontos e o pior ajuste, com R² = 0,8486, apesar da boa exatidão exibida por esta metodologia (b=0,8714), conforme a Figura 1a.

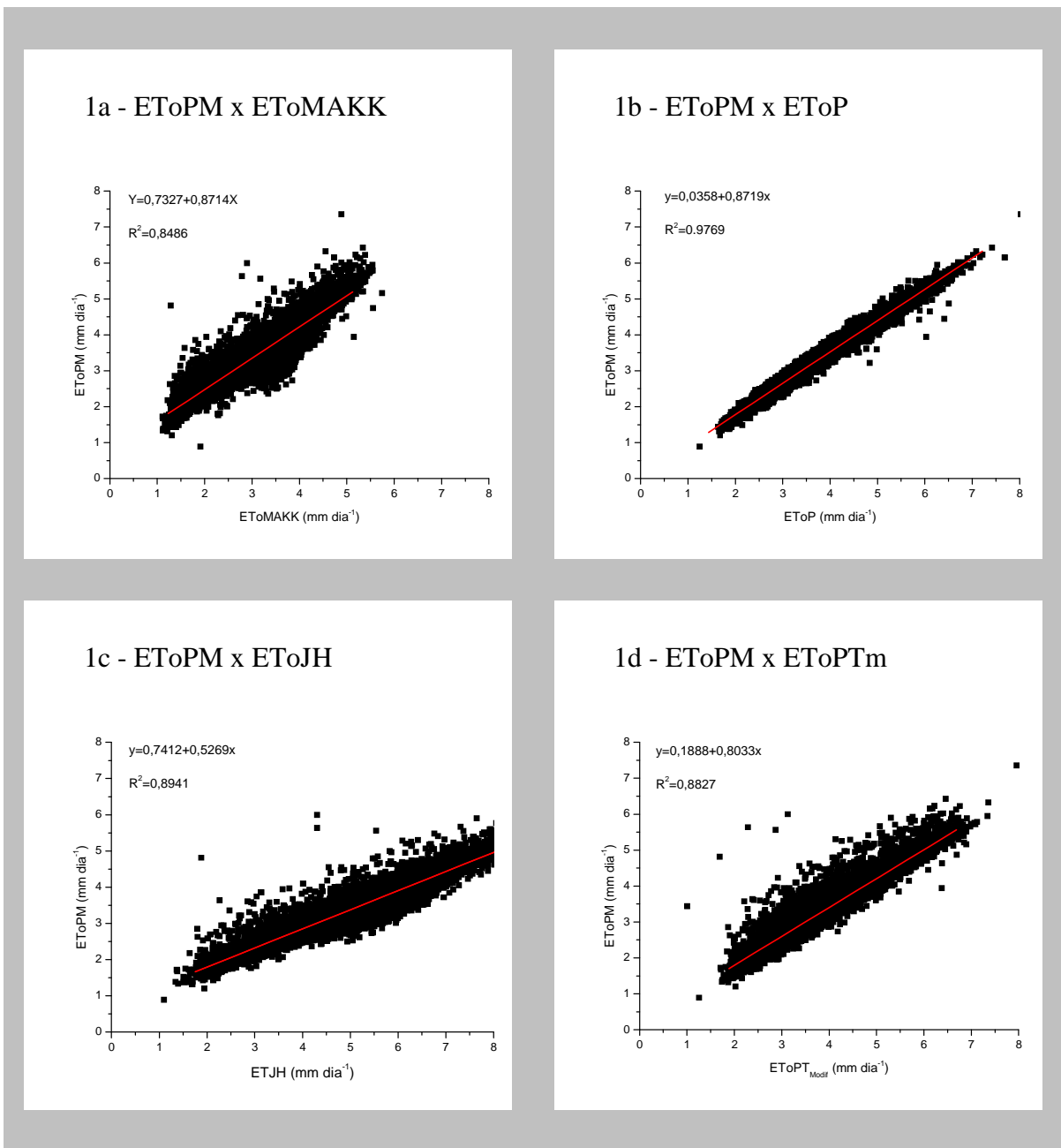


Figura 1 - Correlações entre os valores da ETo estimados com dados climatológicos diários pelos modelos Makkink-EToMAKK (a), Jensen-Haise-EToJH (b), Penman-EToP (c), Priestley & Taylor modificado-EToPTm (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia^{-1} , para a região de Rio Branco, AC – UFAC, 2008.

As relações de dispersão a partir de dados diários entre os modelos avaliados, situados no eixo horizontal e o modelo padrão (EToPM) localizado no eixo vertical, estão apresentadas nas Figuras 2 (a) a 2 (d), destacando-se o modelo EToHG, Figura (2a) que apresentou a maior precisão com $R^2 = 0,9011$, seguindo-se o modelo EToTP, com um valor de $R^2 = 0,8701$ (Figura 2c), e o modelo EToRA (Figura 2d), que obteve um coeficiente de determinação igual a 0,8486. O modelo EToPs evidenciou elevada dispersão dos pontos, com R^2 de 0,6453, apesar da boa

exatidão alcançada, $b=0,8885$ (Figura 2b).

Baseando-se nos resultados da análise de variância obtidos nesse trabalho, observa-se que todos os modelos avaliados apresentaram entre si, diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste t, evidenciando de acordo com alguns autores (ALLEN et al., 1998; GAVILÁN ZAFRA, 2005; OLIVEIRA et al., 2005; FERNANDES, 2006), a viabilidade de calibração local.

