

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA DUAS  
LOCALIDADES DO NORDESTE ATRAVÉS DE OITO MÉTODOS,  
UTILIZANDO O PROGRAMA REF-ET**

C342831  
Disponível

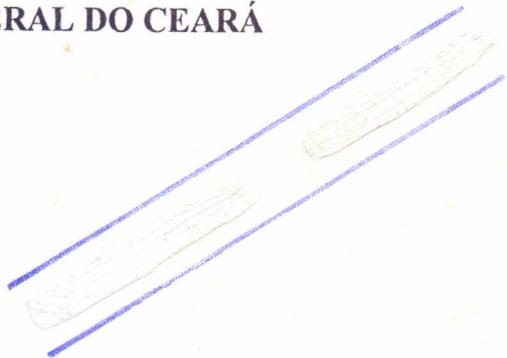
---

**ALMIRO TAVARES MEDEIROS**

U42

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**



T  
631.587  
M438e  
1996  
ex.02

**FORTALEZA - 1996**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

UFC/BU/BCT 23/05/1997



R666149  
C342831  
T631.587

Estimativa da evapotranspiracao  
de refer

M438e

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M438e Medeiros, Almiro Tavares.

Estimativa da evapotranspiração de referência para duas localidades do Nordeste através de oito métodos, utilizando o programa REF-ET / Almiro Tavares Medeiros. – 1996.  
109 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 1996.

Orientação: Prof. Dr. Francisco de Souza.

1. Engenharia Agrícola. I. Título.

CDD 630

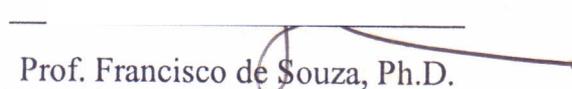
---

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Agronomia com Área de Concentração em Irrigação e Drenagem, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida instituição.

A citação de qualquer texto desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

  
Almiro Tavares Medeiros

Dissertação Aprovada em: 03/09/96

  
Prof. Francisco de Souza, Ph.D.

Orientador da Dissertação

  
Prof. Francisco Marcus Lima Bezerra Dr.

Conselheiro

  
Prof. Adunias dos Santos Teixeira, MS.

Conselheiro

In memoria

Jeremias (pai)

Valmir (cunhado)

A minha mãe Eurídice e irmãos Aderson,  
Adonias, Anselmo, Alceu, Arlete e Arnilda

minha gratidão

À minha Esposa,  
Maria Angelita da Silva Leal  
Medeiros  
Aos meus Filhos,  
Rodrigo, Camila e Daniel, pelo  
apoio e compreensão  
A Deus, pela fé, amor e  
discernimento

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade e apoio concedido a realização deste trabalho.

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo concedida

Ao Professor Francisco de Souza, pela sabedoria e discernimento com que conduziu sua orientação e pela amizade e compreensão.

Aos professores Vanglésio, Moisés Custódio, Luciano Paiva, Paulo Teodoro e Luis Carlos pela colaboração prestada ao trabalho.

A todos os professores do Curso de Mestrado e do Departamento de Engenharia Agrícola pelo ensinamentos transmitidos e pela amizade.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela colaboração e incentivo dispensados.

Aos colegas do Curso de Mestrado que de qualquer forma incentivaram e contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

	LISTA DE TABELAS .....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	x
	RESUMO .....	xiii
	ABSTRACT .....	xiv
1 -	<u>INTRODUÇÃO</u> .....	01
2 -	<u>REVISÃO DE LITERATURA</u> .....	04
2.1.	<u>Conceito de evapotranspiração</u> .....	04
2.2.	<u>Aspectos inerentes a estimativa da evapotranspiração de referência</u> .....	06
2.3.	<u>Determinação da evapotranspiração</u> .....	10
2.3.1.	Medição da evapotranspiração .....	10
2.3.2.	Estimativa da Evapotranspiração .....	11
2.4.	<u>Estudo comparativo dos métodos de estimativa de evapotranspiração de referência</u> .....	20
3 -	<u>METODOLOGIA</u> .....	30
3.1.	<u>Coleta de dados</u> .....	30
3.2.	<u>Programa REF-ET</u> .....	35
3.3.	<u>Estimativa de Evapotranspiração</u> .....	37
3.3.1.	Método de Penman - 63 Versão Original .....	37
3.3.2.	Método de Penman Kimberly 1982 - Alfafa como referência .....	39
3.3.3.	Método da Radiação FAO - 24 .....	40
3.3.4.	Método de Hargreaves relacionado a grama.....	41
3.3.5.	Método de Penman Corrigido pela FAO .....	41
3.3.6.	Método de Penman - Monteith .....	42
3.3.7.	Método de Blaney - Criddle FAO - 24 .....	44
3.3.8.	Método do Tanque de Evaporação FAO - 24 .....	45
4 -	<u>RESULTADO E DISCUSSÃO</u> .....	46

4.1.	<u>Evapotranspiração de referência calculada por oito métodos com dados médios mensais.</u> . . . . .	47
4.1.1.	Evapotranspiração de referência da estação experimental do vale do curu (FEVC) Pentecoste - CE, com dados médios mensais no período de 1966 a 1986. . . . .	47
4.1.2.	Evapotranspiração de referência da estação meteorológica de Mossoró - RN, com dados médios mensais no período de 1970 a 1982. . . . .	54
4.1.3.	Comparação entre as duas localidades (Mossoró e Pentecoste) . . .	61
4.2.	<u>Evapotranspiração de referência calculada por oito métodos com dados diários médios</u> . . . . .	65
4.2.1.	Evapotranspiração de referência média diária para o período de 1974 a 1978 no Vale do Curu . . . . .	65
4.2.2.	Evapotranspiração de referência média diária totalizados para cada mes, para o período de 1974 a 1978 (Estação Experimental do Vale do Curu). . . . .	78
4.3.	<u>Evapotranspiração de referência calculada por oito métodos com dados diários totalizados (1977 e 1979)</u> . . . . .	85
4.3.1.	Evapotranspiração de referência totalizados para o ano de 1977. . .	85
4.3.2.	Evapotranspiração de referência totalizados para o ano de 1979. . .	90
4.4.	Comparativo de resultados totalizados em meses para o período de 1974 a 1978 e os anos de 1977 e 1979, respectivamente um ano normal e outro seco. . . . .	95
4.5.	<u>Análise de regressão dos dados médios diários, para o período de 1974 a 1978 da Estação Experimental do Vale do Curu, Pentecoste - CE.</u> . . . . .	98
5 -	<u>CONCLUSÕES</u> . . . . .	105
6 -	<u>RECOMENDAÇÕES</u> . . . . .	107
7 -	<u>LITERATURA CITADA</u> . . . . .	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
01	Dados da estação agrometeorológica da Fazenda Experimental do Vale do Curu (1966 - 1986) . . . . . 31
02	Dados climáticos da estação meteorológica de Mossoró (1970 - 1982) 31
1.a.	Dados Complementares referentes a estação experimental do vale do curu, necessários a execução do programa. . . . . 34
2.a.	Dados complementares referentes a estação meteorológica de Mossoró, necessários a execução do programa. . . . . 34
03.	Evapotranspiração por oito métodos referentes a estação experimental do vale do curu (1966 - 1986). . . . . 49
04.	Evapotranspiração por oito métodos referentes a estação meteorológica de Mossoró (1970 - 1982). . . . . 56
05.	Estimativa da Evapotranspiração de referência referente ao mês de maior demanda e média anual. . . . . 62
06.	Evapotranspiração de referência média diária, referente ao mês de fevereiro (FEVC - 1974 - 1978) . . . . . 67
07.	Evapotranspiração de referência média diária, referente ao mês de outubro (FEVC - 1974 - 1978) . . . . . 68
08.	Resultados de cálculos de evapotranspiração média diária para os oitos métodos totalizados em meses (1974 - 1978). . . . . 79
09.	Evapotranspiração diária totalizados em meses, para os oito métodos (1977) . . . . . 86
10.	Evapotranspiração diária totalizados em meses, para os oito métodos (1979) . . . . . 91

11.	Evapotranspiração de referência a partir de dados médios (1974-1978), dos anos de 1977 e 1979, totalizados em meses, para o método de Penman-Monteith (Pmon).....	96
12.	Análise de regressão para os oito métodos, sendo Penman - Monteith, considerado padrão de comparação, usando dados médios diários, para os meses de janeiro a abril (1974 - 1978).....	99
13.	Análise de regressão para os oito métodos, sendo Penman-Monteith, considerado padrão de comparação, usando dados médios diários, para os meses de maio a agosto (1974 - 1978).....	100
14.	Análise de regressão para os oito métodos, sendo Penman-Monteith, considerado padrão de comparação, usando dados médios diários, para os meses de setembro a dezembro (1974-1978).....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
01 Parâmetro climáticos de acordo com os dados mensais da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC - 1966 a 1986) .....	48
02 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman - Monteith (PMon), Penman Kimberly (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63 Pn), baseada em dados médios mensais (1966 a 1986) .....	51
03 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman - Monteith (PMon), Hargreaves (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), baseada em dados médios mensais (1966 a 1986) .....	52
04 Parâmetros climáticos de acordo com dados mensais da estação meteorológica de Mossoró - RN (1970 a 1982) .....	55
05 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de Penman - Monteith (PMon), Penman Kimberly, 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63Pn), baseada em dados médios mensais (1970 a 1982) .....	58
06 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman - Monteith (PMon), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), baseada em dados médios mensais (1970 a 1982) .....	59
07 Parâmetros climáticos referentes a dados médios diários da fazenda experimental do vale do curu (FEVC), mês de fevereiro, período de 1974 a 1978. ....	69

08	Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63Pn), mês de fevereiro, período de 1974 a 1978. ....	71
09	Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman - Monteith (PMon) Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), mês de fevereiro, período de 1974 a 1978. ....	72
10	Parâmetros climáticos referentes a dados médios diários da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC), no período de 1974 a 1978, mês de outubro. ....	74
11.	Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63Pn), mês de outubro, período de 1974 a 1978. ....	75
12.	Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman - Monteith (PMon), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), mês de outubro, período de 1974 a 1978. ....	76
13.	Evapotranspiração média diária (1974-1978), totalizados em meses para os métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn), Penman 1963 (63Pn) e Hargreaves 1985 (Harg) . . . . .	80
14.	Evapotranspiração média diária (1974-1978), totalizados em meses para os métodos de: Penman-Monteith (PMon), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação	

FAO (FPan) . . . . .	82
15. Evapotranspiração diária (1977), totalizados em meses para os métodos de: Penman - Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn), Penman 1963 (63Pn) e Hargreaves (Harg) . . . . .	88
16. Evapotranspiração diária (1977), totalizados em meses para os métodos de: Penman-Monteith (PMon), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan) . . . . .	89
17. Evapotranspiração diária (1979), totalizados em meses para os métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen); Penman Corrigido pela FAO (FcPn), Penman 1963 (63Pn) e Hargreaves 1985 (Harg). . . . .	93
18. Evapotranspiração diária (1979), totalizados em meses para os métodos de: Penman-Monteith (PMon), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan). . . . .	94
19. Evapotranspiração de referência a partir de dados médios diários de 1974 a 1978, dados diários dos anos de 1977 e 1979, totalizados em meses para o método de Penman-Monteith (PMon). . . . .	97

## RESUMO

Foram analisados resultados de estimativas de evapotranspiração de referência, a partir de dados médios mensais, dados médios diários e dados diários obtidos na Fazenda Experimental do Vale do Curu, nos períodos de 1966 a 1986, 1974 a 1978 e para os anos de 1977 e 1979, além de dados médios mensais em relação a Estação de Meteorologia de Mossoró, no período de 1970 a 1982, utilizando o software REF-ET versão 2.1, para estas análises. O método de Penman-Monteith foi considerado como o padrão para comparação. O estudo comparativo do método de Penman-Monteith com os outros métodos conhecidos tais como Penman Kimberly 1982, Penman Corrigido pela FAO, Penman 1963 versão original, Hargreaves 1985, Radiação FAO, Blaney-Criddle Corrigido pela FAO e Tanque de Evaporação FAO, foi realizado através de gráficos e tabelas, contendo os resultados de evapotranspiração de referência, tomando-se a alfafa como cultura referência. Com relação aos dados diários, foram escolhidos dois anos (1977 e 1979) como representativo de um ano normal e seco, respectivamente, de acordo com a ocorrência de precipitação no local de estudo. Os resultados mostram que em relação a análise mensal (Pentecoste e Mossoró), o método que melhor se ajustou a Penman-Monteith, foi o método de Penman Corrigido pela FAO. No caso de dados médios diários, melhor ajuste foi observado pelos métodos de Penman Kimberly 1982 (março a novembro), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (janeiro e fevereiro) e Penman Corrigido pela FAO em dezembro. Bons ajustes foram também obtidos para os métodos de Penman 1963, Hargreaves 1985 e Radiação FAO. O método que menos se ajustou a Penman-Monteith, foi o Tanque de Evaporação FAO, subestimando os valores em relação ao padrão de comparação. Observou-se ainda uma tendência de superestimativa do método de Penman Corrigido pela FAO.

## ABSTRACT

The software REF-ET release 2.1 was applied to estimate the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in Pentecoste-CE and Mossoró-RN. In Pentecoste datum were collected from the Fazenda Experimental Vale do Curu's weather station (set of datum from 1966 to 1986, from 1974 to 1978, and for 1977 and 1979), and in Mossoró from the ESAM weather station (set of datum from 1970 to 1982). The set of datum of 1977 and 1979 was used as representative of a dried and rained year, respectively. In all simulations, alfalfa was used as a reference crop. Using the software, the ET<sub>o</sub> was calculated through the following methodologies: Penman Kimberly 1982, FAO-Penman 1973, Penman 1968, Hargreaves 1985, FAO-Radiation, FAO-Blaney Criddle, Class .A. Pan, and Penman-Monteith, that was used as the standard for evaluating the other approaches. The results show that, in the monthly analyses at both sites, the FAO-Penman method best estimate the Penman-Monteith ET<sub>o</sub> values. However, in the diary analyses, the result depends on the month analyzed. Thus, the Penman Kimberly 1982 from March to November, the FAO-Blaney Criddle in January and February, and FAO-Penman in December appear to best approach the Penman-Monteith ET<sub>o</sub> values. It was even verified that the Penman 1963, Hargreaves 1985, and FAO Radiation methods produces acceptable values for ET<sub>o</sub>. In general, however, the Class .A. Pan approach results in the highest deviation of ET<sub>o</sub> values. It was also verified that the FAO-Penman approach tends to overestimate the ET<sub>o</sub>.

## 1 - INTRODUÇÃO

Em todo o mundo observa-se uma crescente demanda de água para abastecimento urbano, industrial e irrigação. Os estudiosos, preocupados com um possível colapso futuramente, têm incrementado pesquisas visando a utilização racional desse bem material tão precioso.

No que se refere ao uso racional da água na agricultura irrigada, a pesquisa se preocupa com a eficiência com que esse bem é utilizado. No processo de determinação da quantidade de água utilizada pelas culturas, para sua sobrevivência e produção, o cálculo da evapotranspiração de referência é de fundamental importância.

Existem duas maneiras de se obter a evapotranspiração de referência: através de medidas diretas ou pela utilização de equações empíricas como forma de estimativa. As medidas diretas demandam tempo e elevado custo, por vezes não correspondendo ao resultado esperado. Na estimativa, o pesquisador se depara com uma série de modelos, que as vezes são adaptados a determinadas condições locais onde os mesmos foram desenvolvidos.

Um modelo pode não atender as condições propostas de um determinado local. Entre os vários modelos-desde os mais simples, como de THORNTHWAITE (1948) ao mais complexo como o de PENMAN (1948), que envolvem diversas variáveis - existem uma gama de fórmulas propostas para a estimativa da evapotranspiração de referência. O papel do pesquisador é selecionar a formula mais conveniente para as condições locais.

Atualmente, no Nordeste brasileiro - e especificamente no Ceará, o trabalho proposto por HARGREAVES (1974) que calculou a evapotranspiração potencial (ETp) para diversas localidades, é o mais utilizado. Pesquisas recentes, como as desenvolvidas por SOUZA & YODER (1994), têm indicado que o

referido trabalho pode não ser o mais adequado para estimar a ETp nas condições de semiaridez do Nordeste. Na realidade o próprio Hargreaves desenvolveu um modelo (HARGREAVES, 1985), baseado nas temperaturas máxima e mínima que correspondem melhor as estimativas, dependendo dos dados locais e do período de tempo utilizado. Há necessidade, portanto, de que sejam analisados os resultados de Hargreaves.

Os métodos que se baseiam na física do fenômeno como aqueles baseados na fórmula de Penman, são mais complexos do ponto de vista computacional, tendo sido por isso, deixados historicamente em segundo plano apesar de sua importância. O desenvolvimento da informática, a partir de 1975, tem contribuído de forma decisiva para o avanço das estimativas de evapotranspiração de referência, através de simulações, avaliações e calibrações dos modelos existentes. Existem na atualidade programas disponíveis para microcomputadores que permitem a análise de grandes séries climatográficas, com os modelos mais complexos, em curto espaço de tempo. Entre estes programas está o REF-ET.

Segundo SMITH (1991), pesquisas mais recentes indicam o uso do modelo de Penman-Monteith como padrão mundial de comparação nas estimativas de evapotranspiração de referência, embora a maneira mais segura seja a medida desse parâmetro, com lisímetro de precisão (SMITH, 1991).

Recentemente, um lisímetro de precisão foi instalado na Estação Experimental do Vale do Curu (EMBRAPA) juntamente com uma estação micrometeorológica automática.

Os resultados de medição da evapotranspiração por este lisímetro, ainda não estão disponíveis para utilização. Portanto, faz-se necessário a realização de estudos com base em informações climáticas, para estimativas mais confiáveis desse parâmetro.

Utilizando as facilidades da microcomputação e os últimos resultados de estudos sobre a evapotranspiração, o presente trabalho teve por objetivo

elaborar uma análise comparativa entre oito métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, para duas localidades do Nordeste, tendo como padrão de comparação o método de Penman-Monteith. Os métodos utilizados são os seguintes: o padrão e mais Penman Kimberly 1982, Penman Corrigido pela FAO, Penman 1963, Hagreaves 1985, Radiação FAO, Blaney-Criddle Corrigido pela FAO e Tanque de Evaporação FAO. A partir desse estudo será possível identificar qual dos métodos melhor se aproxima do padrão de comparação (Penman-Monteith), tendo em vista as limitações de dados climáticos nas estações meteorológicas e de acordo com o período abordado, seja durante a estação chuvosa ou seca.