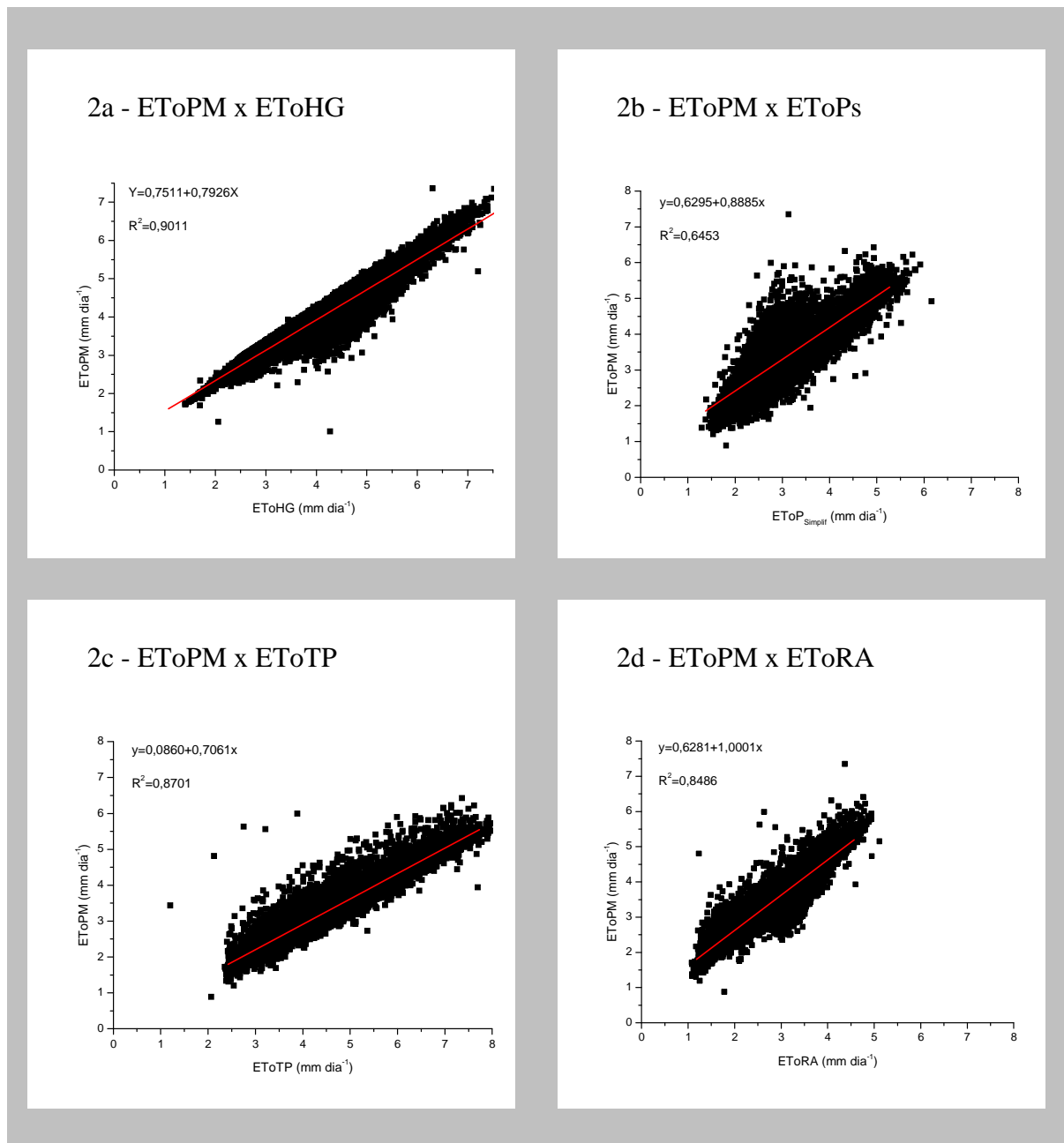


Figura 2 - Correlações entre os valores da ETo estimados com dados climatológicos diários pelos métodos de Hargreaves-ET₀HG (a), Penman Simplificado-ET₀Ps (b), Tanner e Pelton-ET₀TP (c), Radiação-ET₀RA (d) e o modelo de Penman-Monteith-ET₀PM, em mm dia⁻¹, para a região de Rio Branco – AC, UFAC, 2008.

Os resultados das análises estatísticas, referentes aos modelos utilizados nas estimativas da ETo, a partir de dados diários, após a calibração dos mesmos em relação ao padrão (EToPM). Partindo-se dos valores de SEEp (Tabela 3), pode-se classificar as metodologias de estimativa da ETo, tendo o modelo EToPM como padrão, em ordem decrescente de prioridade para a localidade de Rio Branco, AC: EToP (0,3714 mm dia⁻¹), EToMAKK (0,4539 mm dia⁻¹), EToPT_m (0,5581 mm dia⁻¹), EToPs (0,5636 mm dia⁻¹), EToRA (0,5970 mm dia⁻¹), EToHG (0,6850 mm dia⁻¹), EToTP (1,0142 mm dia⁻¹) e EToJH (1,3257 mm dia⁻¹).

TABELA 3 - Coeficiente de calibração local (b_c), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), referentes aos modelos de estimativa da ETo para a região de Rio Branco-AC, a partir de dados climatológicos diários. UFAC, 2008.

Métodos	b_c	ASEE (mm dia ⁻¹)	SEEp (mm dia ⁻¹)
EToMAKK	1,0928	0,3874	0,4539
EToP	0,8807	0,1282	0,3714
EToJH	0,6621	0,3479	1,3257
EToPT _m	0,8480	0,2924	0,5581
EToHG	0,8183	0,3532	0,6850
EToTP	0,7236	0,3046	1,0142
EToPs	1,0797	0,5243	0,5636
EToRA	1,2109	0,3697	0,5970

Os respectivos valores dos coeficientes de correlação “r”, exatidão “d”, desempenho “c”, variação “cv” dos modelos avaliados em relação ao padrão (EToPM) e a classificação dos métodos para a estimativa da ETo (mm dia⁻¹) segundo os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), para a região de Rio Branco-AC, (Tabela 4). Os métodos que apresentaram os melhores desempenhos foram EToP (c=0,83 e cv=3,32%), EToMAKK (c=0,77 e cv=10,76), ambos classificados como muito bom, concordando com os resultados obtidos por Vieira et al. (2007), onde os métodos de Penman e Makkink apresentaram as melhores estimativas da ETo em relação ao método EToPM. Resultados semelhantes foram alcançados por (CAMARGO e SENTELHAS, 1997) e Conceição e Mandeli (2005), onde o modelo de Makkink obteve desempenho classificado como bom, na estimativa da ETo em relação ao modelo Padrão (EToPM). O desempenho do modelo EToPT_m também foi satisfatório, com classificação bom (c=0,66 e cv=7,26%).

Os maiores valores de SEE entre os modelos avaliados foram 0,7089 mm dia⁻¹

¹, 0,8485 mm dia⁻¹, 1,3636 mm dia⁻¹ e 1,8073mm dia⁻¹, obtidos pelas correlações dos modelos EToRA (c=0,52), EToHG (c=0,57), EToTP (c=0,09) e EToJH (c=0,29) em relação ao padrão (EToPM) (Tabela 2), respectivamente, os quais, apresentaram desempenho péssimo (EToJH; EToTP) ou sofrível (EToHG; EToRA) (Tabela 4), com restrições de uso para as condições climáticas da região de Rio Branco.

TABELA 4 - Coeficientes de correlação (r), exatidão (d), desempenho (c), variação (cv) e classificação dos métodos de estimativa da ETo com dados climatológicos diários, segundo os critérios de Camargo & Sentelhas (1997), para a região de Rio Branco-AC, UFAC – 2008.

Métodos	Índices				Classificação
	"r"	"d"	"c"	"cv" (%)	
EToMAKK	0,92	0,84	0,77	10,76	Muito bom
EToP	0,99	0,84	0,83	3,32	Muito bom
EToJH	0,94	0,31	0,29	5,46	Péssimo
EToPT_m	0,94	0,70	0,66	7,26	Bom
EToHG	0,95	0,60	0,57	7,60	Sufrível
EToTP	0,93	0,10	0,09	6,49	Péssimo
EToPs	0,80	0,75	0,60	16,15	Sufrível
EToRA	0,92	0,58	0,53	11,89	Sufrível

Observou-se ainda que os métodos EToHG, EToJH, EToTP e EToRA (Tabela 4), apesar de classificados com desempenho Péssimo ou Sofrível, os mesmos apresentaram coeficientes de correlação "r", superiores a 0,92, o que sugere, que este índice isolado, não é suficiente para a seleção ou indicação de modelos regionais.

4.3 AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA ETo COM DADOS CLIMATOLÓGICOS MÉDIAS QUINQUÍDIAS.

Os valores mínimos, máximos e médios mensais da evapotranspiração de referência (ETo) para o município de Rio Branco (mm dia⁻¹), estimados pelos métodos Penman-Monteith (EToPM), Makkink (EToMAKK), Penman (EToP), Jensen-Haise (EToJH), Priestley e Taylor modificado (EToPT_m), Hargreaves (EToHG), Tanner e Pelton (EToTP), Penman simplificado (EToPs) e Radiação

(EToRA), a partir de dados médios quinçiduais, disposto na Tabela 5. Observa-se no modelo padrão (EToPM), que os valores mínimos variaram desde 1,43 mm dia⁻¹ no mês de junho a 2,85 mm dia⁻¹ em outubro, enquanto os máximos mensais das ETo estimadas, oscilaram de 4,01 mm dia⁻¹ no mês de junho a 5,73 mm dia⁻¹ no mês de março, com médias mensais variando de 2,69 mm dia⁻¹ em junho a 3,92 mm dia⁻¹ em outubro, apresentando média anual de 3,35 mm dia⁻¹.