## 2 - REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 - Conceito de Evapotranspiração

O termo evapotranspiração foi introduzido por THORNTHWAITE (1948), que definiu Evapotranspiração Potencial (ETP) como a perda máxima de água de uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberto com vegetação em fase de desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos de energia advectiva local. Se qualquer dessas condições não forem atendidas tem-se a evapotranspiração real (ETR). PENMAN, 1956 (apud SILVA, 1989) definiu evapotranspiração potencial (ETP), como sendo o processo de transferência d'água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo.

Vários trabalhos foram publicados relacionados ao requerimento de água pelas culturas, entretanto merecem destaque os seguintes: a) a primeira edição do Manual 70 da ASCE (American Society of Civil Engineers), b) a segunda edição do Manual 70 da ASCE, c) a paper 24 da FAO e d) a revisão proposta por especialistas da FAO em 1990.

A primeira edição do Manual 70 da ASCE foi realizado pelo antigo Comitê do Uso Consuntivo de Água para as Culturas Irrigada e Vegetação Nativa, que iniciou seu trabalho em 1965. Um progresso limitado, ocorreu em 1968. Em 1969 efetivou-se uma maior revisão, até que em 1973 o Relatório de Uso Consuntivo foi terminado e finalmente publicado em 1974.

A segunda edição do Manual 70 da ASCE atualizou a primeira, sendo publicada em 1989 após várias revisões do Relatório do Uso Consutivo (1985 a 1987).

O Manual 24 da FAO, publicado em 1977 por DOORENBOS e PRUITT, teve o objetivo de orientar os pesquisadores com relação a determinação do requerimento de água pelas culturas. Os autores recomendam o cálculo da evapotranspiração das culturas, em três estádios seguintes: 1) determinação do efeito do clima no requerimento de água pelas culturas, dados pela evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) que representa, a taxa da evapotranspiração de uma extensa superfície com grama, com altura de 8 a 15 cm, cobertura uniforme, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e em crescimento ativo, com o solo completamente coberto e sem restrições de água; 2) o efeito das características da cultura no requerimento de água, dado pelo coeficiente da cultura (k<sub>c</sub>); 3) o efeito das condições locais e práticas agrícola no requerimento de água pelas culturas, advecção, dimensão do campo, disponibilidade de água, salinidade e métodos de cultivo e irrigação.

O Manual N<sup>o</sup> 70 da ASCE editado por JENSEN et al. (1990), objetiva: definir e interpretar a terminologia de evapotranspiração ou uso consuntivo; proporcionar treinamento de engenheiros, educadores e pesquisadores com um resumo breve dos fatores que controlam a evapotranspiração; descrever métodos modernos de medida e estimativa de evapotranspiração; descrever os fatores mais importantes a serem considerados na determinação do requerimento de água na irrigação para fazendas, projetos e bacias fluviais; resumir a medida representativa de evapotranspiração de culturas irrigadas; avaliar a precisão de vários procedimentos de estimativa sob os vários tipos de climas; apresentar melhoramentos para estimativa de evapotranspiração; apresentar uma bibliografia selecionada para informações adicionais.

O manual 24 da FAO é dividido em duas partes. Na primeira parte são apresentadas sugestões da aplicação de métodos bastante conhecidos que determinam a evapotranspiração de referência, que significa o nível de evapotranspiração para diferentes condições climáticas. Esses métodos são: Blaney-Criddle, Radiação, Penman e Tanque de Evaporação. Aborda as relações

entre evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), definido como - a taxa a qual a água, se disponível, deve ser removida do solo e da superfície de uma cultura específica, arbitrariamente chamada de cultura de referência, e evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) para diferentes culturas, estádios de crescimento, comprimento do período de crescimento e condições climáticas. Refere-se ainda aos efeitos ambientais no requerimento de água pelas culturas, incluindo variações climáticas agrícolas e métodos de irrigação. O Apêndice III do manual 24 da FAO discute a seleção e calibração de metodologia apresentadas e as fontes de dados.

A segunda parte aborda a aplicação de dados de requerimento de água pelas culturas no projeto, planejamento e operação de irrigação. Discute previsões de irrigação de acordo com o balanço de umidade no solo, no período normal e de pico, propondo um planejamento geral. Dá ênfase, a eficiência de irrigação e requerimento de água para práticas culturais e lavagem dos sais. Apresenta calendários de irrigação. Por fim são apresentadas sugestões de melhoramento dos mesmos para a irrigação de projetos em operação.

Segundo SMITH (1991) o Relatório de Consultores Especialistas nos Procedimentos para Revisão do Roteiro da FAO, para Previsões de Requerimento de Água pelas culturas, chegou a conclusão unânime que a equação combinada de melhor performance na estimativa de ET (evapotranspiração de referência) é a abordagem de Penman-Monteith. Participaram do encontro quatorze cientistas de alto nível, representando três organismos internacionais, além de grupos ligados a FAO.

## **2.2 - Aspectos Inerentes a Estimativa da Evapotranspiração de Referência**

A irrigação modifica as condições climáticas locais esfriando, tornando úmido e reduzindo a turbulência nas massas de ar que avançam de áreas não irrigadas para irrigadas. Isso reduz a fonte evaporativa potencial das massas de ar e a evapotranspiração correspondente (ALLEN e PRUITT, 1986). 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.

A radiação solar é o parâmetro mais sensível em todos os métodos combinados de Penman e baseados na radiação. Os métodos baseados na simples radiação correspondem melhor a realidade do que os combinados de Penman, isso no caso de não serem disponíveis os dados e na estimativa serem usados dados de estações próximas (AMATYA et al, 1992).

Segundo ALLEN (1990), a radiação solar ( $R_s$ ) em um dia de céu claro, é estimada como 75% da radiação no topo da atmosfera ( $R_a$ ). Ocorre, entretanto, que por vezes o céu está nebuloso, o que proporciona estimativas incorretas de  $R_s$ .

A equação de determinação de ET tendo somente dados de temperatura máxima e mínima, parece ser simples, mas na verdade é um processo que incorpora a maioria das interações climáticas que influenciam o potencial evaporativo (HARGREAVES<sup>1</sup>, 1993).

DOORENBOS e PRUITT (1977), recomendaram usar o valor de 2,0 para relação de ventos (dia/noite) onde as determinações da relação de velocidade do vento dia/noite não são disponíveis.

Com relação aos fatores climáticos segundo HARGERAVES (1993) o vento influencia a advecção, essa por sua vez pode ser positiva ou negativa e as interações do vento com a temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor, e outros, são difíceis de serem estimadas por equações.

A relação média de horas de sol atual para as horas de sol possíveis, podem ser previstas a partir da estimativa de radiação solar como:

$$n/N = 2,0 (R_s/R_a) - 0,5 \quad (1)$$

<sup>1</sup> HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. Logan. 1993.

onde:  $R_s$  - radiação total medida ou estimada (mm/dia - equivalente em água)

$R_a$  - radiação solar no topo da atmosfera para ondas curtas (mm/dia equivalente em água) ALLEN e PRUITT (1986)

Todas as equações de determinação da evapotranspiração, merecem ser recalibradas quando utilizadas em outras regiões geográficas. A calibração pode ser uma mudança total como a introdução do termo aerodinâmico (Penman), ao cálculo simplificado de coeficiente de regressão linear. Uma maneira de calibrar é efetuar medidas precisas de ET de referência, em lisímetros de precisão, ou por outros meios, segundo ALLEN e PRUITT (1986). Estes autores citam que Doorenbos e Pruitt sugeriram o uso da fórmula de Blaney-Criddle corrigido pela FAO, para estimativa de ET de referência para períodos de até 30 dias, devido as limitações implícitas nos métodos baseados na temperatura. Entretanto, quando o método é aplicado para medidas diárias de temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa mínima, bons resultados podem ser obtidos.

Devido a fórmula de Blaney-Criddle corrigido pela FAO (FB-C) ter sido desenvolvida usando dados de temperatura do ar para lisímetros de locais agrícolas adequadamente úmidos, o uso de temperaturas de áreas áridas causará superestimativas da ET de referência (ALLEN e PRUITT, 1986).

Segundo ALLEN, et al. (1987), a transpiração requer a difusão do vapor de água através dos estômatos das folhas das plantas. Visto que a função de resistência a difusão de vapor de água pela folha, opera em paralelo acima da superfície do solo, quando a área foliar aumenta, a resistência total do estômatos diminui (ou resistência da cobertura vegetal).

Segundo DOORENBOS e PRUITT (1977) citados por SILVA (1989), o melhor método de estimativa de evapotranspiração é o de Penman modificado pela FAO ( $F_c P_n$ ), proporcionando estimativas de  $E_{Tr}$  com erros de  $\pm 10\%$  no verão e até  $20\%$  sob condições de baixa demanda evaporativa. Em segundo lugar, aparece o Tanque classe A com erro de  $\pm 15\%$ , dependendo do local de instalação

do tanque (o referido método não se ajustou bem, no caso da análise em questão). Os demais métodos, aqueles que envolvem radiação solar em suas formulações, são mais precisos em relação aos métodos não combinados, podendo apresentar erros maiores que 20% no verão. Os métodos baseados em dados de temperatura podem, em regiões úmidas e regiões com ventos fortes, subestimar a ETr em até mais de 25%.

Segundo MUKAMMAL e BRUCE (1960), citado por CHANG (1968), a importância relativa de radiação solar, umidade e ventos, na evapotranspiração potencial, é da ordem de 80:6:14, respectivamente. A radiação solar de acordo com os autores, é sem dúvida o parâmetro climático mais importante. Entretanto, em regiões onde ocorrem advecções fortes, seja local ou regional, observada comumente quando uma área úmida é circundada por área seca, a importância relativa da radiação líquida ( $R_n$ ) decresce, e em adição a  $R_n$ , a advecção, ou transferência de calor sensível das áreas secas circunvizinhas, poderá contribuir no processo de evapotranspiração, com energia até maior que aquela disponível a área úmida, aumentando desta forma a importância relativa da velocidade do vento e umidade na ETr.

[Segundo PEREIRA (1992), a evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água para as plantas no solo. A disponibilidade de energia depende do local (latitude e altitude), topografia da região e época do ano. A radiação (fonte de energia), conforme o autor, é controlada pelo poder refletor da superfície (coeficiente de reflexão - albedo) onde superfícies mais claras refletem mais, portanto, têm menos energia disponível. A demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar ( $E_a$ ), que quanto mais, maior será a evaporação. O autor lembra, que existe uma interação entre a demanda pelo ar, e a água disponível no solo.]

[PEREIRA (1992) cita que a elevação da evapotranspiração em áreas vegetadas circundadas por áreas secas (advecção) é maior na interface e decresce com a distância, a medida que o vento penetra na área úmida. Na área úmida a

evapotranspiração diminua a medida que caminha na direção dos ventos predominantes, até um valor limite inferior que é resultante somente do balanço vertical local de energia.)

O autor denomina de área tampão (área fetch, buffer ou bordadura) a distância entre a região de transição e o ponto onde a evapotranspiração é mínima.

PEREIRA (1992) lembra que a evapotranspiração obtida com alfafa, pode diferir do valor obtido com a grama, somente em função do albedo das superfícies.

Teorias de advecção local, tais como as de PHILIP (1959), VRIES (1959), e experimentos de RIDER e BRADLEY (1960), MILLAR (1964), indicam que assumir a uniformidade do microclima, pode levar a erros consideráveis, principalmente no caso em que campos irrigados encontram-se circundados por áreas secas, de acordo com SILVA (1989).

Em geral, quando a evapotranspiração potencial durante uma semana ou mais é maior que a radiação líquida ( $R_n$ ) naquele período, comprova a existência de advecção (BRAKKE et al., 1978), citado por SILVA (1989).

## **2.3 - Determinação da Evapotranspiração**

A evapotranspiração pode ser determinada por medidas diretas ou indiretas, ou caso não seja possível a medição, estimada através de fórmulas empíricas.

### **2.3.1 - Medição da Evapotranspiração**

Existem várias maneiras de medir a evapotranspiração, direta ou indiretamente. Segundo JENSEN et al, (1990) a medição pode ser feita diretamente por depleção da água do solo, lisímetros ou indiretamente, pelo

balanço hídrico do solo, balanço de energia, transferência de massa e fluxo eddy (de turbulência).

A depleção de água no solo, é feita através de amostragens visando estimar as variações de água no solo. Esse processo pode ser substituído pelo uso de sonda de neutros. Um outro método de medição do consumo de água é feito através de lisímetros. No caso de medidas indiretas podemos relacionar para grandes áreas como vales, ao método de Entradas e Saídas com medidas de vazões e precipitações. O Balanço de Energia, que requer instrumentos que limitam o seu uso. O método de Transferência de Massa é usado com a equação de turbulência, e por fim a Correlação Turbulenta. Este último requer instrumentação sofisticada o que oneram em muito os custos de operação.

### 2.3.2 - Estimativa da Evapotranspiração

Na impossibilidade de medições precisas de evapotranspiração, além de comumente não se dispor de dados meteorológicos completos, os pesquisadores lançam mão de fórmulas empíricas na tentativa de estimar ET da forma mais aproximada da realidade. Entretanto, vale ressaltar que na ocasião da escolha de um método que estime a evapotranspiração, deve-se ter o cuidado de usar uma equação que mais se adapte as condições reinantes no local de estudo.

Existem diversas equações de estimativa de evapotranspiração, não sendo propósito do trabalho discutir cada uma delas, portanto, vamos nos deter em algumas mais relacionadas ao estudo em questão, no caso, as equações relacionadas ao programa REF-ET. A evapotranspiração no caso, pode ser estimada através de: 1 - métodos combinados (Penman 1963, Penman-Monteith, Penman Kimberly 1982 e Penman Corrigido pela FAO); 2 - métodos baseados na temperatura (Hargreaves 1985 e Blaney-Criddle Corrigido pela FAO); 3 - Tanque de Evaporação FAO; 4 - método baseado na Radiação (Radiação FAO).

DOORENBOS e PRUITT (1977) no manual 24 da FAO, procuraram sistematizar o processo de estimativa de evapotranspiração com base na grama, com referência aos métodos de: Penman, Blaney-Criddle, Radiação e Tanque de Evaporação. Segundo os autores o método de Penman estima melhor ETo, seguido do Tanque de Evaporação. Os autores apresentaram valores e coeficientes calibrados a partir de medidas em lisímetros em vários locais e em condições climáticas diferentes.

De acordo com SILVA (1989) citando vários autores, embora as leituras efetuadas em Tanques de Evaporação Classe A, estejam sujeitas a erros de diversas origens a partir de sua instalação, os mesmos parâmetros climáticos que interferem na evaporação de superfícies livre de água, atuam na evapotranspiração. Portanto, caso o tanque seja instalado e monitorado corretamente, a evaporação do tanque pode proporcionar estimativas aproximadas da ETr.

Segundo DOORENBOS e PRUITT (1977), o procedimento comum para estimar a evapotranspiração de uma cultura agrícola sem restrições de água, é primeiro estimar a evapotranspiração de referência (grama ou alfafa) e aplicar um coeficiente empírico de cultura adequado, semelhante aos apresentados no paper FAO 24 e WRIGHT (1981, 1982).

SILVA (1989), relata que THORNTHWAITTE (1948), obteve uma fórmula de estimativa de evapotranspiração potencial (ETP) em função apenas da temperatura, com ajuste para o número de dias do mês e o comprimento do dia em função da latitude.

ALLEN (1991) relata que PENMAN (1948), combinou as equações de balanço de energia e transferência de vapor dando origem a equação de Penman ou equações combinadas. Ele relacionou os componentes de energia requeridos para manter a evaporação e o mecanismo necessário para a remoção desse vapor. (JENSEN et al., 1990).

Para JENSEN et al. (1990), a maioria dos estudos antes de 1940 levavam em consideração a diferença de pressão de vapor na superfície ( $e_0^0$ ) e uma determinada altura ( $z$ ).

De acordo com SILVA (1989) o modelo de PENMAN (1948), estima a evaporação de uma superfície livre de água. Essa equação consiste basicamente de dois termos; um termo energético baseado na radiação, um termo aerodinâmico expresso em função da velocidade do vento a uma altura de 2 metros e do déficit de saturação.

Segundo PERES (1994), Penman desenvolveu sua equação incorporando a velocidade do vento, relacionando-a a superfície livre de água, a partir de duas premissas: primeiro que as fontes e sumidouros de calor sensível, ocorram em um mesmo plano, por exemplo a lâmina de uma folha. Segundo, que a pressão de vapor da superfície evaporante, seja igual a pressão de vapor de saturação da água a temperatura da superfície (relacionada ao calor latente).

Ainda segundo o autor, THOM (1975) relata que o fluxo de calor sensível, é originado a partir da superfície das folhas, enquanto que o fluxo de calor latente tem sua origem nos espaços intercelulares da folha.

PERES (1994) cita OKE (1992) segundo o qual, a segunda condição (anteriormente citada), dificilmente ocorre em superfícies evaporantes. Com base no exposto, ele afirma que o método de ETo de Penman não é um caso geral, mas sim uma condição particular aplicada a superfícies livre de água, como um lago ou tanque de evaporação, ou ainda superfícies molhadas, como uma vegetação após a chuva ou irrigação por aspersão.

Segundo JENSEN et al, (1990) PENMAN (1948) não incluiu a função de resistência a transferência de vapor d'água em sua equação original. A equação combinada com o termo aerodinâmico e resistência da superfície de uma cobertura vegetal é chamada de equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1981). O autor relata que essa equação é mais precisa, quando usada na base horária e somando os valores para obter estimativa diária de ET.

Segundo JENSEN et al, (1990) exemplos de cálculos mostram claramente que quando usados parâmetros climáticos diários, a equação de Penman-Monteith pode proporcionar estimativas precisas de ET. Entretanto, deve-se ter prudência no uso, porque como DOORENBOS e PRUITT (1977) mostraram, o uso de dados climáticos médios em equações combinadas pode conduzir a erros significantes. Esses erros resultam de várias combinações no comportamento da velocidade do vento, umidade e radiação líquida, no dia.

Conforme PERES (1994), o modelo de Penman-Monteith torna-se semelhante a Penman 1963 (63Pn), quando a resistência a troca de calor sensível e latente a partir do interior da folha ( $rc$ ), é igual a zero ( $rc = 0 \text{ sm}^{-1}$ ), e substitui-se a função de velocidade do vento pelo inverso da resistência aerodinâmica ( $ra$ ). O modelo assim proposto, torna possível estimar a evaporação de uma superfície livre, o que é diferente de evapotranspiração potencial das culturas, onde apresenta um valor mínimo de  $rc$  diferente de zero.

[ A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), considera o método de Penman-Monteith (PMon) como padrão de cálculos de evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos e para avaliar outros métodos ( SMITH, 1990 ). ]

Um outro método apresentado por JENSEN et al, (1990) é o de PENMAN KIMBERLY 1982 (WRIGHT, 1982) que apresentou inicialmente um coeficiente em função do vento para ET de Kimberly, Idaho, como polinômio de 5ª ordem, onde D era uma variável independente variando entre 90 e 305 dias (dias no calendário), posteriormente aumentando a faixa, reduzindo erros e simplificando a calibração.

Para JENSEN et al. (1990), o método de Penman Kimberly 1972, possui duas funções de vento mais comuns relacionadas a alfafa como referência, recomendadas para áreas úmidas e áridas com vento em m/s e umidade de MJ/m<sup>2</sup>.dia que são:

$$Wf = (1 + 0,0536U_2) \text{ PENMAN (1948)} \quad (2)$$

$$Wf = (0,75 + 0,993U_2) \text{ WRIGHT e JENSEN (1972)} \quad (3)$$

Onde: wf = função empírica do vento.

WRIGHT e JENSEN (segundo JENSEN et al 1990) recomendaram a equação (2) para alfafa em climas litorâneos e úmidos e a eq. (3) para áreas áridas e semi-áridas.

DOORENBOS e PRUITT na publicação do FAO - 24 (1975, 1977), apresentaram a equação de Penman modificado para estimativa de ET para grama. A maior modificação está relacionada a uma função do vento mais sensível do que a usada por Penman, através do ajuste por um fator c, que se baseia nas condições climáticas locais, assumindo G (fluxo de calor do solo) igual a 0 para períodos diários.

O termo (G) permanece o mesmo nas estimativas de ET de referência em períodos longos, isso devido a perda de energia radiante durante a primeira metade do ano e o ganho durante a segunda metade.

O déficit de pressão de vapor foi calculado pelas duas expressões seguintes: quando se conhece a Tdew:

$$(e_z^o - e_z) = e^o (T_{\text{méd}}) - e^o (T_{\text{dew}}) \quad (4)$$

onde: Tdew - é a temperatura para o ponto de orvalho, caso não seja disponível esse dado, recorre-se ao outro modelo (JENSEN et al. 1990);

$$(e_z^o - e_z) = e^o (T_{\text{méd}}) \cdot (1 - UR/100) \quad (5)$$

PRIESTLEY & TAYLOR (1972) segundo SILVA (1989), considerando a evaporação de superfícies saturadas em uma atmosfera não saturada, apresentaram uma simplificação ao modelo proposto por PENMAN (1956), considerando o déficit de saturação igual a zero, excluindo o termo aerodinâmico.

Segundo JENSEN et al. (1990), o componente de energia foi multiplicado por um coeficiente,  $\alpha = 1,26$ , quando as áreas circunvizinhas estão sob condições úmidas.

LINACRE, 1977( apud SILVA, 1989), de acordo com correlações entre ET e vários fatores meteorológicos, simplificou a equação de PENMAN, possibilitando a estimativa da ETo apenas com base na latitude, longitude e temperatura do ar.

Ainda de acordo com SILVA (1989) JENSEN & HAISE (1963), determinaram uma equação de estimativa de ETo, a partir da análise de regressão entre observações da mesma (ETo) determinadas por amostragem do teor de umidade no solo e temperatura do ar.

HARGREAVES (1974), elaborou um documento analisando dados de precipitação a partir de uma seqüência de 50 anos a mais, em 234 locais no Ceará. No mesmo documento são apresentados dados de evapotranspiração e índice de disponibilidade de umidade. A equação proposta por Hargreaves, requer dados de temperatura, umidade e latitude. A equação que estima evapotranspiração potencial, ETp, em milímetros por mês, modificada para as condições climáticas do Brasil é:

$$ETp = F \times TF \times CH. \quad (6)$$

Onde: F = um fator para latitude

TF = Temperatura média em °F

$$TF = 32 + 1,8T \quad (7)$$

$$CH = 0,158 \times (100-UR)^{1/2}. \quad (8)$$

UR = umidade relativa do ar (%);

CH = fator de correção para Umidade Relativa Média Mensal (%);

T = temperatura média do ar (°C).

Apesar da importância do trabalho pioneiro de HARGREAVES, seus resultados não têm sido objeto de estudos sistemáticos, mas apenas algumas pesquisas esporádicas, em que pese o uso indiscriminado dos mesmos no dimensionamento de projetos de irrigação no Nordeste.

HARGREAVES e SAMANI (1982, 1985) introduziram modificações na equação de Hargreaves (1975), para a estimativa de ETo relacionada a grama. Devido a freqüente ausência de dados de radiação solar (Rs) os autores, segundo JENSEN et al. (1990), estimaram Rs a partir de Ra, e a diferença entre temperaturas máxima e mínima média mensal (TD) em °C.

JENSEN et al. (1990) relata que o método de Blaney - Criddle no início se baseou em medidas de ET, usando técnicas de amostragem do solo. BLANEY e MORIN (1942) primeiramente desenvolveram uma relação entre ET e temperatura média do ar, umidade relativa média e percentagem de horas diárias de sol. Posteriormente, a relação foi modificada por BLANEY - CRIDDLE (1945, 1950, 1962) e BLANEY et al. (1952), retirando o termo umidade.

SILVA (1989) esclarece que existem três tipos de formulações para o método de Blaney-Criddle: as versões original e adaptada pelo S.C.S (Soil Conservation Service (USDA, 1970) e a versão modificada pela FAO DOORENBOS e PRUITT (1977).

a) versão original:  $UC = k \times f = k(p \times T/100)$  (9)

onde:

UC - é o uso consuntivo, que representa a quantidade de água potencialmente requerida para satisfazer a necessidade de evapotranspiração de áreas vegetativas, de maneira que a produção não seja afetada pela falta de umidade.

k - coeficiente de uso consuntivo, que deverá variar com a cultura e condições climáticas locais.

f - fator de uso consuntivo (mm/mês).

T - temperatura em °F.

p - percentagem média mensal de horas de brilho solar, em relação ao total anual (DOORENBOS & PRUITT, 1977 - FAO 24).

b) versão adaptada pelo S.C.S.

$$U = KF = \sum kf \quad (10)$$

Segundo JENSEN et al. (1990), a premissa básica é que a taxa de evapotranspiração ( $E_T$ ), varia diretamente com a soma dos produtos de temperatura média mensal do ar e percentagem média mensal de horas do dia no ano, para o crescimento ativo de uma cultura com suprimento adequado de água.

Onde:

K - é o coeficiente de uso consuntivo (no período de irrigação ou crescimento)

F - é a soma dos fatores de uso consuntivos (f) para um período de crescimento.

c) versão modificada pela FAO (eqs. 3.30, 3.31 e 3.32).

$$E_{T_o} = a + bf$$

$$f = p(0,46T + 8,13)$$

$$a = 0,0043UR_{min} - n/N - 1,41$$

No caso da modificação da FAO, a estimativa de  $E_{T_o}$  (evapotranspiração da cultura de referência) leva em consideração níveis gerais de umidade relativa, insolação e velocidade do vento, enquanto que na equação original estima-se o uso consuntivo da água, definido pelo autor como sendo  $E_T$  mais a água de constituição do tecido vegetal.

Com relação ao método do Tanque de Evaporação, JENSEN et al. (1990) relatam a influência das áreas próximas ao tanque, a rugosidade das superfícies das culturas de referência (alfafa mais áspera do que a grama), o tipo e tamanho do tanque e a proximidade de obstruções ao percurso natural dos ventos.

DOORENBOS e PRUITT (1975, 1977) apresentam no manual da FAO-24 uma tabela com valores de  $K_p$  (coeficiente que depende do tipo de

tanque e outros fatores), relacionado a grama irrigada. Os autores lembram porém a necessidade de ajustes no valor de  $K_p$ , dependendo da altura da cultura de referência e das condições climáticas existentes (JENSEN et al. 1990). A tabela mostra dois casos: caso A - tanque rodeado por uma cultura baixa e verde e caso B - tanque rodeado por uma área seca, além dos fatores climáticos envolvidos ventos, umidade relativa e o Fetch na direção do vento. A fórmula apresentada pelo autor é:

$$E_{To} = K_p \times E_{pan} \quad (11)$$

onde:  $E_{To}$  - evapotranspiração de referência ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ )

$K_p$  - coeficiente do tanque

$E_{pan}$  - evaporação do tanque (mm)

Segundo PEREIRA (1992) o valor de  $K_p$  varia com as condições de contorno do tanque, isto é, tamanho e natureza da área tampão, e condições de umidade relativa do ar e velocidade do vento.

DOORENBOS & PRUITT (1977), apresentaram um método da radiação para estimativa de evapotranspiração, usando a radiação solar ( $R_s$ ). O método é recomendado em relação ao método de Penman, quando não forem disponíveis medidas de velocidade do vento e umidade, no caso desses parâmetros não poderem ser estimados com precisão suficiente. A equação que representa o Método da Radiação FAO-24, é a seguinte:

$$E_{To} = a + b \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right] \quad (12)$$

onde:  $R_s$  - é a radiação solar em  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$

$a = -0,3 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$

$b$  - é um fator de ajuste que depende da velocidade diurna do vento e umidade relativa do ar.

Segundo JENSEN et al. (1990) e PEREIRA (1992), o método da radiação é uma adaptação do método de MAKKINK (1957).

Conforme PEREIRA (1992) a equação de MAKKINK foi obtida, usando dados de evapotranspiração potencial de um gramado em lisímetro de lençol freático constante, obtendo uma correlação em ETP diária ( $\text{mm. dia}^{-1}$ ) e a radiação solar ao nível da superfície ( $R_s - \text{mm.dia}^{-1}$ ), resultando em:

$$\text{ETP} = 0,61 \text{WR}_s - 0,12 \quad (13)$$

onde: W - é um fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo úmido ( $T_u$ ) e da constante psicrométrica ( $\gamma$ ).

Segundo JENSEN et al. (1990), FREVERT et al. (1983) desenvolveu uma equação polinomial para estimativa de b no método de Radiação FAO-24, visando o uso em cálculos de computadores. A equação é a seguinte:

$$b = 1,066 - 0,13 \cdot 10^{-2} \text{UR}_{\text{med}} + 0,045 \text{Ud} - 0,20 \cdot 10^{-3} \text{UR}_{\text{med}} \cdot \text{Ud} - 0,315 \cdot 10^{-4} \cdot \text{UR}_{\text{med}}^2 - 0,11 \cdot 10^{-2} \text{Ud}^2 \quad (14)$$

onde:  $\text{UR}_{\text{med}}$  - é a umidade relativa média do ar (%)

$\text{Ud}$  - é a velocidade média do vento diurna medida a uma altura de 2 metros ( $\text{ms}^{-1}$ ).

#### 2.4 - Estudo Comparativo do Método de Estimativa de Evapotranspiração de Referência

AMATYA et al. (1992), compararam 8 métodos de estimativa de evapotranspiração potencial (ETP): Penman-Monteith, Penman 1963, Penman - FAO, 4 métodos baseados na radiação (Makkink, Priestly-Taylor, Turc e Jensen-Haise) e 1 método baseado na temperatura, Thornthwaite. Observaram boa correlação entre os valores de ETP estimados pelos 4 métodos de radiação, o de temperatura e Penman-Monteith, apresentando alguma diferença. Encontraram ainda, maior correlação para estimativas de ETP mensais e menor para estimativas diárias.

Numa revisão de literatura segundo AMATYA et al. 1992, (JENSEN et al., 1990; KADLEC et al., 1988; KRUSE et al., 1977; MOHAN, 1991;

BATCHELOR, 1994; KOERSELMAN et al., 1988; STANHILL, 1961; MARTIN et al., 1991 e MERVA et al., 1985) indicam claramente, conforme os autores, que os métodos combinados de Penman são considerados superiores a todos os outros para estimar ETP em uma grande variedade de locais e condições climáticas.

Para AMATYA et al. (1992), nenhum método específico de estimativa de ETP tem sido adequado para todas as condições climáticas e locais, o que a pesquisa procura é aplicar o método que melhor corresponda a realidade de cada local. Diante da escolha do melhor método, depara-se com o que ocorre no uso do modelo de Simulação Hidrológica e Balanço de Água no Solo (Modelo de DRAINMOND) e outros modelos, onde inevitavelmente ocorre o problema da necessidade de estimativas precisas de ETP e a falta, ou os altos custos, requeridos para obtê-los.

Ocorre também que os dados podem não estarem disponíveis para determinada região. Nesse caso, utilizam-se medidas de estações próximas. Entretanto, há parâmetros de relevância para determinado método. Os autores acima citados relatam que o parâmetro mais sensível para o método de Penman-Monteith é a radiação líquida, assim como no caso dos métodos baseados na radiação, é a radiação solar.

Ainda segundo os autores, foram feitas previsões usando o método de Penman-Monteith com dados da Carolina do Norte (Carteret), comparando com dados do método de Priestley-Taylor usando radiação líquida de Wilmington, também na Carolina do Norte, e pelo Penman-Monteith usando dados de radiação líquida calculados, velocidade do vento calibrada e déficit de pressão de vapor de Wilmington. Quando usados os dados de radiação calibrados para Wilmington pelo método de Priestley-Taylor, esse proporcionou menor erro do que o Penman-Monteith (PMon). Isso se deve ao fato de que o PMon, envolve maior número de variáveis climáticas do que os métodos baseados na radiação, resultando num acúmulo de erros no modelo de previsão pelo modelo anterior.

Análises estatísticas de sensibilidade de parâmetros na equação de Penman-Monteith, segundo os autores, indicam a radiação líquida como mais sensível, seguidos de déficit da pressão de vapor e velocidade do vento.

Nos testes realizados com os 8 métodos citados anteriormente, usando dados de Carteret (Carolina do Norte) foram realizadas estimativas de ETP diárias, semanais, mensais, periódicas e anuais, ocorrendo boa correlação entre os métodos. A correlação maior ocorreu entre valores de ETP mensais e menor para estimativas diárias.

Ainda segundo os autores estudos têm mostrado que o método de THORNTHWAITE, subestima cálculos de ETP durante o inverno e superestima durante os meses do verão, essa tendência pode ser observada para o método de Hargreaves (1985); já que o mesmo se baseia nas temperatura médias diárias máxima e mínimas.

A aplicação dos métodos de estimativa da Evapotranspiração de referência para períodos de tempo menores que o recomendado, pode reduzir a precisão (JENSEN et al. 1990).

O período usado na estimativa de ETr para cada método, deve estar de acordo com o tempo em que foram estabelecidos os coeficientes empíricos (JENSEN et al. 1990).

Os tempos recomendados para aplicação dos métodos, de acordo com os autores e o período usado na obtenção dos coeficientes, se encontram citados a seguir (Período de tempo mínimo recomendado para estimativas dos métodos).

<u>Métodos</u>	<u>Período de tempo mínimo recomendado</u>	<u>Observação</u>
Penman, 1963	diário	
Penman Kimberly, 1982	diário	
Penman Corrigido pela FAO	diário	
Penman-Monteith	horário ou diário	diariamente quando usar equações para aproximar

		resistência da cobertura vegetal
Radiação - FAO	5 dias	
Blaney-Criddle - FAO	5 dias	se somente dados de estimativas para períodos longos de UR, V. Vento e Horas de Sol são disponíveis, o período de tempo deveria ser limitado para mensal
Hargreaves, 1985	10 dias	
Tanque de Evaporação FAO	5 dias	

HARGREAVES (1993) afirma que o cálculo de evapotranspiração de referência (ETr), deve ser padronizado e que as equações combinadas de Penman são recomendadas como referência.

SOUZA e YODER (1994) compararam cálculos de evapotranspiração, com grama como referência, a partir de dados diários totalizados em meses no período de (1974-78), para os métodos de Penman-Monteith e Hargreaves 1985, com a equação (Hargreaves, 1974). Foram usados dados de Fortaleza (capital) e do município de Pentecoste no estado do Ceará, este último localizado em zona semi-árida. Segundo SOUZA e YODER (1994), as equações de Hargreaves (1985 e 1974) superestimaram a evapotranspiração potencial para vários meses do período, em valores que variam de uma faixa mínima de 4% a 8% e máxima entre 32% e 35%. A ausência de dados completos, não permitiu uma melhor comparação. HARGREAVES (1993) relata que a qualidade dos dados é tão importante, quanto a equação de referência usada.

A análise realizada por SOUZA e YODER (1994), mostrou que a equação de Hargreaves 1985, não proporciona boas estimativas de evapotranspiração potencial para o Nordeste do Brasil, apesar da mesma se

correlacionar bem com equações combinadas de Penman, como Hargreaves observou em seus trabalhos.

JENSEN et al. (1990), relata que a equação de Penman-Monteith é mais precisa quando se usam dados climáticos horários médios e os valores são totalizados, obtendo-se estimativas diárias de evapotranspiração.

SILVA (1989) avaliou a eficiência de métodos de estimativa de ETo, a partir de dados mensais no período de 1978 a 1987, utilizando o método de Penman Corrigido pela FAO, como padrão na análise, com os métodos da Radiação FAO, Blaney-Criddle corrigido pela FAO, Thornthwaite, Hargreaves e Hargreaves & Samani, como elemento de comparação.

A análise estatística, segundo SILVA (1989), revelou não existir diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade, entre valores de ETo obtidos com o método padrão (no caso FcPn) e os valores observados a partir do método da Radiação (FRad). A análise também revelou que, ao nível de 1% de probabilidade os métodos de Thornthwaite e Hargreaves 1985 não diferem entre si, diferindo, entretanto, dos métodos de Penman e o método baseado na radiação solar (FRad). No estudo em questão, observa-se que o método de Penman - Monteith, não se ajusta ao Hargreaves 1985, e que por vezes PMon, se correlaciona bem com FRad e FcPn.

É provável que o método de Penman-Monteith, tenha subestimado ou superestimado os valores de evapotranspiração de referência (ETr), porém a determinação precisa da diferença percentual entre subestimativa e superestimativa, só é detectável a partir de medições de ETr em lisímetros de precisão.

ALLEN et al. (1994), relatam uma tendência do método de Penman Corrigido pelo FAO-24 (FcPn) em superestimar valores de evapotranspiração potencial. Os autores observaram essa tendência em estudos realizados por PRUITT e SWANN (1986) baseados em comparações feitas com medidas de ETo (evapotranspiração de referência-grama), e medidas micrometeorológicas, em

Davis, Califórnia (USA) e New South Wales, Austrália. De acordo com ALLEN et al (1994), WEISS (1982) encontrou superestimativas do método FcPn, em relação a medida de ETr (evapotranspiração de referência-alfafa), com lisímetros em Mead, Nebraska. Ainda conforme os autores ALLEN et al. (1982), encontraram superestimativa de ETr pelo método de FcPn, depois de ajustar a relação entre ETr e ETo para 1,25, em Scottsbluff, Nebraska.