TABELA 5- Evapotranspiração de referência mensal (mm dia⁻¹), estimada com dados climatológicos médios quinçiduais, pelos métodos de EToPM, EToMAKK, EToP, EToJH, EToPT_m, EToHG, EToTP, EToPs e EToRA, para a região de Rio Branco.-Acre, UFAC, 2008.

Metodo	Valor	jan	fev	mar	abr	maio	Jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual
EToPM	Min	2,69	2,54	2,47	2,13	2,03	1,44	1,71	2,12	2,05	2,85	2,68	2,69	1,44
	Max	4,55	4,53	5,73	4,45	4,17	4,02	4,89	4,65	5,61	5,05	4,94	4,80	5,73
	Méd	3,46	3,35	3,39	3,18	2,97	2,69	3,10	3,27	3,62	3,92	3,73	3,58	3,36
EToMAKK	Min	2,17	2,16	2,08	2,07	1,74	1,19	1,55	1,66	1,81	2,16	2,19	2,12	1,19
	Max	4,25	4,05	5,53	3,93	4,25	3,85	4,13	4,24	4,31	4,55	4,77	4,29	5,53
	Méd	3,02	2,91	2,95	2,86	2,76	2,69	3,13	3,04	3,14	3,46	3,30	3,14	3,03
EoTP	Min	3,02	2,71	2,75	2,61	2,36	1,89	2,17	2,61	2,69	3,22	3,05	2,87	1,89
	Max	5,32	5,43	6,72	5,13	4,72	4,80	5,84	5,31	6,38	5,83	5,68	5,66	6,72
	Méd	3,92	3,80	3,84	3,59	3,36	3,10	3,58	3,78	4,17	4,48	4,24	4,07	3,83
EToJH	Min	3,47	3,34	3,47	3,28	2,53	1,96	2,09	2,68	3,02	3,19	3,59	3,37	1,96
	Max	7,35	7,26	8,91	6,84	7,21	6,17	6,53	7,11	7,26	8,09	8,18	7,30	8,91
	Méd	5,01	4,84	4,89	4,74	4,50	4,36	4,96	5,01	5,26	5,82	5,50	5,25	5,01
EToPTm	Min	3,24	3,19	3,08	2,95	2,45	1,92	2,10	2,43	2,74	3,08	3,28	3,17	1,92
	Max	5,58	5,54	6,89	4,99	4,99	3,99	4,15	4,86	5,35	5,86	6,15	5,73	6,89
	Méd	4,21	4,09	4,07	3,81	3,46	3,12	3,43	3,64	4,05	4,58	4,49	4,36	3,94
EToHG	Min	2,86	2,78	2,83	2,70	2,16	1,73	1,85	2,25	2,47	2,67	2,93	2,76	1,73
	Max	5,86	5,77	7,22	5,47	5,77	5,00	5,26	5,53	5,71	6,44	6,57	5,84	7,22
	Méd	4,05	3,92	3,96	3,84	3,68	3,60	4,12	4,10	4,25	4,68	4,44	4,23	4,07
EToTP	Min	3,85	3,81	3,61	3,49	2,96	2,39	2,63	2,91	3,17	3,71	3,85	3,74	2,39
	Max	6,44	6,41	8,17	5,79	5,80	5,01	5,46	5,83	6,28	6,93	7,20	6,67	8,17
	Méd	4,93	4,79	4,76	4,46	4,08	3,72	4,12	4,31	4,75	5,34	5,25	5,09	4,63
EToPs	Min	2,69	2,70	2,65	2,16	1,87	1,54	1,95	2,15	2,20	2,95	2,66	2,72	1,54
	Max	4,61	4,52	5,22	3,25	3,37	3,36	4,00	4,38	4,82	6,79	5,11	4,93	6,79
	Méd	3,47	3,38	3,39	2,60	2,52	2,47	2,88	3,15	3,28	4,10	3,77	3,60	3,22
EToRA	Min	2,00	1,98	1,92	1,91	1,62	1,14	1,46	1,55	1,68	1,98	2,02	1,95	1,14
	Max	3,80	3,63	4,93	3,53	3,81	3,46	3,70	3,80	3,86	4,07	4,26	3,84	4,93
	Méd	2,73	2,64	2,68	2,60	2,51	2,45	2,83	2,76	2,84	3,12	2,98	2,84	2,75

Verificou-se que o método EToPs estimou satisfatoriamente a ETo nos meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro em relação ao padrão (EToPM), enquanto nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, apresentou tendência de subestimativa da ETo em relação ao modelo EToPM, (Gráfico 4). Os valores mínimos da ETo variaram de 1,54 mm dia⁻¹ no mês de junho

a 2,95 mm dia⁻¹ em outubro, com máximos mensais oscilando desde 3,25 mm dia⁻¹ no mês de abril a 6,79 mm dia⁻¹ em outubro, enquanto as médias mensais da ETo variaram de 2,47 mm dia⁻¹ em junho a 4,10 mm dia⁻¹ no mês de outubro, apresentando média anual de 3,22 mm dia⁻¹, conforme a Tabela 5.

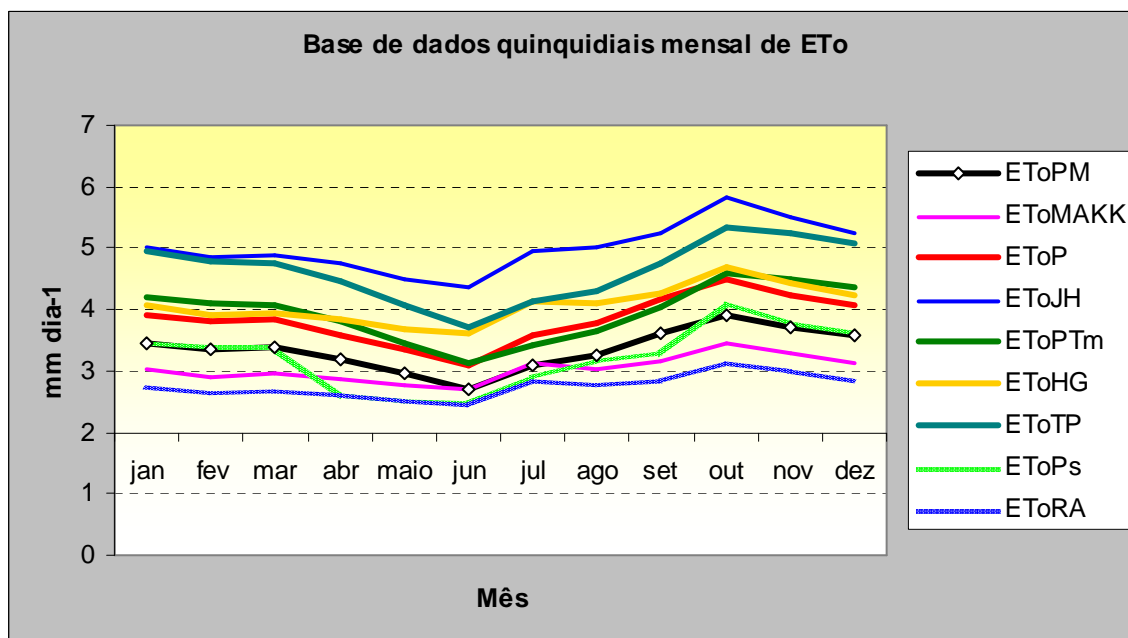


Gráfico 4 - Evapotranspiração de referência - ETo mensal (mm dia⁻¹) estimada a partir de dados climatológicos médios quinquidiais, para a região de Rio Branco – Acre, UFAC, 2008.

Observou-se que o método EToMAKK subestimou em dez meses do ano os valores da ETo em relação ao modelo EToPM, (Gráfico 4). Com exceção dos meses de junho e julho, onde essa metodologia estimou satisfatoriamente a ETo em relação ao modelo padrão. Os mínimos variaram de 1,19 mm dia⁻¹ em junho a 2,19 mm dia⁻¹ em novembro, com máximos mensais variando desde 3,85 mm dia⁻¹ no mês de junho a 5,53 mm dia⁻¹ no mês de março, enquanto as médias mensais variaram de 2,68 mm dia⁻¹ em junho a 3,46 mm dia⁻¹ em outubro, apresentando média anual de 3,03 mm dia⁻¹ (Tabela 5).

O método EToP apresentou tendência de superestimar a ETo em relação ao modelo EToPM durante todos os meses do ano (Gráfico 4), com mínimos variando desde 1,89 mm dia⁻¹ em junho a 3,22 mm dia⁻¹ em outubro, enquanto os máximos mensais variaram de 4,72 mm dia⁻¹ no mês de junho a 6,72 mm dia⁻¹ no mês de março, apresentando médias mensais oscilando de 3,10 mm dia⁻¹ em junho a 4,48 mm dia⁻¹ em outubro, com média anual de 3,83 mm dia⁻¹ (Tabela 5).

O método EToJH superestimou a ETo em relação ao modelo padrão

(EToPM) nos 12 meses do ano, (Gráfico 4). Os valores mínimos variaram desde 1,96 mm dia⁻¹ no mês de junho a 3,59 mm dia⁻¹ em novembro, com máximos mensais das ETo oscilando desde 6,17 mm dia⁻¹ no mês de junho a 8,91 mm dia⁻¹ em março, enquanto as médias mensais variaram de 4,36 mm dia⁻¹ em junho a 5,01 mm dia⁻¹ no mês de janeiro, exibindo média anual de 5,01 mm dia⁻¹, conforme a Tabela 5.

O método EToPT_m apresentou tendência de superestimativa dos valores da ETo em relação ao modelo padrão (EToPM) ao longo do ano (Gráfico 4), cujos mínimos variaram de 1,92 mm dia⁻¹ em junho a 3,27 mm dia⁻¹ em novembro, com valores máximos mensais variando desde 3,99 mm dia⁻¹ no mês de junho a 6,89 mm dia⁻¹ no mês de março, apresentando variação das médias mensais de 3,12 mm dia⁻¹ em junho a 4,58 mm dia⁻¹ em outubro e média anual de 3,94 mm dia⁻¹ (Tabela 5).

Constatou-se que o modelo EToHG superestimou a ETo ao longo do ano em relação ao modelo EToPM, (Gráfico 4). Os valores mínimos da ETo variaram desde 1,72 mm dia⁻¹ em junho a 2,93 mm dia⁻¹ em novembro, enquanto os máximos mensais da ETo oscilaram de 5,00 mm dia⁻¹ em junho a 7,22 mm dia⁻¹ no mês de março, com médias mensais variando desde 3,60 mm dia⁻¹ em junho a 4,68 mm dia⁻¹ em outubro, exibindo média anual de 4,07 mm dia⁻¹ (Tabela 5).

O método EToTP apresentou tendência de superestimativa da ETo em relação ao modelo EToPM durante todos os meses do ano (Gráfico 4), com variação dos valores mínimos de 2,38 mm dia⁻¹ em julho a 3,85 mm dia⁻¹ nos meses de janeiro e novembro, enquanto os máximos mensais variaram de 5,01 mm dia⁻¹ em junho a 8,17 mm dia⁻¹ no mês de março, apresentando médias mensais oscilando de 3,72 mm dia⁻¹ em junho a 5,34 mm dia⁻¹ em outubro, com média anual de 4,63 mm dia⁻¹ (Tabela 5).

Observou-se que o modelo EToRA subestimou a ETo em relação ao modelo padrão (EToPM) nos 12 meses do ano, (Gráfico 4).. Os valores mínimos variaram desde 1,14 mm dia⁻¹ no mês de junho a 2,02 mm dia⁻¹ em novembro, com máximos mensais das ETo oscilando desde 3,46 mm dia⁻¹ no mês de junho a 4,93 mm dia⁻¹ em março, enquanto as médias mensais variaram de 2,45 mm dia⁻¹ em junho a 3,12 mm dia⁻¹ no mês de outubro, exibindo média anual de 2,74 mm dia⁻¹, conforme a (Tabela 5).

Observa-se no Gráfico 4, que os valores da ETo estimados pelos modelos avaliados, apresentam tendência de decréscimo no período de janeiro a junho e tendência de acréscimo de julho a outubro, decrescendo em seguida nos meses de novembro e dezembro, com valores mínimos da ETo no mês de junho.

Os resultados das análises estatísticas referentes aos modelos avaliados nas estimativas da ETo a partir de dados médias quiquídias, (médias de 5 dias) estão apresentados na Tabela 6, onde observa-se que métodos EToP, EToPT_m, EToHG, EToTP e EToJH, superestimaram a ETo em relação ao padrão (EToPM), em 0,48 mm dia⁻¹ (14%), 0,59 mm dia⁻¹ (18%), 0,72 mm dia⁻¹ (21%), 1,28 mm dia⁻¹ (38%) e 1,66 mm dia⁻¹ (49%), respectivamente, enquanto os modelos EToMAKK, EToPs e EToRA, subestimaram a ETo em relação ao modelo EToPM, em 0,32 mm dia⁻¹ (10%), 0,13 mm dia⁻¹ (4%), 0,55 mm dia⁻¹ (15%).

Constatou-se que os modelos avaliados apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,60 (R²), com destaque para o modelo Penman, com R² = 0,9692, (Tabela 6) provavelmente devido ao fato desse modelo apresentar exigências de elementos climáticos semelhantes ao modelo EToPM, adotado como padrão.

TABELA 6 - Evapotranspiração de referência estimada com dados climatológicos quinquídias, percentagem relativa em relação ao modelo padrão (EToPM), coeficientes das equações de regressão ajustadas (a e b), coeficiente de determinação (r²), erro-padrão de estimativa (SEE), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), para a região do município de Rio Branco-AC, UFAC, 2008.