Com relação a medida de evapotranspiração de referência em meses de pique de demanda evaporativa, ALLEN et al. (1994), relatam que ALLEN et al (1989) e JENSEN et al. (1990) encontraram superestimativa de ET, pelo método de Penman Corrigido pelo FAO-24 (FcPn), em relação a medidas de lisímetros em Davis, Califórnia e em cinco lisímetros localizados nos USA e um na Austrália, onde nos estudos os referidos locais foram classificados como climas áridos e semi-áridos.

Segundo ALLEN et al. (1994), as análises relatadas no Manual 70 da ASCE (JENSEN et al. 1990), incluindo a avaliação de 20 equações, onde nove delas são equações combinadas, em 11 locais tendo medidas de lisímetros de pesagem na ET da grama ou alfafa (estimativas mensais), selecionados (locais) de acordo com as condições locais de fetch (bordadura), manejo de lisímetro, umidade adequada do solo para as condições de referência e instrumentação e manutenção de estações, revelaram que, em termos de precisão média de estimativa e desvio padrão de estimativa nos lisímetros medidos, as equações de Penman-Monteith e Penman Kimberly, foram os melhores métodos. A mesma análise revela que as equações de Penman FAO-PPP-17 (FRÉRE e POPOV, 1979) e Penman 1963 (63Pn), aplicadas com grama como referência, obtiveram melhor performance nos métodos combinados, depois de PMon e KPen. Indica ainda que, o método da Radiação FAO foi o melhor dos não combinados e que o método de Penman Corrigido pelo FAO-24 ficou mal posicionado, devido as superestimativas obtidas.

Em outra publicação ALLEN et al. (1994) relatam que a equação adaptada pelo FAO-24 em 1975 (DOORENBOS e PRUITT, 1975), chamado de Penman Corrigido pela FAO ou Penman FAO, apesar de mais compreensível até o momento, tem mostrado uma tendência a superestimativa, como constatado nesse trabalho e por outros pesquisadores.

Pesquisas têm indicado, que há fragilidade nos cálculos de função do vento, déficit de pressão de vapor (VPD), radiação líquida de ondas longas e no coeficiente de correção  $c$ . Esses problemas têm impedido essencialmente, o processo usado para calcular parâmetros na equação e de certo modo, a confiabilidade e processamento de dados (ALLEN et al. 1994).

As equações de resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) e resistência total da superfície ( $r_s$ ), tem sido combinadas com o método de PMon, para formar uma equação mais simples, descrevendo a grama hipotética de referência. Pela combinação de expressões generalizadas de densidade do ar ( $\rho$ ), com expressões simplificadas de  $r_s$  e  $r_a$  para a grama, ALLEN et al. (1989), SMITH et al. (1991) e ALLEN et al. (1994), reduziram a chamada equação de Penman-Monteith FAO, a:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (15)$$

Onde:  $ET_o$  - evapotranspiração de referência (grama), para cálculos em períodos diários ou mensais;

$ET_o$ ,  $R_n$  e  $G$ , tem as mesmas unidade ( $MJm^{-2}d^{-1}$ );

$T$  - Temperatura média diária do ar ( $^{\circ}C$ );

$\gamma$  - constante psicrométrica;

$\Delta$  - inclinação da função de pressão de vapor de saturação ( $KPa^{\circ}C^{-1}$ );

$U_2$  - Velocidade do vento média de 24 horas a 2 metros de altura ( $m.s^{-1}$ );

$e_a$  - pressão de vapor de saturação média do ar (KPa);

$e_d$  - pressão de vapor de saturação a temperatura do ponto de orvalho (KPa).

A equação de Penman-Monteith FAO nesta fórmula não requer calibração local, ou uso de funções do vento localizadas, se a velocidade do vento é medida a 2 metros de altura, ou convertida através da equação:

$$U_2 = U_Z \frac{\ln \frac{(Z_2 - d)}{Z_{om}}}{\ln \frac{(Z_m - d)}{Z_{om}}} \quad (16)$$

Onde:  $U_Z$  - Velocidade do vento medida a uma altura  $Z$  (m);  
 $Z_2$  - medida padrão de velocidade do vento a 2m;  
 $Z_m$  - altura de medida de velocidade do vento (m);  
 $d$  - plano zero de deslocamento do perfil de vento (m);  
 $Z_{om}$  - parâmetro de rugosidade para o momento (m).

A superestimativa ocorrida na aplicação de FcPn decorre basicamente na seleção do método de cálculo do déficit de pressão de vapor (VPD), radiação líquida, função do vento e fatores de correção, (ALLEN et al. 1994).

Os autores recomendam mudanças nos procedimentos de cálculo para VPD e Rn (radiação líquida).

Segundo JENSEN et al. (1990), o VPD calculado como, no método de FcPn, geralmente subestima o valor verdadeiro de VPD médio diário.

Para ALLEN et al., 1994, é preferível superestimativas de VPD média diária, do que subestimativas, isso porque no primeiro caso tende este a compensar o uso de velocidade média dos ventos em 24 horas ( $U_{24}$ ), em cálculos diários na equação de PMon (padrão de comparação).

Segundo ALLEN et al. 1994, os cálculos de VPD afetam a precisão da equação de Penman. Cálculos de pressão de vapor de saturação média do ar, baseada na pressão de vapor de saturação média para temperaturas do ar máxima e mínima, é superior ao cálculo baseado na pressão de vapor de saturação a

temperatura média. Além do mais, o regime de umidade do solo, e o tipo de vegetação no ambiente da estação meteorológica, podem afetar as medidas de temperatura e umidade relativa do ar. Esses por sua vez podem resultar em estimativas de ETo acima do real.

Os autores recomendam estudos visando determinar os efeitos quantitativos do local e aridez das estações meteorológicas, nas medidas de temperatura e umidade, e desenvolver métodos de correção desses efeitos.

Treze métodos combinados foram testados por ALLEN (1985), na estimativa da evapotranspiração de referência para a grama (ETo) e alfafa (ETr) em dois locais de climas opostos, árido e úmido e comparado os resultados com leituras em lisímetros locais. O modelo KPen (Velocidade do vento calibrada por WRIGHT, 1982), apresentou desempenho ligeiramente superior ao de Penman-Monteith, quando utilizado um valor de  $rc = 50 \text{ sm}^{-1}$ , porém, ambos (KPen e PMon), tiveram comportamento considerado superior ao Penman Corrigido pela FAO (Velocidade do vento calibrado por DOORENBOS & PRUITT, 1977). Em outra análise com  $rc = 0 \text{ sm}^{-1}$ , no modelo de PMon, os resultados obtidos não apresentaram boa correlação com valores medidos (PERES, 1994).

Segundo análise feita por ALLEN et al. (1989), com base em dados de comparações de métodos, a partir de publicações e trabalhos científicos ou comunicação pessoal, usando dados médios diários e mensais de ET e medidas de lisímetros, além de dados referente a outros locais. (Os 11 lisímetros estavam localizados em uma faixa de 30 metros abaixo do nível do mar, a 2774 metros acima, em latitudes variando de 38°S em Aspendale Austrália, passando próximo ao equador em Yarigambi, Zaire, até 56°N em Copenhague, Dinamarca, abrangendo climas de árido a úmido) o método de PMon forneceu melhores estimativa de ETo e ETr em períodos diários e mensais, seguindo pelos métodos de KPen e 63Pn, tendo FcPn aparecido em quinto lugar, das cinco equações combinadas de Penman testadas.

Segundo os autores pequena parte da superestimativa apresentada por FcPn, foi devido ao uso da equação de FREVERT et al (1983), na estimativa do fator de correção  $c$ , ao contrário do uso de valores interpolados apresentados por DOORENBOS & PRUITT (1977) no manual 24 da FAO.

### 3 - METODOLOGIA

A metodologia empregada na dissertação, consta de uma etapa inicial de coleta de dados das estações de meteorologia de Pentecoste-CE e Mossoró-RN. Logo após foram criados arquivos de dados (TABELAS 1 e 2) para serem utilizados no software REF-ET.

A evapotranspiração de referência é calculada através de oito métodos: Penman-Monteith, Penman Kimberly 1982, Penman Corrigido pela FAO, Penman versão original 1963, Hargreaves 1985, Radiação, Blaney-Criddle corrigido pela FAO e Tanque de Evaporação FAO.

O programa REF-ET interpreta qualquer arquivo de dados, permitindo cálculos de evapotranspiração de referência para períodos mensais, diários e horários. Utiliza a alfafa ou a grama como cultura de referência e pode apresentar dados de cálculos intermediários. A partir do arquivo de dados é montado o arquivo definição, que serve de interface entre operador e o programa. O REF-ET ainda possibilita a obtenção de gráficos, a partir dos resultados de cálculos, com a ajuda de planilhas como: Quattro, Quattro Pro e Lotus 1 2 3.

A metodologia apresenta ainda cada equação empregada nos cálculos de evapotranspiração de referência.

Neste trabalho será utilizado o conceito e a terminologia amplamente divulgada na literatura, para evapotranspiração de referência:  $E_{To}$  quando a cultura de referência é a grama  $E_{Tr}$  no caso da alfafa.

#### 3.1 - Coleta de Dados

Os dados climáticos foram obtidos da Estação Meteorológica da Fazenda Experimental do Vale do Curu no município de Pentecoste-CE, com altitude de 47 m, entre latitude de  $3^{\circ}45'$  a  $4^{\circ}00'$  S e longitude de  $35^{\circ}15'$  a  $39^{\circ}30'$  WG,

TABELA 1 - Dados da Estação Agrometeorológica da Fazenda Experimental do Vale do Curu (Pentecoste-CE) para o Período de 1966-1986 (após Santos)

Meses	DIA	Tmax °C	Tmin °C	Tmed °C	V. Vento km/dia	Rsol cal/cm <sup>2</sup> /d	Evap mm/d	UR %	Insol h/s
1	15	33,8	23,0	27,8	258,3	427,5	4,3	71,3	6,6
2	15	32,6	22,7	27,1	224,6	422,2	3,3	77,7	5,9
3	15	31,1	21,5	26,2	151,6	395,6	1,9	84,6	4,7
4	15	31,1	22,4	26,2	151,6	396,1	1,9	84,8	5,4
5	15	31,2	21,9	26,2	145,8	401,3	2,3	83,1	6,2
6	15	31,3	21,2	26,1	168,5	395,5	3,1	77,9	6,9
7	15	32,2	21,1	26,3	202,1	413,9	4,1	72,2	9,1
8	15	33,9	21,6	27,1	247,1	460,3	5,3	65,6	8,6
9	15	34,6	22,2	27,6	303,3	487,0	5,5	64,9	8,6
10	15	34,8	22,5	27,8	303,3	472,3	5,5	66,2	8,4
11	15	34,7	22,3	28,0	297,6	477,0	5,2	65,8	8,6
12	15	34,3	22,3	26,0	275,2	457,0	4,9	67,6	7,9

TABELA 2 - Dados Climáticos da Estação Meteorologica de Mossoró no Período de (1970-1982) Altitude - 20 metros Longitude 37,34 WG Latitude 5,19 Sul.

Meses	DIA	Tmax C	Tmin C	Tmed C	V. Vento km/dia	Rad Liq. cal/cm <sup>2</sup> /d	Insol h/s	Evap mm/d	Urel %	PPT mm
1	15	33,7	23,5	28,1	263,9	234,0	7,1	7,0	67,2	51,5
2	15	32,9	23,3	27,7	213,4	196,3	6,4	5,5	71,2	100,8
3	15	32,4	23,0	27,1	162,9	197,8	5,6	3,6	78,6	160,0
4	15	32,3	22,9	27,1	145,9	200,2	5,6	3,48	78,0	153,2
5	15	32,2	22,5	26,9	145,9	215,7	6,2	3,6	75,2	97,7
6	15	32,1	21,7	28,8	157,2	213,1	8,4	4,1	71,6	40,4
7	15	32,4	21,4	28,5	168,5	230,6	6,7	5,4	67,5	20,1
8	15	33,7	21,2	27,0	224,6	270,1	7,6	6,9	64,3	8,5
9	15	34,3	21,9	27,7	269,2	263,6	6,1	8,1	59,8	2,4
10	15	34,5	22,7	27,8	292,0	291,8	8,8	7,4	81,5	1,9
11	15	34,4	23,0	28,1	297,6	278,8	8,3	7,6	63,2	5,9
12	15	34,4	23,2	28,3	269,5	250,4	7,4	7,2	64,3	15,7

pertencente a Universidade Federal do Ceará e da Estação Meteorológica de Mossoró com altitude de 20 m, latitude de 5°11'31. S e longitude de 37°20'40. WG.

A seleção dos parâmetros analisados foi baseada em dados utilizados no software REF-ET que determina a evapotranspiração através de 8 métodos. Os referidos parâmetros foram dados médios mensais de: temperatura máxima, mínima e média, velocidade dos ventos, radiação solar, insolação, umidade relativa, evaporação do tanque classe A e precipitação. No caso de Mossoró foram usados dados de radiação líquida, ao invés de radiação solar.

Foram realizadas análises utilizando dados diários e médias mensais. Os dados médios mensais utilizados da Fazenda Experimental do Vale do Curu correspondem ao período de 1966 a 1986 e os da Estação Meteorológica de Mossoró, ao período de 1970 a 1982. Com relação aos dados médios diários, foram utilizadas informações do período de 1974 a 1978 da Fazenda Experimental. Tomou-se ainda dados diários de dois anos, 1977 e 1979, considerados, respectivamente, ano normal e ano seco com relação a ocorrência de precipitações. As médias mensais dos parâmetros referem-se ao dia 15 de cada mês para Pentecoste e Mossoró.

Dados complementares foram acrescentados como informações necessárias ao INPUT do programa REF-ET, como altura do anemômetro (2 m) e altura de medição da relação temperatura e umidade relativa (1,5) m. Alguns outros dados como: relação de velocidade do vento dia/noite, relação da cultura de referência (alfafa ou grama), altura referente a alfafa, altura referente a grama e tamanho da bordadura, são fornecidos pelo programa caso não sejam disponíveis nos locais de medição.

Os dados obtidos da Estação Meteorológica de Mossoró podem ser aplicados para o caso do Projeto Jaguaribe Apodi a 15 km do município de Limoeiro do Norte Estado do Ceará, localizado na Chapada do Apodi, situado entre a latitude 5°06'38. a 5°11'39. LS e longitude 37°52'21. a 37°56'05. WG. A estação é a mais próxima do Distrito de Irrigação Jaguaribe - Apodi (DIJA), cerca

de 70 km, e possui características climáticas semelhantes, podendo os dados de Mossoró proporcionarem uma boa aproximação na estimativa de evapotranspiração.

Em Pentecoste na Fazenda Experimental do Vale do Curu, pela classificação de KOEPPEN, o clima é do tipo AW', quente e úmido com chuvas e precipitação máxima em outono.

A região caracteriza-se por temperatura médias mensais máximas de 34,8°C e mínimas de 21,9°C, umidade relativa do ar média mensal de 67,40% e demanda evaporativa de 234,0 mm ao mês, correspondendo a uma média diária de 7,8 mm.

A TABELA 1 contém dados climáticos da Estação Agrometeorológica de Pentecoste, durante o período de 1966 a 1986 considerado para o trabalho. Dados complementares necessários a execução do REF-ET com informações da estação da FEVC (Estação Experimental do Vale do Curu), encontram-se na TABELA 1a.

O clima na chapada do Apodi é semi-árido tropical, com estações característica de verão e inverno de 7 a 8 meses e 5 meses, respectivamente.

A TABELA 2 fornece os dados climáticos, média mensal do período de 1970 a 1982, com exceção dos dados de velocidade do vento (1974-1982), precipitação (1900-1982), insolação e nebulosidade (1970-1984), referentes a estação de Mossoró, os dados complementares, encontram-se na TABELA 2a.

Os dados médios mensais da Fazenda Experimental do Vale do Curu, foram extraídos de SOUZA (1992) e os dados da Estação Meteorológica de Mossoró, GUIMARÃES (1993).

Os dados diários dos anos de 1977 e 1979, e aos dados médios diários para o período de 1974 a 1978, foram obtidos em boletins meteorológicos fornecidos pela Estação de Meteorologia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará (Departamento de Engenharia Agrícola).

TABELA 1a - Dados complementares referente a Estação Experimental do Vale do Curu e a cultura de referência (Alfafa) necessários para a execução do programa REF-ET.

Altura do anemômetro	2 metros
Altura de leitura da relação temperatura/umidade relativa	1,5 metros
Altitude da Estação Meteorológica	47 metros
Latitude da Estação Meteorológica	3,75 graus S
Longitude da Estação Meteorológica	39,25 graus W
Padrão da relação de ventos dia/noite	2
Relação entre as culturas de referência alfafa/grama	1,15
Altura de referência (Alfafa)	0,5 metros
Altura de referência (Gramma)	0,12 metros
Altura da cultura de referência	0,5 metros
Fecth verde do tanque	1000 metros

TABELA 2a - Dados complementares referente a Estação Experimental de Mossoró e a cultura de referência (Alfafa) necessários para a execução do programa REF-ET.

Altura do anemômetro	2 metros
Altura de leitura da relação temperatura/umidade relativa	1,5 metros
Altitude da Estação Meteorológica	20 metros
Latitude da Estação Meteorológica	5,19 graus S
Longitude da Estação Meteorológica	37,34 graus W
Padrão da relação de ventos dia/noite	2
Relação entre as culturas de referência alfafa/grama	1,15
Altura de referência (Alfafa)	0,5 metros
Altura de referência (Gramma)	0,12 metros
Altura da cultura de referência	0,5 metros
Fecth verde do tanque	1000 metros

Alguns parâmetros climáticos referentes aos anos de 1977 e 1979 não estavam disponíveis, e foram substituídos por dados médios diários no período de 1974 a 1978. No caso de 1977, foram substituídos os dados da Umidade Relativa no mês de setembro. No ano de 1979, foram substituídos os dados de: velocidade do vento de 6 a 28 de fevereiro, radiação solar dos meses de junho e julho e velocidade do vento de 7 a 9 de outubro.

A análise refere-se a dados climáticos medidos nas estações, e que estão associados aos aspectos físicos envolvidos no fenômeno da evapotranspiração.

Na seleção dos dados procurou-se utilizar aqueles parâmetros mais ligados aos abordados em cada método de estimativa de evapotranspiração do programa REF-ET. Nesse caso, foi propósito selecionar dados de INPUT, de acordo com o arquivo de dados contido no programa, com informações da Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE). O programa REF-ET tem um arquivo de dados de nome ASCE.DAT e um arquivo definição (ASCE.DEF), que servem de modelos para, através de um editor de textos, construir-se outro de maneira semelhante ao arquivo de dados que servirá como base de cálculos.