Métodos	ETo mm dia ⁻¹	%	a	b	r ²	SEE mm dia ⁻¹	ASEE mm dia ⁻¹	SEEp mm dia ⁻¹
EToMAKK	3,03	90	0,6164*	0,9025*	0,7065*	0,4486	0,3093	0,4026
EToP	3,83	114	0,0866*	0,8541*	0,9692*	0,4920	0,1002	0,3627
EToJH	5,01	149	0,9939*	0,4711*	0,6066*	1,7677	0,3582	1,3026
EToPT _m	3,94	118	0,3040*	0,7737*	0,8109*	0,6565	0,2483	0,5218
EToHG	4,07	121	0,8738*	0,6093*	0,6080*	0,8513	0,5710	0,7588
EToTP	4,63	138	0,1698*	0,6874*	0,8260*	1,3220	0,2382	0,9643
EToPs	3,22	96	1,0794*	0,7074*	0,6423*	0,4142	0,3415	0,3902
EToRA	2,75	85	0,5080*	1,0358*	0,7065*	0,6812	0,3093	0,5585

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste t

Uma classificação prévia dos modelos de estimativa da ETo, tendo o modelo EToPM como padrão, a partir dos valores de SEE disponíveis na (Tabela 6), deverá obedecer a seguinte ordem decrescente de prioridade: EToP (0,3627 mm dia⁻¹) ,

EToPs ($0,3902 \text{ mm dia}^{-1}$), EToMAKK ($0,4026 \text{ mm dia}^{-1}$), EToPT_m ($0,5218 \text{ mm dia}^{-1}$), EToRA ($0,5585 \text{ mm dia}^{-1}$), EToHG ($0,7588 \text{ mm dia}^{-1}$), EToTP ($0,9643 \text{ mm dia}^{-1}$) e EToJH ($1,3026 \text{ mm dia}^{-1}$). Observa-se ainda decréscimo nos valores dos erros padrões de estimativa (SEE) em relação ao erro-padrão de estimativa ajustado pela regressão (ASEE) nos modelos avaliados, ou seja, ocorre redução nos desvios após o ajuste proporcionado pela regressão, o que de acordo com Oliveira et al. (2005), indica a possibilidade de melhoraria nas estimativas da ETo pelas metodologias avaliadas, mediante calibração regional.

As Figuras 3(a) a 3(d) revelam as relações de dispersão a partir de dados quinqüidiais (médias de 5 dias) os modelos avaliados, situados no eixo horizontal e o modelo EToPM, situado no eixo vertical, constatando-se que o modelo EToP (Figura 3c) obteve o mais elevado coeficiente de ajuste em relação ao modelo padrão (EToPM), com $R^2 = 0,9692$, seguindo-se do modelo EToPT_m, que apresentou um valor de $R^2 = 0,8109$ (Figura 3d) e EToMAKK com $R^2 = 0,7065$ (Figura 3a). O modelo EToJH apresentou elevada dispersão dos pontos e $R^2 = 0,6066$ (Figura 3b).

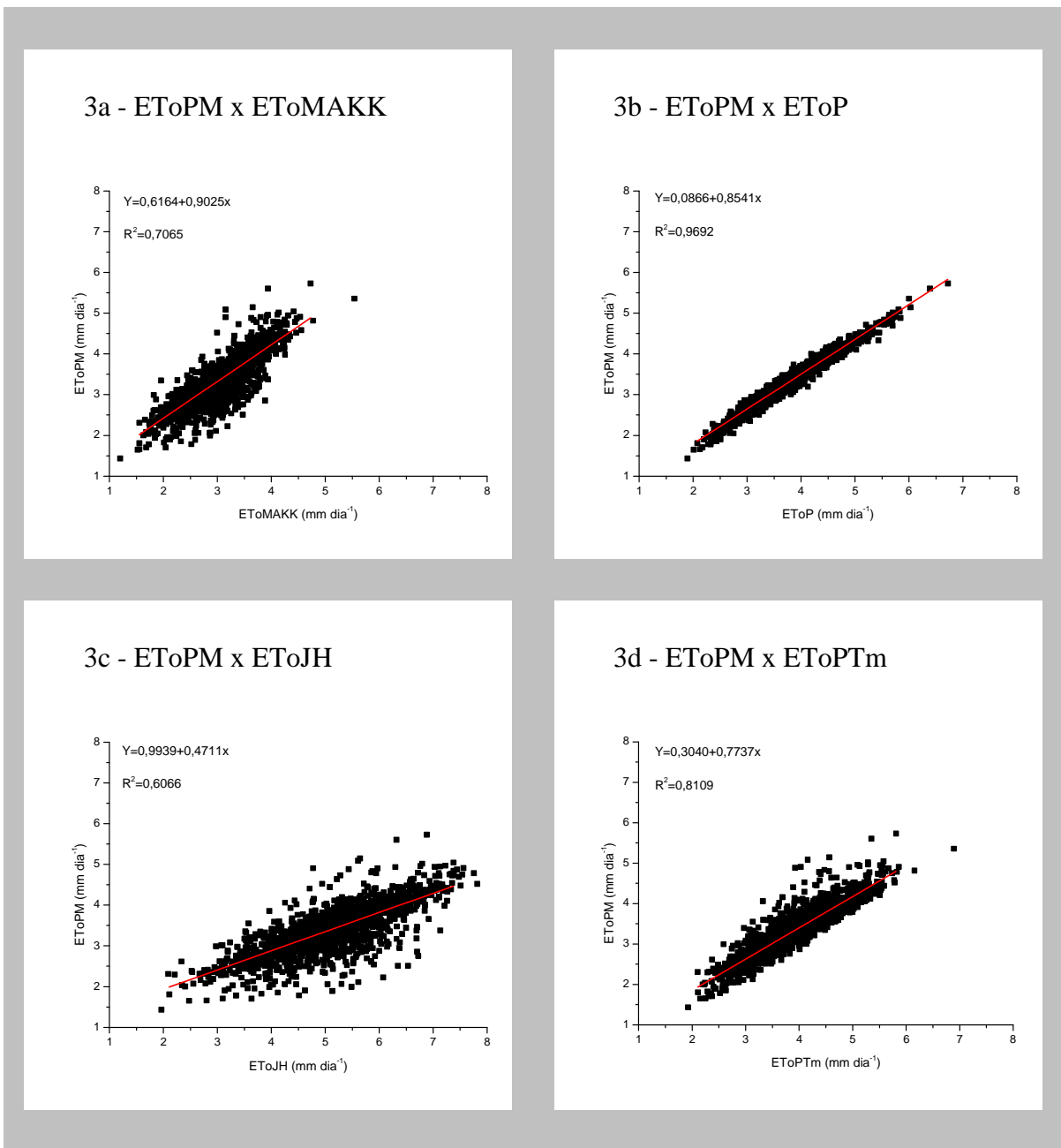


Figura 3 - Correlações entre os valores quinqüidias da ETo estimados pelos modelos Makkink-EToMAKK (a), Penman-EToP (b), Jensen-Haise-EToJH (c), Priestley & Taylor modificado-EToPTm (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia^{-1} , no município de Rio Branco, AC.

As correlações entre os modelos avaliados, ou seja, as variáveis independentes e o modelo padrão (EToPM), situado no eixo vertical, estão apresentadas nas Figuras 4(a) a 4(d), onde observa-se que o modelo EToTP (Figura 4c) evidenciou o melhor ajuste com valor de $R^2 = 0,8260$, seguido-se pelo modelo EToRA (Figura 4d), que apresentou a maior exatidão e coeficiente de determinação de 0,7066 e do modelo EToPs (Figura 4b) com $R^2 = 0,6423$. O modelo

EToHG apresentou o pior ajuste, com $R^2 = 0,6079$. O modelo EToTP apresentou a menor exatidão ($d = 0,7231$), conforme apresenta a Figura 4a.