O método de Penman-Monteith foi considerado modelo padrão para comparação com os demais métodos do programa, baseado nas recomendações de AMATYA et al. (1992), ALLEN et al. (1987, 1989), HARGREAVES (1980) e SMITH (1991).

### 3.2 - Programa REF-ET

O Programa REF-ET foi criado para dar suporte as diretrizes e procedimentos de cálculos de evapotranspiração apresentados no .ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice N<sup>o</sup> 70., .Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. - Manual e Relatos Práticos de Engenharia, Evapotranspiração e Requerimentos de Água para Irrigação., editado por M.E. Jensen, R.D. Burman e R.G. ALLEN, 1990 com ajuda do Comitê de

Requerimentos de Água da Divisão de Irrigação e Drenagem da Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE) - American Society of Civil Engineers.

O programa REF-ET proporciona o cálculo de Evapotranspiração de referência (Et) através de oito métodos bastante conhecidos. O REF-ET tem duas qualidades:

1 - Servir de padrão de comparação com outros programas de computadores que visam o cálculo da evapotranspiração de referência para uma série de dados climáticos ou arquivos de dados.

2 - Proporcionar cálculos de um grupo de dados de clima e evapotranspiração de referência que servem para testar outros programas de cálculos de Et.

O Software REF-ET proporciona o cálculo da evapotranspiração de referência através de 8 métodos:

- Penman Versão original de 1963 (PENMAN, 1963)
- Perman Kimberly de 1982 (Whight, 1982, 1987)
- Perman Corrigido pelo FAO-24 (DOORENBOS & PRUITT, 1975 e 1977)
- Penman - Monteith (ALLEN et al. 1989, ASCE, 1990)
- Hargreaves, 1985 (HARGREAVES et al., 1985)
- Radiação corrigido pelo FAO-24 (DOORENBOS & PRITT, 1975 e 1977)
- Blaney - Criddle corrigido pelo FAO-24 (DOORENBOS, & PRUITT, 1975 e 1977).
- Tanque de Evaporação FAO-24 (DOORENBOS & PRUITT, 1975 E 1977).

O programa pode calcular a evapotranspiração segundo dados medidos em lisímetro de precisão. Como não se dispõe de medidas nesses aparelhos esses cálculos não são considerados.

É necessário criar um arquivo de dados de extensão .DAT com os dados climáticos de uma determinada estação meteorológica e a partir desse, obter um arquivo definição com extensão .DEF com o mesmo nome do arquivo anterior. O programa contém um formato próprio, onde o arquivo definição pode

ser obtido, sendo para isso necessário indicar a coluna onde cada um dos diferentes parâmetros climáticos serão encontrados.

O REF-ET auxilia a profissionais em cálculos rotineiros servindo também de comparação para dados obtidos.

O procedimento mais detalhado de operacionalização do programa REF-ET, pode ser encontrado no Manual do Usuário

### 3.3 - Estimativa de Evapotranspiração

A evapotranspiração é um componente importante a ser conhecido em sistemas de irrigação para dimensionamento correto, requerimento de água, manejo e ainda para estudo hidrológico. Em áreas onde esse parâmetro não pode ser determinado através de lisímetro ou por depleção de água, o projetista de irrigação necessita obter uma estimativa do mesmo. A maneira mais segura de estimar a evapotranspiração é fazer uso de dados climáticos inerentes a região onde se propõe trabalhar. Caso alguns dados não sejam disponíveis, os métodos de estimativa de evapotranspiração constituem-se alternativas para suprir essa falha. Nos parágrafos seguintes estes métodos são apresentados.

#### 3.3.1 - Método PENMAN-63 Versão Original

Penman (1948) combinou equações de balanço de energia e transferência de calor obtendo o método combinado.

a) Equação de balanço de energia

$$R_n = E_T + H + G \text{ ou } E_T = R_n - H - G \quad (3.1)$$

onde:

$R_n$  - radiação líquida de ondas curtas e longas da superfície (atmosfera e sol);

$E_T$  - energia usada no processo de evapotranspiração (calor latente);

H - calor sensível transferido para atmosfera;

G - calor sensível transferido para o solo.

#### b) Equação de transferência de calor

$$E_T = \frac{\rho \cdot G (e_0 - e_d)}{\gamma (r_a + r_c)}$$

onde:

$\gamma$  - constante psicrométrica (mb/°C);

$e_0$  - pressão de vapor de saturação a temperatura da superfície (T°) mb;

$e_d$  - pressão de vapor de saturação a temperatura do ponto de orvalho, mb ou pressão de vapor real do ar;

$r_a$  - resistência aerodinâmica, dias/cm;

$r_c$  - cobertura vegetal. ou volume estomatal., resistência da vegetação, dias/cm ou resistência total a difusão de vapor a partir do interior da folha;

$r_c = 0$  superfície livre de água.

#### Equação Geral de Penman

$$\lambda E_{T_0} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6,43 w_f (e_z^0 - e_z) \quad (3.3)$$

onde:  $\Delta$  - inclinação da curva de pressão de vapor na saturação (psicrométrica) -  $e_z^0$  ou  $e_z$  versus temperatura. Pode ser calculada como a derivada de  $e_s$  (pressão de vapor de saturação) em relação a temperatura.

$$\Delta = \frac{e_0 - e_a}{t_0 - t_a} \quad (3.4)$$

(mb°C<sup>-1</sup>) ou KPa°C<sup>-1</sup>)

$$w_f = a_w + b_w u_2$$

onde:  $\lambda E_{T_0}$  = fluxo de calor latente (cal.cm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);

$a_w$  e  $b_w$  - são coeficientes lineares em função do vento;

$u_2$  - velocidade do vento a uma altura padronizada de 2 metros (km/dia);

$e_z^0$  - pressão de vapor na superfície da água (mb);

$e_z$  - pressão de vapor a uma altura  $Z$  (mb);

$w_f$  = coeficiente da função empírica do vento.

Obs.: Para valores horários de  $\lambda E_{To}$ ,  $R_n$  e  $G$  a constante 6,43 no termo aerodinâmico é  $6,43/24 = 0,268$ . O valor 6,43 é coeficiente para  $e$  (pressão de vapor) em KPa e  $E_{To}$  (evapotranspiração de referência) em  $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ .

### 3.3.2 - Equação de Penman Kimberly - 1982 - Alfafa como referência

$$\lambda E_{Tr} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6,43 w_f (e_z^o - e_z) \quad (3.5)$$

onde:  $W_f = a_w + b_w U_2$

$$a_w = 0,4 + 1,4 \exp \{ -[(D-173)/58]^2 \} \quad (3.6)$$

$$b_w = 0,605 + 0,345 \exp \{ -[(D-243)/80]^2 \} \text{ para } U_2 \text{ em } ms^{-1} \quad (3.7)$$

$$b_w = 0,007 + 0,004 \exp \{ -[(D-243)/80]^2 \} \text{ para } U_2 \text{ em } km \text{ dia}^{-1} \quad (3.8)$$

onde:

- os coeficientes  $a_w$  e  $b_w$  para uma altura de velocidade do vento de 2 m

-  $D$  representa o dia no calendário, para latitudes sul  $D' = (D-182)$  para  $D \geq 182$  e  $D' = (D+182)$  para  $D < 182$

$\lambda E_{Tr}$  - densidade de fluxo de calor latente ( $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ );

$R_n$  - radiação líquida ( $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ );

$G$  - Fluxo de calor do solo ( $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ );

$e$  - pressão de vapor (KPa).

Segundo ALLEN (1991), a equação geral de Penman difere da equação de Penman Kimberly, com relação ao coeficiente da função empírica do vento ( $w_f$ ), nos valores de  $a_w$  e  $b_w$ . No caso de Penman Kimberly, Whight (1982, 1987) desenvolveu valores de  $a_w$  e  $b_w$  para Kimberly, Idaho, tendo alfafa como cultura de referência. Os valores são calculados pelas equações (3.6), (3.7) e (3.8).

Os valores de  $a_w$  e  $b_w$  na função empírica para Penman (1948, 1963) tendo grama como referência são:

$$a_w = 1,0$$

$$b_w = 0,537 \text{ (velocidade do vento em m/s)}$$

$$b_w = 0,00626 \text{ (velocidade do vento em km/dia)}$$

### 3.3.3 - Métodos da Radiação FAO-24

DOORENBOS & PRUITT (1977), apresentaram um método da radiação para estimativa de evapotranspiração, usando a radiação solar ( $R_s$ ) que segundo JENSEN et al (1990), é uma adaptação do método de MAKKINK (1957) e foi recomendado em relação ao método de Penman, quando medidas de velocidade do vento e umidade, não forem disponíveis. A equação que representa o Método da Radiação FAO-24, é a seguinte:

$$E_{To} = a + b \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right] \quad (3.9)$$

onde:  $R_s$  é a radiação solar em  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$

$a = -0,3 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  e  $b$  é um fator de ajuste que varia com a umidade relativa do ar e velocidade do vento diurna.

Dados de radiação solar ou métodos calibrados de estimativa de  $R_s$  devem ser usados se disponíveis.

DOORENBOS & PRUITT (1977), recomendam um método de estimativa de  $R_s$ , a partir da radiação no topo da atmosfera ( $R_a$ ), expresso por:

$$R_s = (0,25 + 0,5 n/N) R_a \quad (3.10)$$

onde:  $n/N$  - é a relação horas de brilho solar medida ( $n$ ) e horas de brilho solar máximas possíveis ( $N$ ).

Segundo PEREIRA (1992), a equação de MAKKINK (1957) é a seguinte:

$$ETP = 0,61 w R_s - 0,12 \quad (3.11)$$

onde:  $w$  é um fator de ponderação que depende da temperatura do bulbo úmido e da constante psicrométrica ( $\gamma$ ).

### 3.3.4 - Método de Hargreaves relacionado a grama como referência

Melhoramentos na equação de Hargreaves (1975) foram propostos por Hargreaves e Samani (1982, 1985) resultando nas expressões:

$$ET_o = 0,0075 R_s \cdot T \quad (T \text{ em } ^\circ\text{F}) \quad (3.12)$$

$$ET_o = 0,0135 R_s (T + 17,8) \quad (T \text{ em } ^\circ\text{C}) \quad (3.13)$$

onde:  $R_s = KT \cdot R_a \cdot TD^{1/2}$  (3.14)

$$KT = 0,035(100 - UR)^{1/3} \text{ para } TD \text{ em } ^\circ\text{F} \text{ e } UR > 54\% \quad (3.15)$$

$$KT = 0,125 \text{ para } UR < 54\% \quad (3.16)$$

O método (Hargreaves et al., 1985) que combina as equações (3.13), (3.14), (3.15) e (3.16), sem a limitação para  $UR < 54\%$ , é a seguinte:

$$ET_o = 0,0023 R_a TD^{1/2} (T + 17,8) \text{ com } TD \text{ em } ^\circ\text{C} \quad (3.17)$$

onde:

$R_s$  - radiação solar (unidades equivalentes a evaporação);

$R_a$  - radiação no topo da atmosfera (mesmas unidades de  $R_s$ ) obtido em tabelas para uma dada latitude e dia;

$KT$  - coeficiente de temperatura quando  $TD$  for expresso em  $^\circ\text{F}$ ;

$UR$  - umidade relativa média mensal (%);

$TD$  - diferença entre temperatura máxima média mensal e temperatura mínima média mensal, na eq. 3.17 em  $^\circ\text{C}$ ;

$T$  - temperatura média do ar.

### 3.3.5 - Método de Penman Corrigido pela FAO

Publicado no Manual 24 da FAO por DOORENBOS e PRUITT (1977) envolve uma função do vento mais sensível que o proposto por Penman, e um fator de ajuste  $c$ , baseado em condições climáticas locais, expresso por:

$$E_{T_o} = c \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2,7 w_f (e_z^o - e_z) \right] \quad (3.18)$$

$$\text{onde: } w_f = (1 + 0,864U_2) \quad (3.19)$$

$$(e_z^0 - e_z) = e^0 (T_{\text{média}}) - e^0 (T_{\text{ponto de orvalho}}) \quad (3.20)$$

$$(e_z^0 - e_z) = e^0 (T_{\text{média}}) (1 - UR/100) \quad (3.21)$$

Onde:

ET<sub>o</sub> - evapotranspiração tendo grama como referência, medida nas equações de 3.18 a 3.21 em mm/dia<sup>-1</sup>;

R<sub>n</sub> - Radiação líquida (da equação 3.18 a 3.21) em mm/dia;

G - fluxo de calor do solo (G = 0 para período diários);

U<sub>2</sub> - Velocidade do vento a altura de 2 m (m/s);

e - pressão de vapor (KPa);

c - fator de ajuste (tabela no FAO-24).

FREVERT et al. (1983) desenvolveram uma equação polinomial para cálculo de c., resultando em:

$$c = 0,68 + 0,0028 UR_{\text{máx}} + 0,018 R_s - 0,06 \frac{U_d}{U_n} + 0,013 \frac{U_d}{U_n} + 0,0097 \frac{U_d}{U_n} \frac{U_d}{U_n} + 0,430 \times 10^{-4} UR_{\text{máx}} \cdot R_s \cdot \frac{U_d}{U_n} \quad (3.22)$$

onde:

UR<sub>máx</sub> - umidade relativa do ar máxima diária (%);

R<sub>s</sub> - Radiação solar (mm/dia);

U<sub>d</sub>/U<sub>n</sub> - Relação de velocidade do vento diurna e noturna;

U<sub>d</sub> - Velocidade do vento no dia (período de 7 a 19 horas) em ms<sup>-1</sup>.

### 3.3.6 - Método de Penman-Monteith

A equação de Penman, combinada com os termos resistência da superfície e aerodinâmico, é a seguinte:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p [e_z^0 - e_z] r_a}{\Delta + \gamma^*} \quad (3.23)$$

Expressa da mesma forma que as equações combinadas, para uma atmosfera estável, a equação será:

$$\lambda E_T = \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} k_1 \frac{0,622 \lambda \rho}{P} \frac{1}{r_a} (e_z^o - e_z) \right] \quad (3.24)$$

$$\text{onde: } r_a = \frac{\ln[(Z_w - d) / Z_{om}] \ln[(Z_p - d) / Z_{ov}]}{(0,41)^2 U_z} \quad (3.25)$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + r_c / r_a) \quad (3.26)$$

$\gamma^*$  - Constante psicrométrica modificada (KPa<sup>o</sup>C<sup>-1</sup>)

onde:

$z_w$  - altura de medição da velocidade do vento (anemômetro);

$Z_p$  - altura de medição de temperatura e umidade (psicrômetro);

$\gamma$  - constante psicrométrica (mb/°C);

$U_z$  - velocidade do vento correspondente a altura  $Z_w$ ;

$k_1$  - coeficiente adimensional, para eq. (3.23 e 3.24).

$k_1 = 8,64 \times 10^4$  (quando  $U_z$  estiver em ms<sup>-1</sup>) e  $10^3$  ( $U_z$  em km dia<sup>-1</sup> na equação 3.25);

$R_n$  e  $G$  - com as mesmas unidades do termo aerodinâmico (MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>);

$\rho$  - densidade do ar (kgm<sup>-3</sup>);

$C_p$  - calor específico do ar a pressão constante (MJ.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>);

$\lambda$  - calor latente de vaporização (MJ.kg<sup>-1</sup>);

$P$  - pressão atmosférica (KPa);

$e$  - pressão de vapor de saturação (KPa);

obs.: as unidades de  $z$ ,  $d$ ,  $z_{om}$ , e  $z_{ov}$ , devem ser as mesmas

$r_c$  - resistência da superfície a difusão de vapor a partir do interior da folha;

$r_a$  - resistência aerodinâmica a transferência turbulenta de vapor e calor sensível a partir de superfície da planta;

$r_c$  e  $r_a$  são expressas nas mesmas unidades (comumente em sm<sup>-1</sup> ou scm<sup>-1</sup>);

$Z_{om}$  - altura da rugosidade da vegetação (cultura de referência em m);

$Z_{ov}$  - altura da rugosidade para transferência de vapor.

onde:

$$Z_{om} = h_c/8,15 = 0,123 h_c \quad (3.27)$$

$$Z_{ov} = 0,1 Z_{om} \quad (3.28)$$

$$h_c - \text{altura média da cultura de referência } (d = 2/3h_c) \quad (3.29)$$

onde: d - plano zero de deslocamento na altura da vegetação (m)

Segundo JENSEN et al. (1990), PENMAN (1948) não inclui a função de resistência a transferência de vapor d'água em sua equação original. Ele propôs para aplicações práticas, uma função empírica do vento ( $w_r$ ). Posteriormente desenvolveu uma equação que incluiu resistência para folha simples. Ainda segundo o autor RIJTEMA (1965) introduziu o termo resistência semelhante ao proposto por MONTEITH (1965). JENSEN et al (1990), considera a equação combinada com os termos aerodinâmico e resistência da superfície, como equação de PENMAN-MONTEITH, que concilia aspectos termodinâmicos e aerodinâmicos, e incluindo resistência aerodinâmica a transferência de vapor e calor sensível ( $ra$ ) e resistência da superfície a transferência de vapor ( $rc$ ).

### 3.3.7 - Método de Blaney-Criddle FAO -24

Este método é baseado na relação linear existente entre medidas de taxa de evaporação e um fator  $f$  de Blaney-Criddle, para vários locais onde foram feitas as determinações. Uma expressão para  $a$  foi desenvolvida e uma tabela de valores para  $b$  foi apresentada por ALLEN e PRUITT (1986), classificando os dados para vários locais de acordo com faixas de velocidade do vento, umidade relativa e insolação expressa como  $n/N$ , para o seguinte uso:

$$ET_o = a + b_f \quad (3.30)$$

$$f = p(0,46T + 8,13) \quad (3.31)$$

$$a = 0,0043 UR_{min} - n/N - 1,41 \quad (3.32)$$

onde:

$ET_o$  - taxa de evapotranspiração ( $E_T$ ) da grama como referência (mm/dia);

$P$  - percentagem de horas de brilho solar diário em relação ao total anual, para um determinado mês e latitude local;

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

$n/N$  - relação de horas de brilho solar medidas ( $n$ ) e possíveis de ocorrência( $N$ );

$UR_{\min}$  - umidade relativa mínima diária (%);

$Ud$  - velocidade do vento diária para uma altura de 2 m em (m/s).

FREVERT et al. (1983) apresentou a seguinte expressão para cálculo de  $b$ :

$$b = a_0 + a_1 UR_{\min} + a_2 n/N + a_3 Ud + a_4 UR_{\min} n/N + a_5 UR_{\min} Ud \quad (3.33)$$

onde:

$a_i$  - é um coeficiente de regressão de Frevert, recalculado por CUENCA (1987).

onde:  $a_0 = 0,82$ ,  $a_1 = -0,41 \times 10^{-2}$ ,  $a_2 = 1,07$ ,  $a_3 = 0,066$ ,  $a_4 = -0,60 \times 10^{-2}$  e

$a_5 = -0,80 \times 10^{-3}$ .