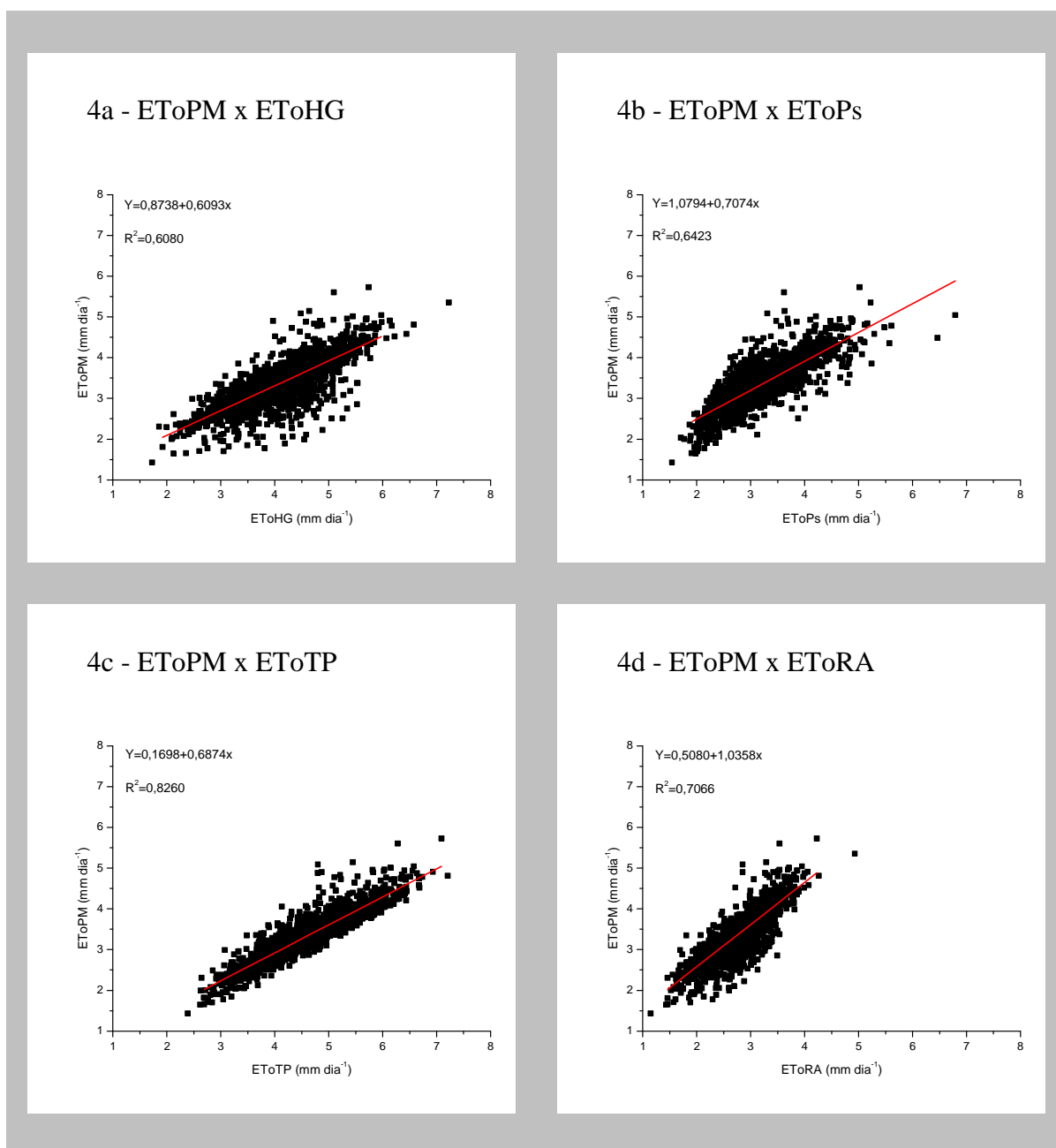


Figura 4 - Correlações entre os valores quiquídias da ETo estimados pelos modelos Hargreaves-EToHG (a), Penman Simplificado-EToPs (b), Tanner e Pelton-EToTP (c), Radiação-EToRA (d) e o modelo de Penman-Monteith-EToPM, em mm dia⁻¹, para a região de Rio Branco-AC, UFAC, 2008.

Os resultados da análise de variância obtidos nessa pesquisa, indicam diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste t entre todos os modelos avaliados, denotando de acordo Gavilán Zafra (2005) e Fernandes(2006), a possibilidade de calibração regional desses modelos antes da sua utilização,

possibilitando assim, a melhoria do desempenho dos mesmos.

Os resultados das análises estatísticas, referentes aos modelos utilizados nas estimativas da ETo, a partir de dados quinçidiais, (Tabela 7) após a calibração em relação ao modelo padrão (EToPM). Baseando-se nos valores de SEEp (Tabela 7), pode-se classificar os modelos de estimativa da ETo, tendo como padrão o modelo de EToPM, em ordem decrescente de prioridade para a localidade de Rio Branco, AC: EToP (0,3600 mm dia⁻¹), EToMAKK (0,4085 mm dia⁻¹), EToPs (0,4103 mm dia⁻¹), EToRA (0,4913, mm dia⁻¹), EToPT_m (0,5235 mm dia⁻¹), EToHG (0,6988 mm dia⁻¹), EToTP (0,9649 mm dia⁻¹) e EToJH (1,3172 mm dia⁻¹).

TABELA 7 - Coeficiente de calibração local (b_c), erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE) e erro-padrão de estimativa ponderado (SEEp), referentes aos modelos de estimativa da ETo para a região de Rio Branco-AC, UFAC, 2008. a partir de dados climatológicos médios quinçidiais.

Métodos	b_c	ASEE (mm dia ⁻¹)	SEEp (mm dia ⁻¹)
EToMAKK	1,0996	0,3271	0,4085
EToP	0,8760	0,1012	0,3600
EToJH	0,6626	0,4026	1,3172
EToPT _m	0,8486	0,2534	0,5235
EToHG	0,8171	0,3894	0,6988
EToTP	0,7231	0,2397	0,9649
EToPs	1,0300	0,4024	0,4103
EToRA	1,2156	0,3206	0,4913

Os coeficientes de correlação “r”, exatidão “d”, desempenho “c”, variação “cv”, dos métodos avaliados em relação ao padrão (EToPM), a classificação dos métodos conforme os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), para a região de Rio Branco-AC, estão apresentados na Tabela 8. O método EToP apresentou o melhor desempenho entre os modelos testados (muito bom, $c=0,76$) e o menor coeficiente de variação de 3,32%. Do mesmo modo, Machado e Mattos (2000) concluíram que o método de Penman, apresentou o melhor desempenho na estimativa da ETo, em relação ao método padrão (EToPM), a partir de médias quinçidiais da ETo.

Os modelos EToMAKK ($c=0,66$) e EToPs ($c=0,66$) também apresentaram desempenhos satisfatórios (Tabela 8), ou seja, bom. Resultados semelhantes aos obtidos por Reis et al. (2007), a partir de dados médias quinçidiais, em que os modelos de Penman e Makkink, apresentaram desempenhos muito bom e bom, respectivamente.