### 3.3.8 - Método do Tanque de Evaporação FAO-24

DOORENBOS & PRUITT (1975, 1977), proporcionaram roteiros detalhados para o uso de dados do Tanque Classe A, na estimativa de  $ET_o$ .

A evaporação do Tanque Classe A ( $E_{pan}$ ) é corrigida por um coeficiente  $K_p$ , segundo a equação:

$$ET_o = K_p \cdot E_{pan} \quad (3.34)$$

onde:  $K_p$  - é um coeficiente que depende do tanque, tipo e tamanho, além do ambiente ao seu redor.

JENSEN et al. (1990), lembram que há necessidade de ajuste no valor de  $K_p$ , dependendo da altura da cultura de referência e das condições climáticas existentes.

Segundo PEREIRA (1992), o valor de  $K_p$  varia com as condições de contorno do tanque, isto é, tamanho e natureza da área tampão, e condições de umidade relativa do ar e velocidade do vento.

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma análise da evapotranspiração de referência foi realizada considerando 3 diferentes situações:

a) Cálculos baseados em dados médios mensais

Resultados de evapotranspiração de referência, utilizando alfafa como cultura de referência a partir de dados médios mensais para os municípios de Pentecoste-CE e Mossoró-RN, obtidos através do programa de computador REF-ET versão 2.1 (Allen, 1991 e 1992). Os dados são referentes ao período de 1966 a 1986 (Pentecoste) e 1970 a 1982 (Mossoró). Este dados foram utilizados no REF ET para calcular a ETr através de 8 métodos, sendo que o método de Penman-Monteith foi considerado como padrão de comparação de acordo com a recomendação de vários pesquisadores (AMATYA et al., 1992, ALLEN et al., 1987 e 1989, HARGREAVES, 1990 e M. SMITH, 1991).

Também foram comparados dados mensais, dos municípios de São Luís do Curu próximo a Pentecoste e Mossoró relacionados ao método de Hargreaves 1974 (Hg74), com os demais métodos incluídos no REF-ET. A comparação foi feita tomando-se o mês de maior demanda e a média anual, em percentagem sendo o método de Penman-Monteith considerado 100%.

b) Cálculos baseados em dados médios diários

Também foram calculados pelo referido programa, a evapotranspiração de referência para a alfafa (ETr), a partir de dados médios diários da Estação Experimental do Vale do Curu (FEVC- Pentecoste), referente ao período de 1974 a 1978.

c) Cálculos baseados em ano chuvoso e ano seco

Levando-se em consideração a ocorrência de secas nos municípios abordados e o período de plantio de um cultura de ciclo curto (no inverno ou verão), procedimento idêntico foi aplicado para os dados diários da FEVC,

referente aos anos de 1977 (considerado ano normal de acordo com o ocorrência de precipitação) e 1979 (considerado um ano seco).

#### 4.1 - Evapotranspiração de Referência Calculada por oito métodos com dados médios mensais

No que se refere as séries históricas utilizadas nos cálculos de evapotranspiração de referência, baseada em dados médios mensais, vale resaltar que as mesmas não foram atualizadas para os período considerados

##### 4.1.1 - Evapotranspiração de Referência (ET<sub>r</sub>) da Estação Experimental do Vale do Curu (FEVC), Pentecoste-CE, com dados médios mensais no período de 1966 a 1986.

Na FIGURA 1, estão plotados os parâmetros climáticos para FEVC, de acordo com os dados apresentados na TABELA 1 (ver metodologia). Nesse gráfico são apresentadas as variações mensais ao longo do ano dos parâmetros utilizados como entradas do REF-ET quais sejam: temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, velocidade do vento e temperatura do ponto de orvalho. Esse último parâmetro não é fornecido como dado de entrada, porém o programa calcula o ponto de orvalho a partir dos dados de entrada. Pode se observar que estes parâmetros podem ser considerados quase que constantes ao longo do ano, havendo uma pequena variação com valores mínimos de temperaturas, radiação e vento ocorrendo de março a maio e valores máximos de setembro a dezembro.

Na TABELA 3 são apresentados os resultados de cálculos de ET<sub>r</sub>, em  $\text{mm.dia}^{-1}$  pelos 8 métodos analisados: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO-24 (FcPn), Penman 63 versão original (63 Pn), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO-24 (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO-24 (FB-C) e Tanque de Evaporação (FPan).

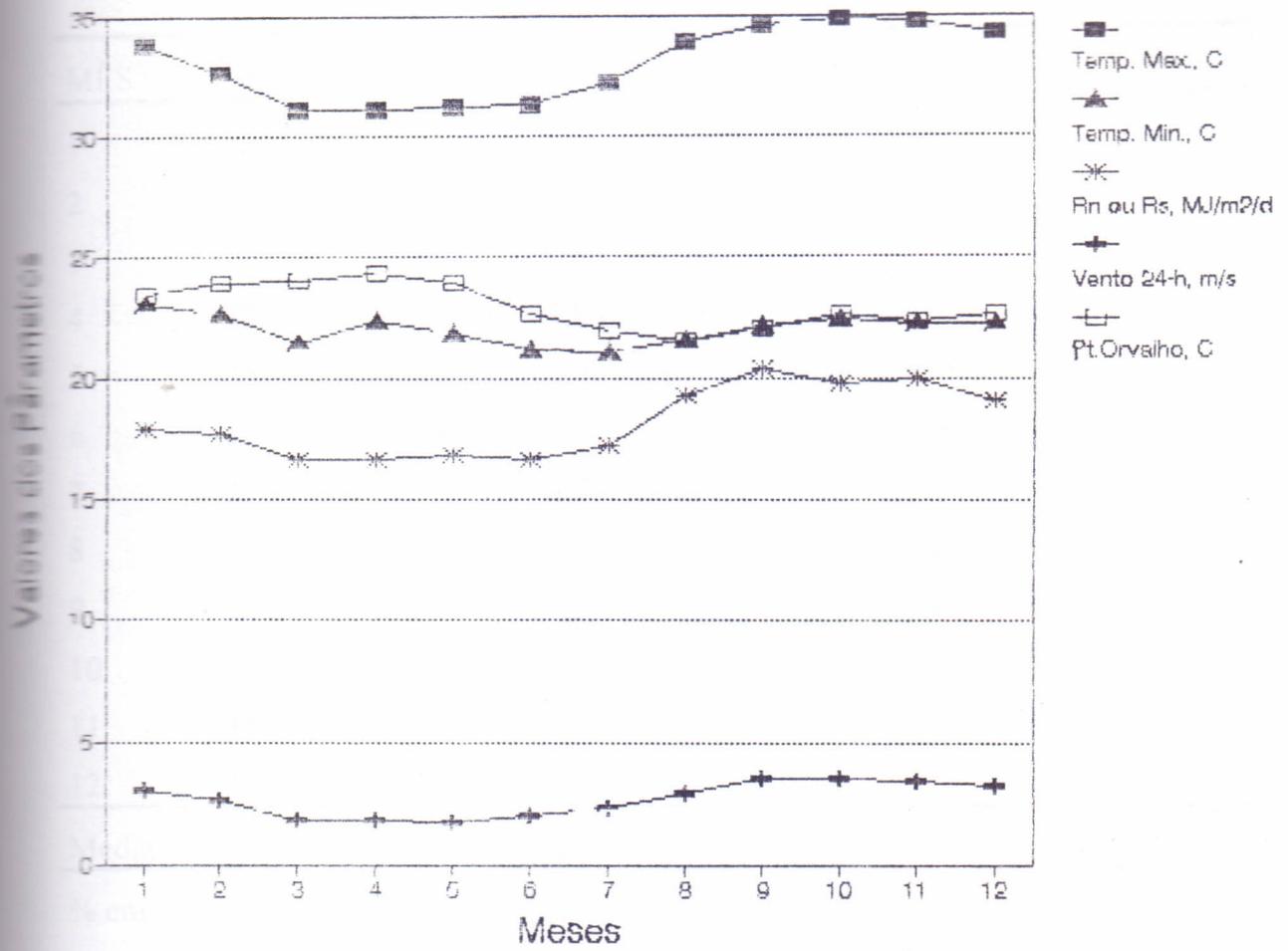


FIGURA - 1 Parâmetros climáticos de acordo com os dados mensais da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC), no período de 1966 a 1986 Pentecoste - CE.

TABELA 3 - Evapotranspiração de referência em  $\text{mm.dia}^{-1}$  obtidos pelos 8 métodos para o período de 1966-1986, com dados médios mensais da estação experimental do Vale do Curu, Pentecoste - CE.

MÊS	DIA	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPand
1	15	6,40	5,10	6,50	5,60	5,60	5,30	5,40	4,00
2	15	5,30	4,60	5,80	5,10	5,60	5,00	4,70	3,10
3	15	4,10	3,90	4,90	4,50	5,60	4,30	3,80	1,90
4	15	4,10	4,10	4,80	4,50	5,30	4,30	3,90	1,90
5	15	4,10	4,30	4,90	4,40	5,20	4,40	4,10	2,30
6	15	4,40	4,70	5,00	4,50	5,30	4,50	4,50	3,00
7	15	5,30	5,50	5,70	4,90	5,60	4,90	5,10	3,90
8	15	7,10	6,80	7,10	6,00	6,20	5,80	5,90	4,90
9	15	8,20	7,50	8,20	6,80	6,50	6,40	6,30	5,00
10	15	8,00	6,90	7,80	6,60	6,40	6,10	6,20	5,00
11	15	7,90	6,40	7,90	6,60	6,10	6,20	6,40	4,70
12	15	7,10	5,70	7,30	6,20	5,90	5,90	6,10	4,50
Média		6,00	5,46	6,33	5,48	5,78	5,26	5,20	3,68
% em relação									
PMon		100	91	106	91	96	88	87	61

Os resultados da TABELA 3 são apresentados de forma comparativa nos gráficos das FIGURAS 2 e 3. Na FIGURA 2, são plotados os resultados de ETr das diferentes equações combinadas de Penman. Na FIGURA 3, são plotados resultados de ETr determinados para: Harg, FRad, FB-C e FPan além de PMon, considerado mundialmente o método padrão de comparação. Na Tabela 3 observa-se que considerando o valor médio mensal calculado pelo método de PMon como 100, o resultado de Blaney-Criddle corresponde a 87% enquanto as demais formulações de Penman variam de 91 a 106. A pior estimativa é a do Tanque de evaporação com 61%.

Na FIGURA 2 observa-se o comportamento das curvas referentes aos métodos de PMon, KPen, FcPn e 63Pn. Todas as curvas têm um formato em S atingindo menores valores nos meses de março à maio, e os maiores em setembro e outubro, que correspondem aos meses de maior demanda evaporativa. Isto está de acordo com as variações dos parâmetros climáticos da FIGURA 1.

Dentre os métodos de estimativa de ETr, tomando-se o Penman Monteith como padrão comparativo no período analisado, observa-se melhor aproximação do método de FcPn. No início do período nota-se que o método de FcPn, superestimou a ETr em relação a PMon de 1% em janeiro. No período de fevereiro a julho o método de FcPn, superestima os valores de ETr em relação a PMon, de um máximo 19% nos meses de março e maio, a um mínimo de 7% em julho. A partir de agosto observam-se valores iguais nos meses de agosto, setembro e novembro, ocorrendo uma subestimativa em outubro e superestimativa em dezembro de 2%. Esse resultado é concernente com o trabalho de avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba-PI, (SILVA, 1989). No entanto, esse autor considerou o método de Penman Corrigido pela FAO-24 como padrão de comparação, o que difere do trabalho aqui apresentado.

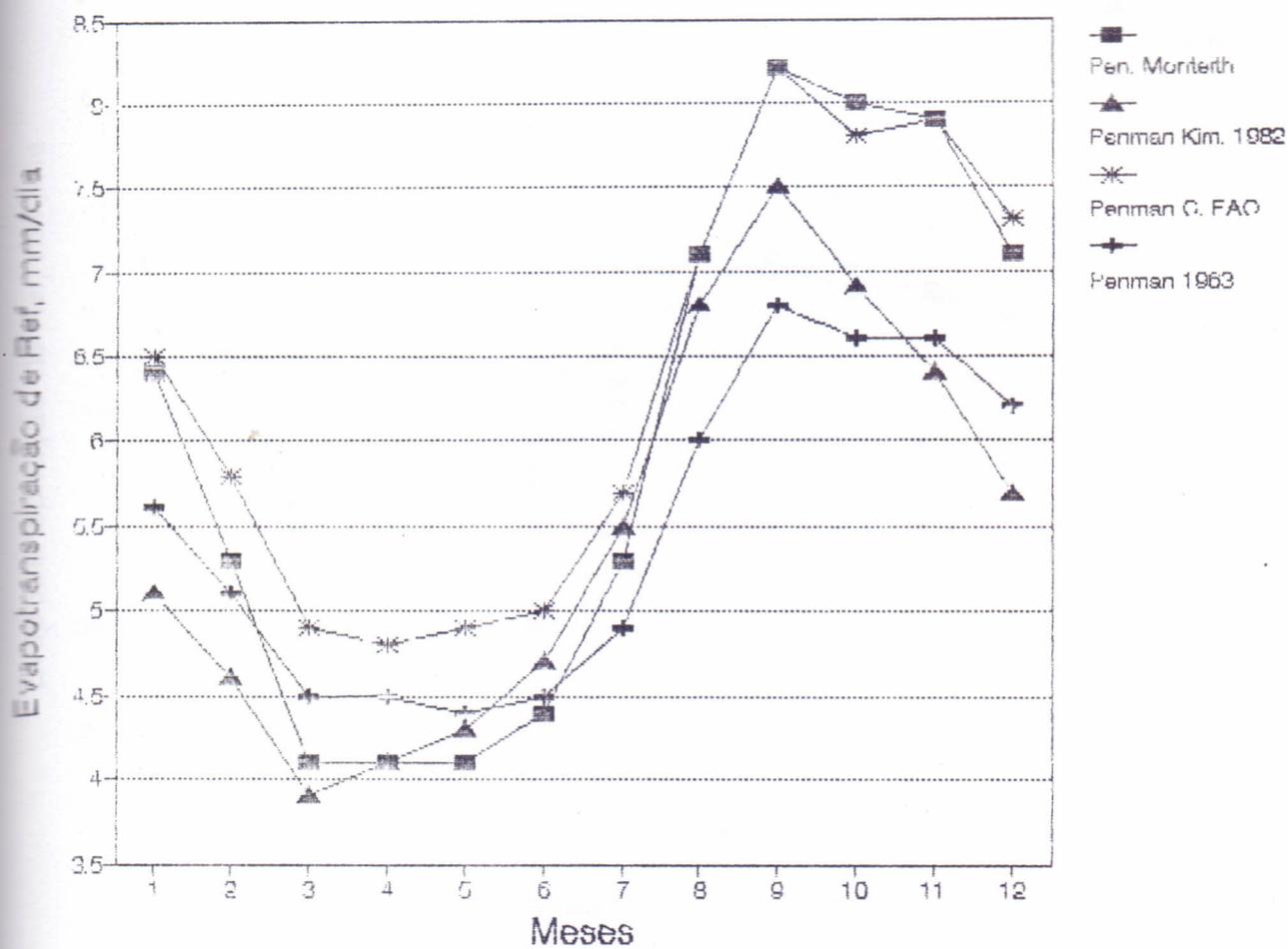


FIGURA - 2 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63Pn), baseada em dados médios mensais do período de 1966 a 1986 (FEVC).

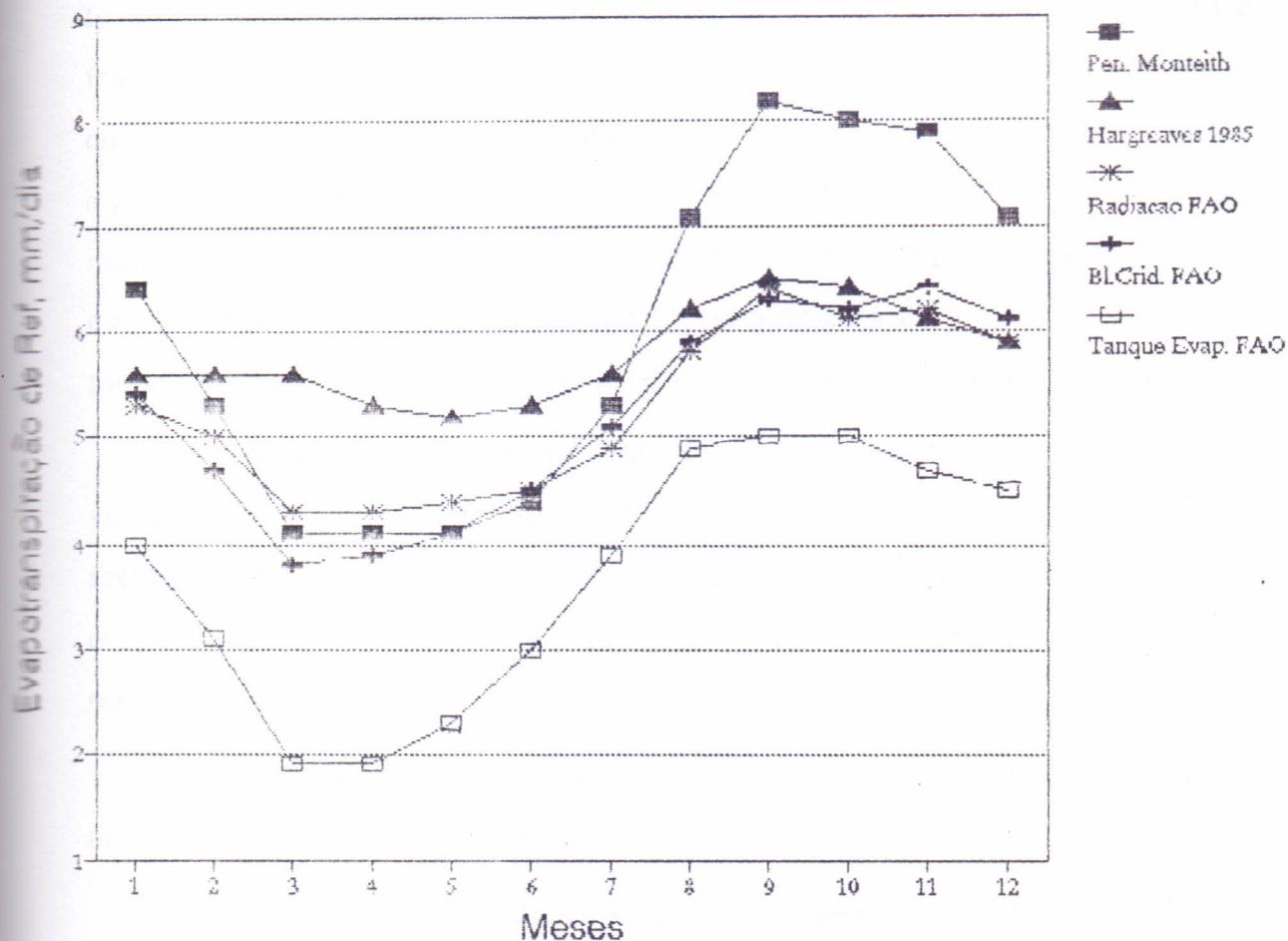


FIGURA - 3 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Hargreaves 1985, Radiação FAO (FRad), Blaney-Cridde corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), baseada em dados médios mensais do período de 1966 a 1986 (FEVC).

Nos demais métodos, observou-se subestimativas nos primeiros meses do período, ocorrendo uma aproximação de março a junho e nova subestimativa a partir de julho ao final do período. Entretanto, o método que menos se ajustou ao PMon, foi a versão original de Penman (63Pn). No início do período, janeiro e fevereiro, ele subestima a ETr em relação ao método de PMon em janeiro e fevereiro. Logo após, 63Pn e PMon se aproximam, tendo as curvas correspondentes aos métodos cruzadas entre fevereiro e março. A partir de março a junho, 63Pn superestima PMon em um mínimo de 2%, a um máximo de 9% em março e abril. No período de julho a dezembro 63Pn subestima os valores de ETr em um mínimo de 8% em julho, a um máximo de 20 a 21%, correspondente aos meses de setembro e outubro, onde a demanda evaporativa é maior.

A equação de Penman - Monteith difere da equação de Penman 63 versão original nos parâmetros referentes a resistência aerodinâmica,  $r_a$  e resistência da cobertura vegetal,  $r_c$ . Certamente, num período onde a demanda evaporativa e a velocidade dos ventos aumentam, esses parâmetros ( $r_a$  e  $r_c$ ) se tornam mais relevantes.

Na FIGURA 3 pode se comparar a estimativas de ETr correspondentes aos métodos de Harg, FRad, FB-C e FPan, com o método de Penman-Monteith.

Os métodos de Blaney-Criddle Corrigido pela FAO-24 (FB-C) e Radiação FAO (FRad), aproximam-se melhor do padrão em relação aos demais. O FB-C subestima os valores de ETr em relação a PMon, de janeiro a abril, correspondendo ao mesmo valor em maio. Em junho o FB-C superestima os valores de PMon em 2%; a partir daí, subestimando a ETr durante o segundo semestre. A variação no decorrer do período é de um mínimo de 2% para o mês de junho, a um máximo de 30% correspondente a setembro. Quando se compara o método FRad observa-se que este aproxima-se também de PMon, em um valor mínimo de 2% em junho e um máximo de 31% em outubro. No entanto, o método de Hargreaves (Harg) apresentou valor inferior a PMon em janeiro 14%, superestimando os valores de fevereiro a julho e a partir daí subestimando a ETr.

Dentre os métodos analisados na FIGURA 3, o que menos se ajustou ao padrão, foi o método do Tanque de Evaporação FAO-24 que subestima a ETr de um valor mínimo de 35% em julho, a um máximo de 68% no mês de novembro. Esse resultado leva a conclusão de que o método baseado na Evaporação do Tanque Classe A (FPan), em estimativas médias mensais de ETr, para as condições reinantes em Pentecoste-CE (FEVC), é o menos aconselhável entre os métodos testados.

#### 4.1.2 -Evapotranspiração de Referência (ETr) para Estação Meteorológica de Mossoró-RN, com dados médios mensais no período de 1970 a 1982.

A FIGURA 4 é uma representação da distribuição ao longo do ano dos parâmetros climáticos da Estação Meteorológica de Mossoró, de acordo com a TABELA 2 (ver metodologia). Nela são apresentadas as curvas referentes a cada parâmetro: temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação líquida ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ ), velocidade do vento ( $\text{m}/\text{s}$ ) e temperatura do ponto de orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ ). Com exceção das curvas de temperatura do ponto de orvalho e temperatura mínima, as demais não se cruzam. O ponto em comum das curvas referidas anteriormente pode ocorrer, devido ao fato de a temperatura do ponto de orvalho (T<sub>dew</sub>) estar relacionada com a pressão de vapor e temperatura psicrométrica do bulbo úmido, conforme verificado em Allen (1991). Daí porque os valores de T<sub>dew</sub> no período chuvoso serem superiores aos valores de temperatura mínima, ao contrário do que ocorre no período do verão. Observa-se que a variação anual dos parâmetros climáticos de Mossoró segue a mesma tendência dos dados de Pentecoste.

Na TABELA 4, são apresentados os resultados de cálculos de evapotranspiração de referência (ETr), referente ao período de 1970 a 1982, a partir de dados médios mensais da Estação de Meteorologia de Mossoró - RN. Os resultados das médias mostram a mesma tendência que Pentecoste, com menor ajuste associando a Penman 63, em relação aos métodos combinados.

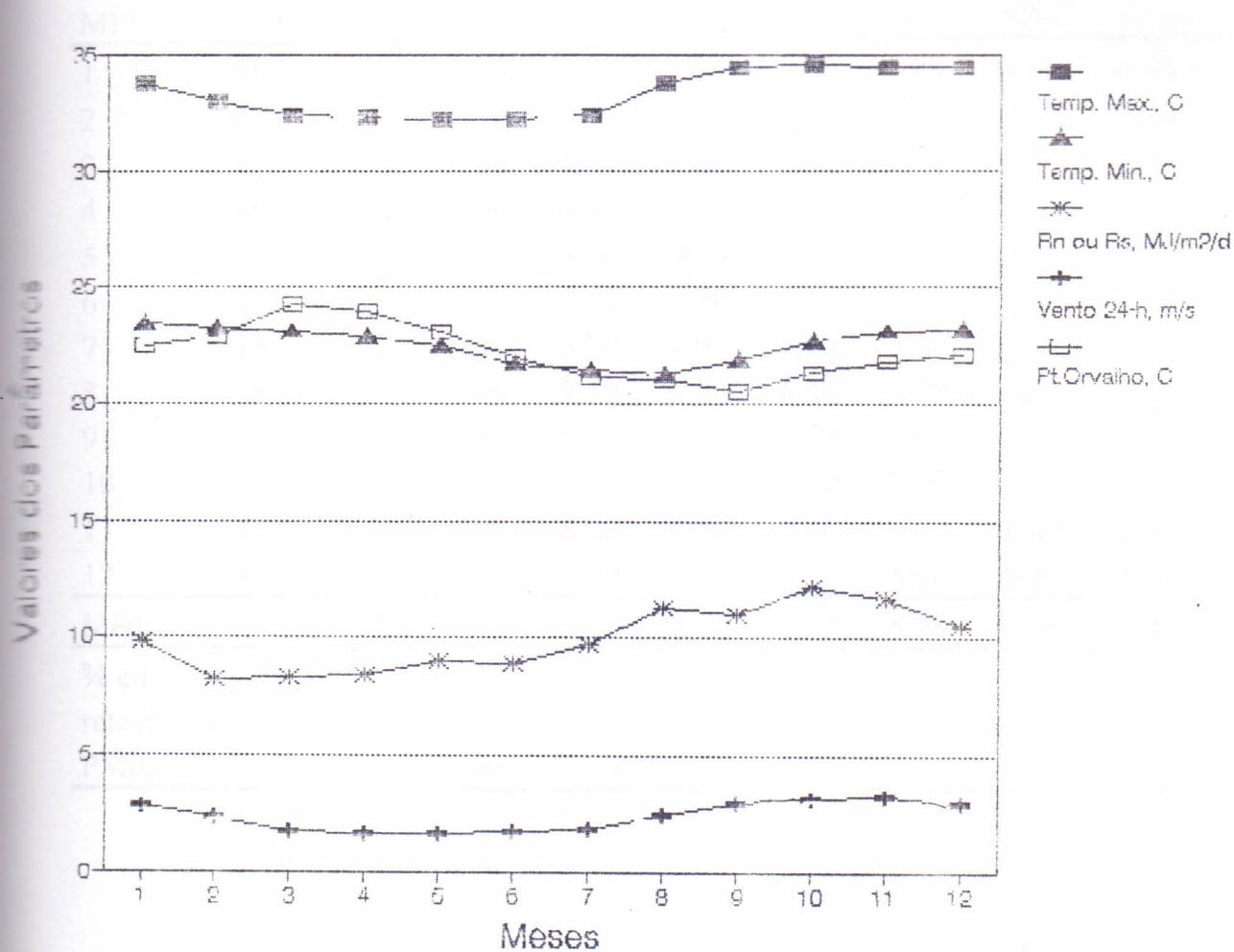


FIGURA - 4 Parâmetros climáticos de acordo com os dados mensais da Estação Meteorológica de Mossorô - RN, no período de 1970 a 1982.

TABELA 4 - Evapotranspiração de referência em  $\text{mm.dia}^{-1}$ , obtidos pelos 8 métodos para o período de 1970-1982, com dados mensais médios da estação meteorológica de Mossoró - RN.

MÊS	DIA	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPan/
1	15	6,50	4,80	6,50	5,50	5,40	5,80	5,80	6,40
2	15	5,10	3,80	5,30	4,40	5,50	5,50	5,20	5,20
3	15	3,90	3,40	4,30	3,80	5,60	4,90	4,40	3,50
4	15	3,90	3,50	4,40	3,80	5,60	5,00	4,50	3,30
5	15	4,20	4,20	4,80	4,20	5,50	5,00	4,70	3,50
6	15	4,60	4,80	5,10	4,40	5,50	5,00	5,00	4,00
7	15	5,20	5,40	5,70	4,90	5,70	5,30	5,30	5,20
8	15	6,70	6,40	7,10	5,90	6,30	6,20	6,10	6,40
9	15	7,80	6,80	8,00	6,40	6,50	7,00	6,70	7,40
10	15	8,20	6,90	8,30	6,70	6,20	7,20	6,80	6,70
11	15	7,90	6,30	8,00	6,50	5,80	6,60	6,60	6,90
12	15	7,10	5,40	7,10	5,90	5,60	5,90	6,10	6,60
Média		5,92	5,14	6,21	5,20	5,77	5,78	5,60	5,42
% em relação a									
PMon		100	86	104	87	97	97	94	91

Estes resultados são apresentados na FIGURA 5, onde estão plotados os resultados de evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 63 versão original (63Pn).

Vale salientar, mais uma vez, que neste trabalho o método de Penman-Monteith é considerado como padrão de comparação.

No caso da FIGURA 5, o método abordado que melhor se ajusta a PMon, como no caso anterior da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC), foi o de Penman Corrigido pela FAO-24 (FcPn). Nota-se que com exceção ao FcPn, todos os métodos subestimaram a evapotranspiração de referência em relação a PMon, sendo a curva correspondente ao método de 63Pn, a que se manteve mais afastada da curva padrão no período considerado. Este resultado está de acordo com aqueles obtidos em Pentecoste (FEVC).

No primeiro semestre os resultados referentes a PMon, diferenciaram-se de 63Pn, a partir de um mesmo valor referente ao mês de maio, e um máximo de 15% em janeiro. Com relação ao período seco que se inicia em julho, a variação é de um mínimo de 6% no início a um máximo de 18% em setembro.

Na FIGURA 5, o método FcPn, ajusta-se melhor a PMon. A variação percentual ocorre a partir de resultados com os mesmos valores observados nos meses de janeiro e dezembro, a um máximo de 14% no mês de dezembro.

Observou-se um menor ajuste do método de Penman Corrigido pela FAO-24 (FcPn) em relação a PMon, no caso de Mossoró - RN do que em Pentecoste-CE. Os dados de radiação para os dois municípios podem explicar este fato, pois para Mossoró foram utilizados dados de radiação líquida (Rn) e para Pentecoste, utilizou-se dados de radiação solar.

Na FIGURA 6 estão plotados os dados de evapotranspiração de referência (ETr) para os métodos de: Penman-Monteith (padrão), Hargreaves

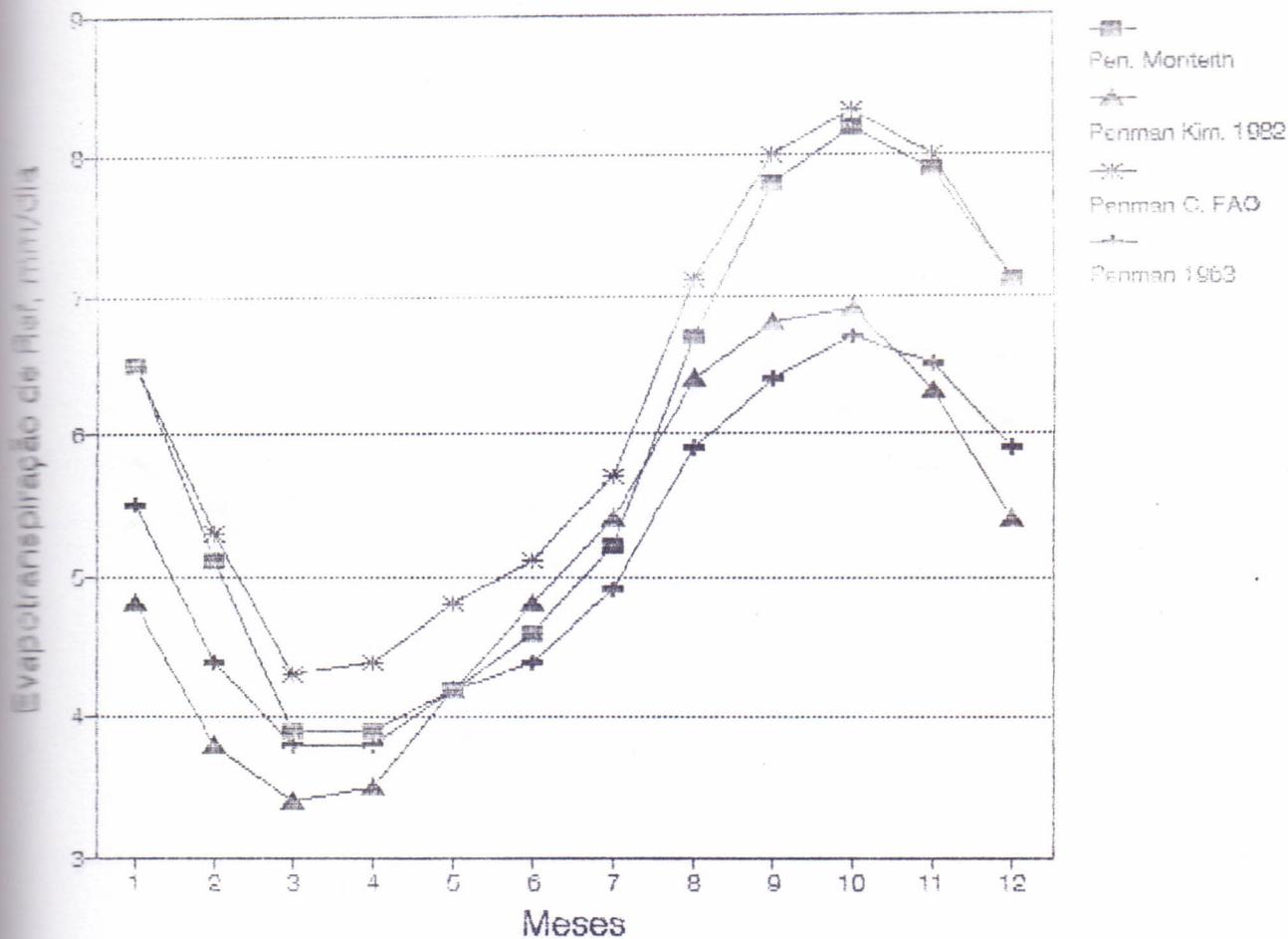


FIGURA - 5 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63Pn), baseada em dados médios mensais do período de 1970 a 1982 (Mossoró - RN).

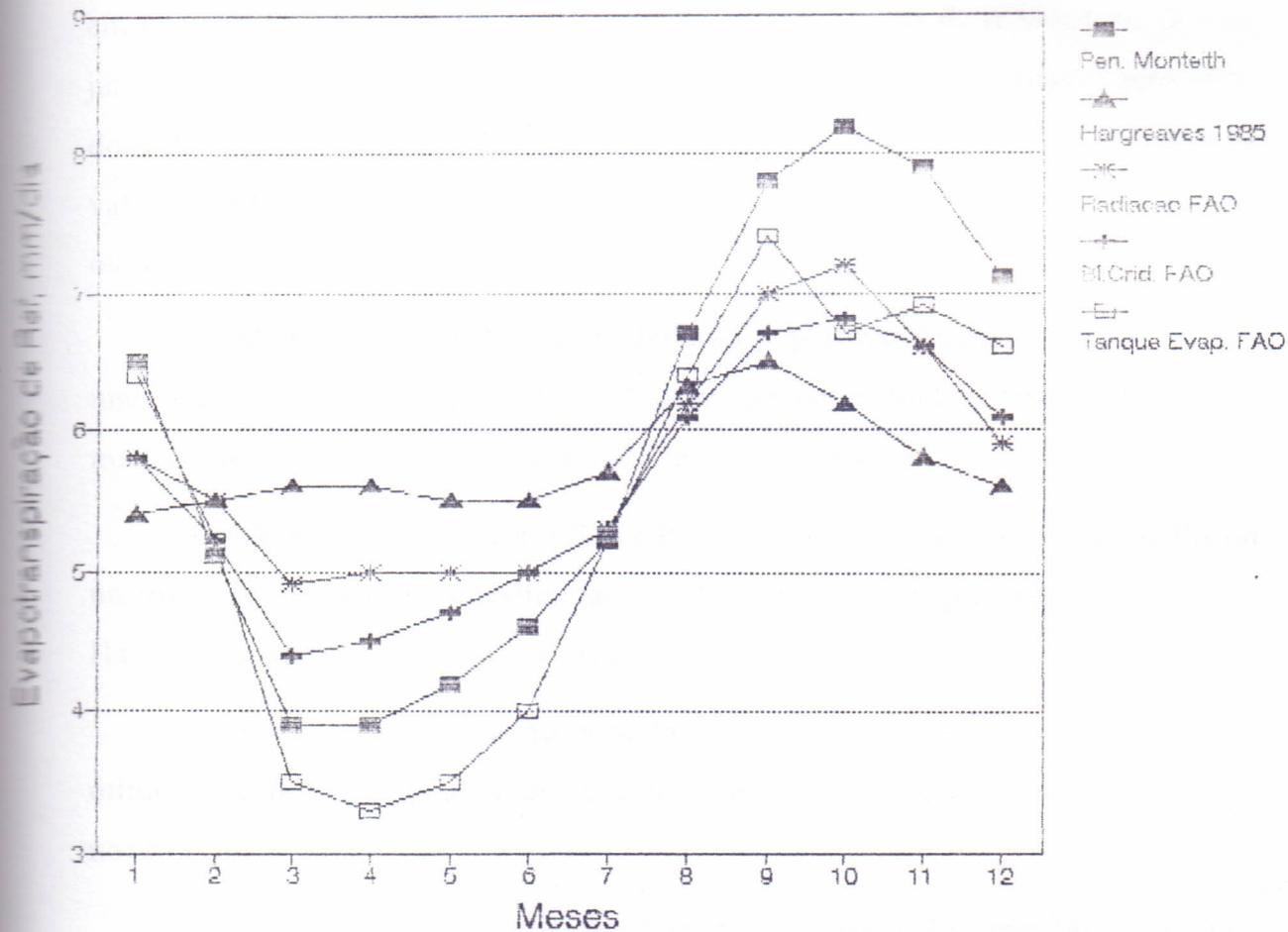


FIGURA - 6 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney - Criddle corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), baseada em dados médios mensais do período de 1970 a 1982 (Mossoró - RN).