TABELA 8. Coeficientes de correlação (r), exatidão (d), desempenho (c), variação (cv) e classificação dos métodos de estimativa da ETo com dados climatológicos médios quinçiduais, segundo os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), para o município de Rio Branco-AC.

Métodos	Índices				Classificação
	"r"	"d"	"c"	"cv" (%)	
EToMAKK	0,84	0,79	0,66	10,76	Bom
EToP	0,98	0,78	0,76	3,32	Muito bom
EToJH	0,78	0,47	0,37	5,46	Péssimo
EToPT _m	0,90	0,63	0,57	7,26	Sufrível
EToHG	0,78	0,43	0,34	7,60	Péssimo
EToTP	0,91	0,01	0,09	6,49	Péssimo
EToPs	0,80	0,82	0,66	16,15	Bom
EToRA	0,84	0,57	0,48	11,89	Mau

Os maiores valores de SEE entre os modelos avaliados foram de 0,6565 mm dia⁻¹, 0,6812 mm dia⁻¹, 0,8513 mm dia⁻¹, 1,3220 mm dia⁻¹ e 1,7677 mm dia⁻¹, obtidos pelo métodos EToPT_m (c=0,57), EToRA (c=0,48), EToHG (c=0,34), EToTP (c=0,09) e EToJH (c=0,37) (Tabela 7), respectivamente, os quais, apresentaram desempenho péssimo (EToHG, EToTP; EToJH), sufrível (EToPT_m) ou mau (EToRA) (Tabela 8), com restrições de uso para as condições climáticas na localidade em estudo.

5 CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados obtidos a partir de dados climatológicos base de dados diários e dados médios quinqüidiais, conclui-se que os métodos EToP, EToJH, EToPT_m, EToHG e EToTP superestimaram a ETo, enquanto os modelos EToMAKK, EToPs e EToRA, subestimaram a ETo em relação ao modelo EToPM para a localidade em estudo;

De acordo com a análise comparativa entre os métodos de estimativa da ETo calibrados a partir de dados climatológicos diários, classifica-se os métodos para a região de Rio Branco, AC, em ordem decrescente de prioridade: EToP, EToMAKK, EToPT_m, EToPs, EToRA, EToHG, EToTP e EToJH

Mediante análise comparativa entre os métodos de estimativa da ETo calibrados a partir de dados climatológicos médias quinqüidiais, foram classificados em ordem decrescente de prioridade para a localidade de Rio Branco, AC: EToP, EToMAKK, EToPs, EToRA, EToPT_m, EToHG, EToTP e EToJH;

Para a região de Rio Branco, AC, os métodos de EToP, EToMAKK e EToPT_m apresentaram os melhores desempenhos na estimativa da ETo em relação ao modelo padrão-EToPM, com base nos critérios de Camargo e Sentelhas, a partir de dados climatológicos diários;

Os modelos EToP, EToMAKK e EToPs, atendem satisfatoriamente à estimativa da ETo na região de Rio Branco, AC, em comparação ao modelo padrão EToPM, segundo os critérios de Camargo e Sentelhas, a partir de dados climatológicos quinqüidiais;

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos EToHG, EToJH, EToTP e EToRA, apesar de terem sido classificados com desempenho péssimo ou sofrível, segundo os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), a partir de dados climatológicos diários, os mesmos apresentaram elevados coeficientes de correlação, o que sugere, que este índice isolado, não é suficiente para a seleção ou indicação de modelos regionais ;

Os modelos EToTP e EToPT_m, embora tenham apresentado elevados valores para o coeficiente de correlação, a partir de dados climatológicos quinqüidiais, evidenciaram desempenhos insatisfatórios péssimo e sofrível para a estimativa da ETo de acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997)..

REFERÊNCIAS

AL-GHOBARI, H. M. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. **Irrigation Science**, v. 19, n. 2, p. 81-86, 2000.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v, 112, n. 2, p. 139-155, May, 1986.

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

ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**, v. 43, n. 2, p.1-34, 1994.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Dranaige Paper, 5), 1998. 300 p.

ALVES SOBRINHO, T.; BONOMO, R; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Dourados e Ponta Porã, Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. **Resumos...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. CD Rom.

ALVES SOBRINHO, T.; BONOMO, R.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Dourados e Ponta Porã, Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBEA, 1997. CD-Rom.

ARAÚJO, W.F.; COSTA, S.A.A.; SANTOS, A.E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, Roraima. **Caatinga**, Mossoró, RN, v.20, n. 4, p. 84-88, 2007.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Agronômicas, 1981, 95 p. (IPAGRO – Boletim Técnico, n. 7).

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 (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2004.

BORGES, A. C., MEDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na bacia do rio Jacupiranga, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v. 11, n. 3, p. 293–300, 2007. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em: 02 out. 2007.

BURMAN, R. D. ; NIXON, P. R. ; WRIGTH, J. L. ; PRUIT, W. O. Water requirements. In: JENSEN, M. E., (Ed.). **Design and operation of farm irrigation system**. St. Joseph: ASAE, 1983. cap. 6, p. 189-232.

CABRAL, R. C. **Evapotranspiração de referência de Hargreaves (1974) corrigida pelo método de Penman Monteith/FAO (1991) para o Estado do Ceará**. 2000. 81 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2000.

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

CAMARGO, A. P.; 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, RS, v. 5, n. 1, p.89-97, 1997.

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**, Santa Maria, RS, v.14, n. 2, p. 187-195, 2006.

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

CURI, S. **Evapotranspiração e coeficientes de cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Santo Antônio do Leverger-MT**. 2000. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária-Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT, 2000.

DANTAS, R. T.; SOUZA, W. M.; ARAÚJO, J. A. P. *Transmitância Atmosférica em três municípios do estado da Paraíba*. In: *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro-RJ. Anais: Rio de Janeiro-RJ: SBMET, 2000, p. 39-54.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande, p. 306-310, 1994.

ELTINK, M. G.; PEREIRA, F. A. C.; FOLEGATTI, M. V. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 5. 1977. Piracicaba, **Resumos...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1997, p. 517.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de, evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHEI, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 13, n. 2, p. 250-255, 2005.

GAVILÁN ZAFRA, P. **Calibración Regional de la ecuación de Hargreaves en un ambiente Semiárido**. IFAPA. Área de Producción Ecológica y Recursos Naturales. Córdoba – Espanã, 2005: Disponível em www.cotr.pt/informacao/web2/Papers/25.pdf : acesso em 12-11-2007.

GALVANI, E. **Avaliação agrometeorológico do cultivo de pepino (*Cucumis sativas L.*) em ambientes protegido e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão**. 2001. 124 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

GLOVER, J., MCCULLOCH, J.S.G., 1958a. **The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine in high-altitude tropics**. Q.J.R. Meteorol. Soc., 84 : p.56-60.

GLOVER, J., MCCULLOCH, J.S.F., 1958b. **The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine**. Q.J.R. Meteorol. Sco., 84: 172-175.

HENRIQUE, F. A. N. **Evapotranspiração de referência em Campina Grande, PB**. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2006.

HENRIQUE, F. A. N.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Santa Maria, RS, v. 11, n. 6, p. 594-599, 2006: Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em: 22 out. 2007.

FARIA, R. A.; CARVALHO, D. F.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, M. A. A. Influência do método de estimativa da evapotranspiração de referência na demanda de irrigação suplementar para o milho (*Zea mays L.*), na bacia do Rio Verde Grande (MG). **Ciência Agrotécnica**, Lavras, MG, v. 24 (Edição Especial), p. 187-196, dez., 2000.

FERANDES, L. C., F. **Avaliação de diversas equações empíricas de Evapotranspiração. Estudo de Caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão, RJ**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FERNANDES, A. L. T.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R. Avaliação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura do crisântemo (*Chrysanthemum spp.*) cultivado em estufa plástica. **Irriga**, Botucatu, SP, v. 11, n. 2, p. 139-149, 2006.

FREITAS, A. F.; BEZERRA, F. M. L.; FONTENELE, F. C. B. Determinação da evapotranspiração máxima e real e do fator de sensibilidade ao déficit hídrico da melancia em Canindé, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v. 3, n. 3, p. 298-303, 1999. Disponível em: www.scielo.br/pdf/eagri/v24n2/v24n2a11.pdf; Acesso em 21-10-2007.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation and Irrigation Engineering**, v. 89, p. 15-41, 1963.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p: Disponível em: www.scielo.br/pdf/eagri/v24n2/v24n2a11.pdf; Acesso em 21-10-2007.

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

MAIA, A. J.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; OLIVEIRA FILHO, F. X. Comparação de diferentes métodos de estimativa da ETo com o método de Penman-Monteith-FAO, em Mossoró-RN. In: **IX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Santa Maria, RS, Relações Solo-Planta-Atm, 1999, CD Rom.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida 'Tahiti'**. 2000. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2000.

MAKKINK, G, F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**. Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957: Disponível em: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid; Acesso em 12-08-2008.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência através do programa REF-ET, para duas localidades do Nordeste.** 1996. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 1996.

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

MEDEIROS, A. T.; FOLEGATTI, M. V. Relação entre evapotranspiração de referência para grama e alfafa. (compact disc) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, Fortaleza, 2000. Fortaleza: SBEA, 2000.

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. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2002.

MENDONÇA, J. C. **Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) para a Região Norte Fluminense, RJ.** 2001. 70 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2001.

MELO, M. A. N. **Determinação da necessidade térmica, adequação de coeficiente da cultura e efeito da irrigação e da adubação nitrogenada na produção do maracujazeiro amarelo.** 2001. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2001.

MUKAMMAL, E. I.; BRUCE, J. P. **Evaporation measurements by pan atmometer:** International Union of Geodesy and Geophysics. Association of Scientific Hydrology, 53: 408-20 apud CHANG, JEN-HU. 1968. Climate and Agriculture: an ecology survey. Chicago, Aldine.

OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F.; ROMÃO, P. A. CORTÊS, F. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, GO, v. 31, n. 2, p. 121-126, 2001. Disponível em: www.biosciencejournal.ufu.br/include/getdoc.php?id=916&article=268&mode=pdf

OLIVEIRA, A. D.; 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, RS, v. 11, n. 2, p. 253-260, 2003.

OLIVEIRA, R. Z.; OLIVEIRA, L. F. C.; WEHR, T. R.; BORGES, L. B.; BONOMO, R. Comparação de metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Goiânia,GO. **Biosci. J.** Uberlândia, MG, v. 21, n. 3, p. 19-27, 2005.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres Ltda.1981. 425 p.

MOLION, L.C.B.; DALLAROSA, R.L.G. **Pluviometria da Amazônia: são os dados confiáveis?** Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática, 5(3): p.40 - 42, 1990;

PACHECO, J. M. **Evaporatranspiração máxima e coeficientes de cultura de crotalária (*Crotalaria juncea* L.)**. 2000. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária-Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT, 2000.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society of London**. Série A, v. 193, p.120-145, 1948.

PENMAN, H. L. Evaporation: Introduction survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.4, n. 1, p. 9-29, 1956.

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

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. O parâmetro de Priestley-Taylor para a estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 5, n. 1, p. 83-87, 1997b.

PEREIRA, A. R. **Introdução à micrometeorologia**. Piracicaba, SP: ESALQ. Departamento de Física e Meteorologia, 1998. 70 p.

PEZZOPANE, J. E. M., PEDRO JÚNIOR, M. J., ORTOLANI, A. A., MEYER, N. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 3, p. 1-4, 1995.

PRÈSCOTT, J. A. **Evaporation from a water surface in relation to solar radiation**. Transactions of the Royal Society of South Australia. v. 64, p. 114-118, 1940.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81-82, 1972. Disponível em: library.wur.nl/wda/dissertations/dis3768.pdf/ Acesso em 21-12-2007.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 466 p.

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

SALATI, Eneas. **The Climatology and Hydrology of Amazon.** In: Amazonia. Key Environments. New York: Pergamon Press, 1985, p. 18-48; Disponível em: www.amazonia.bo/bibli/mitos.pdf.; Acesso em 14-06-2008.

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

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 f Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2001.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1996.

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** 1998. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 1998.

SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, F. A. C.; VILLA NOVA, N. A.; MAGGIOTTO, S. R. Variação sazonal do parâmetro de Priestley-Taylor para estimativa diária da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 8, n. 1, p. 49-53, 2000.

SILVA, V. P. R.; DANTAS, R. T.; CAMPOS, J. H. B. C.; GUEDES, M. J. F. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith – FAO/56, Hargreaves e Tanque Classe A em períodos diários mensais.** In: *XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e III Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia*, v. 2, n. 2, 2001, p.467-468.

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. 93 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2003.

SILVEIRA, S. S. **Análise da componente principal como ferramenta para estimar os parâmetros meteorológicos de maior influência para o processo da evapotranspiração no Estado do Ceará.** 2000. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2000.

SMITH, M., (Ed.). **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements** . Rome: FAO, 1991. 45p. Disponível em: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415

SOUSA, J. W. **Efeito do polietileno difusor de luz em ambiente protegido cultivado com pimentão (*Capsicum annuum* L.).** 2002. 113 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2002.

SOUSA, J. W.; FERRAZ, P. A.; SOUZA, M. L. A. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Rio Branco, Acre. In: Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem, 18, 2008, São Mateus. **Anais...** São Mateus: ABID, 2008. **CD-Rom.**

TEIXEIRA, P. R.; CERQUEIRA, R. C. C. M.; SOUSA, W. J. de.; BORBA, J. C. C.; SÁ, M. O.; QUERINO, C. A. S.; MEIXNER, F. X.; MOURA, M. A. L. **Estudo comparativo dos componentes do balanço de radiação para um dia de céu claro e outro de céu parcialmente nublado na Amazônia.** In: *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza-CE, 2004, pp. 698-707.

THORTWAITE, G. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geophysical Review**, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.

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

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

VESCOVE, H. V. **Comparação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP**. 2004. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, SP, 2004.

VIEIRA, J. P. G.; SOUZA, M. J. H.; SOUSA, F. A.; TEIXEIRA, J. M. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Diamantina, MG. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15, 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBAGRO, 2007. **CD-Rom**.

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1987. 22 p.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia Hidrológica**, Rio de Janeiro: ABRH, 1989. cap. 3, p. 145-197. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 2).

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Acta Amazônica**, Manaus, AM, v. 6, n. 2, p. 215-258, 1976.

WILLMONT, C. J.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, E. M.; ACKLESON, S. G.; O'DONNEELL, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p.8995-9005, 1985.

WILLMONT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**. v. 2, p. 184-197, 1981. Disponível em: www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_no_ntnu_diva-391-2_fulltext.pdf.: Acesso em 19-11-2007