1985 (Harg), Radiação FAO-24 (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO-24 (FB-C) e método do Tanque de Evaporação FAO-24 (FPan).

Observando as curvas, nota-se que o método FB-C ajustou-se mais ao padrão de comparação (PMon). Este comportamento é semelhante ao observado em Pentecoste. Todos os métodos subestimaram os valores de (PMon) no mês de janeiro. Em fevereiro FPan e FB-C apresentaram os mesmos resultados próximos do padrão PMon. Nos meses de março a dezembro, o método FPan subestimou os valores de PMon em um mínimo de 1,5% em julho a um máximo de 18% em outubro.

O método de FB-C, considerando o período total, teve seus valores mais aproximados ao padrão PMon. A diferença percentual no período foi de um mínimo de 2% em julho, a um máximo de 17% em outubro.

Os métodos de Harg, FRad e FB-C superestimaram os valores de PMon no primeiro período, e subestimaram no segundo, sendo que para o método de Hargreaves (Harg) a variação foi maior.

O método de Harg, no período, variou em relação a PMon de um valor mínimo de 6% em julho a um máximo de 26%, correspondente ao mês de novembro.

Vale ressaltar que nos dados de entrada para a Estação Meteorológica de Mossoró, a variável radiação utilizada foi a líquida, diferente da FEVC (Estação Experimental do Vale do Curu). Conforme AMATYA et al (1992), a radiação solar é o parâmetro mais sensível em todos os métodos combinados de Penman e métodos baseados na radiação. Eles afirmam que os métodos baseados na simples radiação, correspondem melhor a realidade do que os combinados de Penman, isso no caso da não disponibilidade de dados, onde a estimativa leva em consideração dados de estações próximas.

Com relação ao método de Hargreaves 1985, baseado nas temperaturas máximas e mínimas, não houve maiores oscilações da curva no período,

comportando-se de maneira semelhante as curvas de temperatura como se observa na FIGURA 4. De acordo com as diferenças de valores de  $E_{Tr}$  no período, certamente não seria um método recomendado para as condições de Mossoró, isso porque no verão subestima e no inverno superestima, os cálculos de evapotranspiração de referência, em relação ao padrão (P<sub>Mon</sub>).

#### 4.1.3 - Comparação entre as duas localidades

A TABELA 5 apresenta uma análise comparativa dos resultados de evapotranspiração de referência para alfafa ( $E_{Tr}$ ), para as duas localidades estudadas, Pentecoste-CE e Mossoró-RN. A análise compara o método de Penman-Monteith em relação aos demais métodos, com base nos dados apresentados nas tabelas 3 e 4. Esta análise foi feita para duas situações: o mês de máxima demanda considerado setembro e em relação a média anual. Cada procedimento foi analisado de forma percentual, em relação aos resultados que são apresentados em  $\text{mm dia}^{-1}$ . Considerando a importância da utilização do método de Hargreaves 1974, no dimensionamento de projetos de irrigação no nordeste, incluiu-se os resultados desta equação para os municípios estudados nesta análise.

Com relação ao mês de máxima demanda, no caso de dados obtidos a partir de média mensal, observam-se os seguintes aspectos:

##### 1 - métodos combinados

O método que melhor se ajustou a P<sub>Mon</sub> foi o Penman Corrigido pela FAO (F<sub>c</sub>P<sub>n</sub>), seguidos de Penman Kimberly 1982 (K<sub>Pen</sub>) e Penman 63 (63P<sub>n</sub>), respectivamente para as duas localidades.

##### 2 - métodos baseados na temperatura (Harg e FB-C)

TABELA 5 - Estimativa da Evapotranspiração de referência referente ao mês de maior demanda<sup>2</sup> e média anual<sup>3</sup>

Localidade	ETr (mm)									ETr (% em relação a PMon)							
	PMon	KPen	FcPn	Harg	63Pn	Hg74 <sup>4</sup>	FRad	FB-C	FPan	KPen	FcPn	63Pn	Harg	Hg74	FRad	FB-C	FPan
Pentecoste	8,2	7,5	8,2	68	6,5	5,58	6,4	6,3	5,0	91	100	83	79	68	78	77	61
Mossoró (máxima demanda)	7,8	6,8	8,0	6,4	6,5	5,8	7,0	6,7	7,4	87	102	82	83	74	89	85	94
Pentecoste	6,0	5,46	6,33	5,48	5,78	4,68	5,26	5,20	3,68	91	106	91	96	78	88	87	61
Mossoró (média anual)	5,92	5,14	6,21	5,20	5,77	4,88	5,78	5,60	5,42	86	104	87	97	82	97	94	91

<sup>2</sup> existem dois meses de maior demanda, no caso usou-se o mês de setembro, exceto para Hg74.

<sup>3</sup> a média anual foi feita a partir de dados médios mensais em períodos de: Pentecoste (1966-1986) e Mossoró (1970-1982)

<sup>4</sup> Hg74 - método de Hargreaves 1974 (mês de maior demanda outubro).

O método que melhor se ajustou a PMon em relação a Pentecoste foi Hargreaves 1985 (Harg) com 79%. No caso de Mossoró o FB-C ajustou-se melhor a PMon (85%).

O método de Hargreaves 74 foi o que apresentou o pior resultado dentre aqueles baseados na temperatura (68% para Pentecoste e 74% para Mossoró).

### 3 - método baseado na radiação (FRad)

O referido método no caso de Pentecoste obteve uma relação percentual de 78%, chegando a superar o método de FB-C. No caso de Mossoró atingiu 89%, ajustando-se melhor a PMon do que os demais métodos, exceto em relação a FcPn e FPan.

### 4 - Tanque de Evaporação FAO (FPan)

No caso de Pentecoste esse método ajustou-se menos em relação a PMon do que os demais. Entretanto, com relação a Mossoró, foi o segundo a ajustar-se melhor a PMon atingindo 94%.

Com relação a média anual baseada em dados médios mensais, o comportamento foi o seguinte:

#### 1 - Métodos Combinados

Os métodos que melhor se ajustam a PMon nessa análise, foram KPen e 63-Pn como o mesmo percentual para as localidades de Pentecoste 91%, Mossoró 86 e 87% respectivamente.

O método FcPn, observou-se a tendência verificada no estudo em questão e citada por vários autores, de superestimativa em relação a PMon.

#### 2 - Métodos baseados na Temperatura (Harg e FB-C)

No caso de Pentecoste o método de Hargreaves 1985 (Harg) chegou a 96% em relação a PMon, superando os demais métodos. Entretanto para Mossoró praticamente não houve diferença percentual entre os métodos baseados na

temperatura e PMon. Observa-se novamente que Hargreaves 1974 apresentou os piores resultados, subestimando a evapotranspiração em 78% para Pentecoste e 82% para Mossoró.

### 3 - Método baseado na Radiação (FRad)

Nos dados relacionados a Pentecoste FRad se correlaciona percentualmente a PMon em 88%, superando o método FB-C baseado na temperatura. Porém para Mossoró o referido método (FRad), ajusta-se melhor a PMon do que os métodos baseados na temperatura (FB-C), com uma diferença percentual mínima entre os mesmos. No caso do método de Harg o mesmo resultado foi obtido.

### 4 - Tanque de Evaporação FAO (FPan)

Esse foi o método que menos se ajustou a PMon no caso de Pentecoste, entretanto para Mossoró o mesmo ajustou-se em 91% superando os métodos combinados exceto o FcPn. O melhor ajuste obtido de FPan em Mossoró em relação a Pentecoste, pode ser consequência do manejo, leitura e manutenção de aparelhos melhor observado para o primeiro.

Embora não seja abordado o método de Hargreaves 1974 (Hg74) no software REF-ET, na TABELA 5.a foram incluídos dados referentes ao mesmo. O referido método tem importância pois, segundo SOUZA E YODER (1994), atualmente é muito utilizado no cálculo de evapotranspiração potencial em projetos de irrigação no nordeste brasileiro, principalmente.

Observando-se o TABELA 5 nota-se que no caso de Pentecoste, em relação as duas situações, o método de Hargreaves 1974 (Hg74) ajusta-se mais a PMon, somente em relação ao tanque de evaporação FAO (FPan).

Com relação a Mossoró o referido (Hg74) proporciona as menores estimativas, ou sejam: 74% na análise baseada no mês máxima demanda e 82% referente a média anual.

No caso de Pentecoste, provavelmente deve ter ocorrido problemas na manutenção, manejo ou leitura dos dados no Tanque de Evaporação Classe A,

para que as estimativas tenham resultados tão diferentes de Mossoró. Levando-se em consideração a esta hipótese, o método Hargreaves 1974 (Hg74), seguramente deve oferecer estimativas menos precisas que os demais métodos.

#### **4.2 - Evapotranspiração de Referência calculada por oito métodos com dados diários médios para o período de 1974 à 1978 (Estação Experimental do Vale do Curu - FEVC).**

Além das determinações de evapotranspiração de referência (ETr) terem sido obtidas com base em dados médios mensais, outra análise foi realizada com base em dados médios diários, utilizando-se dados selecionados do período 1974 a 1978.

Determinados autores apresentaram resultados do uso de PMon com estimativas muito boas, baseadas em dados de parâmetros climáticos médios diários. Entretanto recomendam cautela, como DOORENBOS e PRUITT (1977) mostraram o uso de dados médios diários em equações combinadas podem causar erros, devido as várias combinações de distribuição no dia com velocidade do vento, umidade e radiação líquida.

Entretanto estudos anteriores citam exemplos de cálculos mostrando claramente, que a equação de Penman-Monteith proporciona estimativas precisas de ETr, quando usados dados climáticos diários.

##### **4.2.1 - Evapotranspiração de Referência Média Diária, para o período de 1974 à 1978.**

Os resultados de cálculos da evapotranspiração de referência média diária do período de 1974 a 1978, foram obtidos para cada mês, de janeiro a dezembro, além dos gráficos referentes aos dados climatológicos e aos 8 métodos

de determinação de ETr. Entretanto, a discussão aqui apresentada se concentrará nos meses de fevereiro e outubro, cujos resultados se encontram nas TABELAS 6 e 7. O mês de fevereiro, corresponde ao período de plantio de uma cultura de ciclo curto durante a estação chuvosa, enquanto outubro se refere ao período de maior demanda evaporativa para qualquer cultura, na época em que há necessidade de irrigação.

Tomou-se os dois meses (fevereiro e outubro) por serem representativos das duas estações nas condições climáticas estudadas. O mês de fevereiro é caracterizado por elevadas medidas de umidade relativa média em torno de 83,68%, ocorrência de precipitações, baixos valores de velocidade do vento (média de 1,73 m/s), radiação solar média em torno de 395,6 cal. cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e evaporação média de 2,3 mm/dia. O mês de Outubro, com temperatura máxima mais elevada, é caracterizado por umidade relativa média em torno de 66,6%, velocidade do vento (média de 3,17 m/s), radiação solar média em torno de 442 cal.cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e evaporação média de 5,04 mm/dia. Apesar das diferenças entre os parâmetros, a temperatura média nos meses se aproximam (fevereiro 26,5°C e outubro 27,9°C).

Na FIGURA 7 estão plotados os parâmetros climáticos mais importantes para a análise da evapotranspiração nos mês de fevereiro, quais sejam: temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>/dia), velocidade do vento (m/s) e temperatura do ponto de orvalho (°C).

Observando-se a FIGURA 7, nota-se que nesse mês a velocidade do vento e as temperaturas mínima e do ponto de orvalho, praticamente permanecem constantes, em relação a curva de radiação solar. Nesse último caso, (Rs), as variações decorrem de período, ora nublados e ora claros, durante a estação chuvosa.

No caso da temperatura máxima a oscilação também é pequena, com um valor médio máximo correspondendo ao dia 6, onde a precipitação é zero, e a radiação solar atinge a 450 cal/cm<sup>2</sup>/dia.

TABELA 6 - Evapotranspiração de referência (ET<sub>r</sub>) média diária (mm/dia)-para o período de (1974-1978) referente ao mês de fevereiro, FEVC, Pentecoste - CE.

MÊS	DIA	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPan
2	1	4,1	3,8	4,6	4,2	5,3	4,4	4,0	2,2
2	2	4,2	4,0	5,1	4,6	5,1	4,5	4,1	2,6
2	3	4,0	3,8	4,9	4,5	5,1	4,4	3,9	2,5
2	4	4,1	3,9	5,1	4,6	5,1	4,5	4,0	2,5
2	5	3,5	3,2	4,0	3,8	5,1	3,5	3,4	2,7
2	6	4,6	4,3	5,7	5,0	5,8	5,1	4,5	2,9
2	7	3,5	3,4	4,0	3,9	4,9	3,7	3,3	3,0
2	8	3,1	3,1	3,6	3,6	4,6	3,3	2,9	2,0
2	9	3,5	3,5	4,2	4,0	5,4	3,9	3,5	1,7
2	10	3,8	3,7	4,6	4,3	5,2	4,3	3,7	2,0
2	11	2,8	2,8	3,1	3,1	4,7	2,9	2,7	2,3
2	12	3,1	3,0	3,7	3,5	5,2	3,3	3,1	1,3
2	13	3,5	3,4	4,3	4,0	5,0	3,9	3,4	2,2
2	14	3,9	3,9	5,0	4,5	5,1	4,5	3,8	1,8
2	15	4,8	4,4	6,0	5,2	5,4	5,3	4,5	2,1
2	16	4,3	4,0	5,1	4,5	5,5	4,5	4,1	2,9
2	17	4,0	3,9	4,7	4,3	5,3	4,3	3,8	2,9
2	18	3,9	3,8	4,8	4,4	5,3	4,3	3,8	2,0
2	19	4,5	4,3	5,6	5,0	5,3	5,0	4,3	2,4
2	20	4,3	4,1	5,3	4,8	5,5	4,7	4,1	2,8
2	21	3,1	3,0	3,4	3,4	5,0	3,1	2,9	3,1
2	22	3,0	2,9	3,4	3,4	4,9	3,1	2,8	2,0
2	23	3,6	3,6	4,5	4,2	4,8	4,0	3,3	2,0
2	24	3,9	3,9	4,9	4,4	5,4	4,5	3,7	1,4
2	25	4,0	3,9	4,7	4,3	5,5	4,4	3,8	2,0
2	26	4,2	4,2	5,8	5,1	5,2	5,0	4,1	2,1
2	27	4,3	4,2	5,4	4,8	5,6	4,8	4,1	2,3
2	28	4,3	4,3	5,3	4,8	5,1	4,9	3,9	2,4

TABELA 7 - Evapotranspiração de referência (ETr) média diária (mm/dia) para o período de (1974-1978) referente ao mês de outubro, FEVC, Pentecoste - CE.

MÊS	DIA	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPan
10	1	6,9	6,1	7,4	6,3	6,4	5,7	5,7	5,4
10	2	7,0	6,2	7,5	6,3	6,7	5,9	5,9	5,4
10	3	6,8	6,0	7,3	6,2	6,6	5,6	5,7	5,2
10	4	5,7	5,2	6,1	5,4	6,2	5,0	4,9	5,2
10	5	5,8	5,2	6,0	5,3	5,9	4,9	4,8	4,3
10	6	5,7	5,2	5,9	5,3	5,8	4,9	4,8	4,1
10	7	6,2	5,7	6,6	5,8	6,4	5,6	5,4	3,9
10	8	6,5	5,7	6,8	5,8	6,4	5,4	5,4	4,4
10	9	6,0	5,5	6,4	5,6	6,3	5,5	5,2	4,8
10	10	6,2	5,6	6,6	5,8	6,2	5,5	5,3	4,2
10	11	6,8	6,1	7,5	6,3	6,5	6,1	5,9	4,7
10	12	6,9	6,2	7,5	6,3	6,7	6,2	6,0	5,2
10	13	6,2	5,6	7,6	6,3	6,7	6,0	5,8	5,3
10	14	6,3	5,7	7,1	6,1	6,5	5,8	5,6	5,0
10	15	6,2	5,6	6,8	5,9	6,3	5,6	5,4	5,2
10	16	5,9	5,5	6,8	6,0	6,3	5,8	5,4	5,0
10	17	5,5	5,0	6,4	5,6	6,1	5,2	5,0	4,6
10	18	6,8	5,9	7,1	6,0	6,4	5,6	5,7	4,3
10	19	5,9	5,3	6,3	5,5	5,6	5,1	5,0	5,0
10	20	6,1	5,4	6,7	5,8	6,0	5,4	5,3	3,8
10	21	6,3	5,6	6,9	5,9	6,2	5,7	5,5	4,5
10	22	6,1	5,4	6,6	5,7	6,1	5,4	5,3	4,8
10	23	6,3	5,6	7,1	6,0	6,2	5,9	5,6	4,6
10	24	7,2	6,2	8,0	6,6	6,4	6,4	6,2	5,0
10	25	7,1	6,1	7,7	6,4	6,5	6,2	6,1	5,3
10	26	6,4	5,6	6,9	5,9	6,6	5,7	5,7	5,4
10	27	6,6	5,8	7,3	6,2	6,5	6,0	5,9	4,7
10	28	6,4	5,6	6,9	6,0	6,1	5,8	5,6	4,8
10	29	6,2	5,4	6,9	5,9	6,2	5,6	5,5	4,5
10	30	6,2	5,4	6,5	5,7	6,0	5,4	5,3	5,3
10	31	6,5	5,7	6,9	5,9	6,3	5,8	5,7	4,8

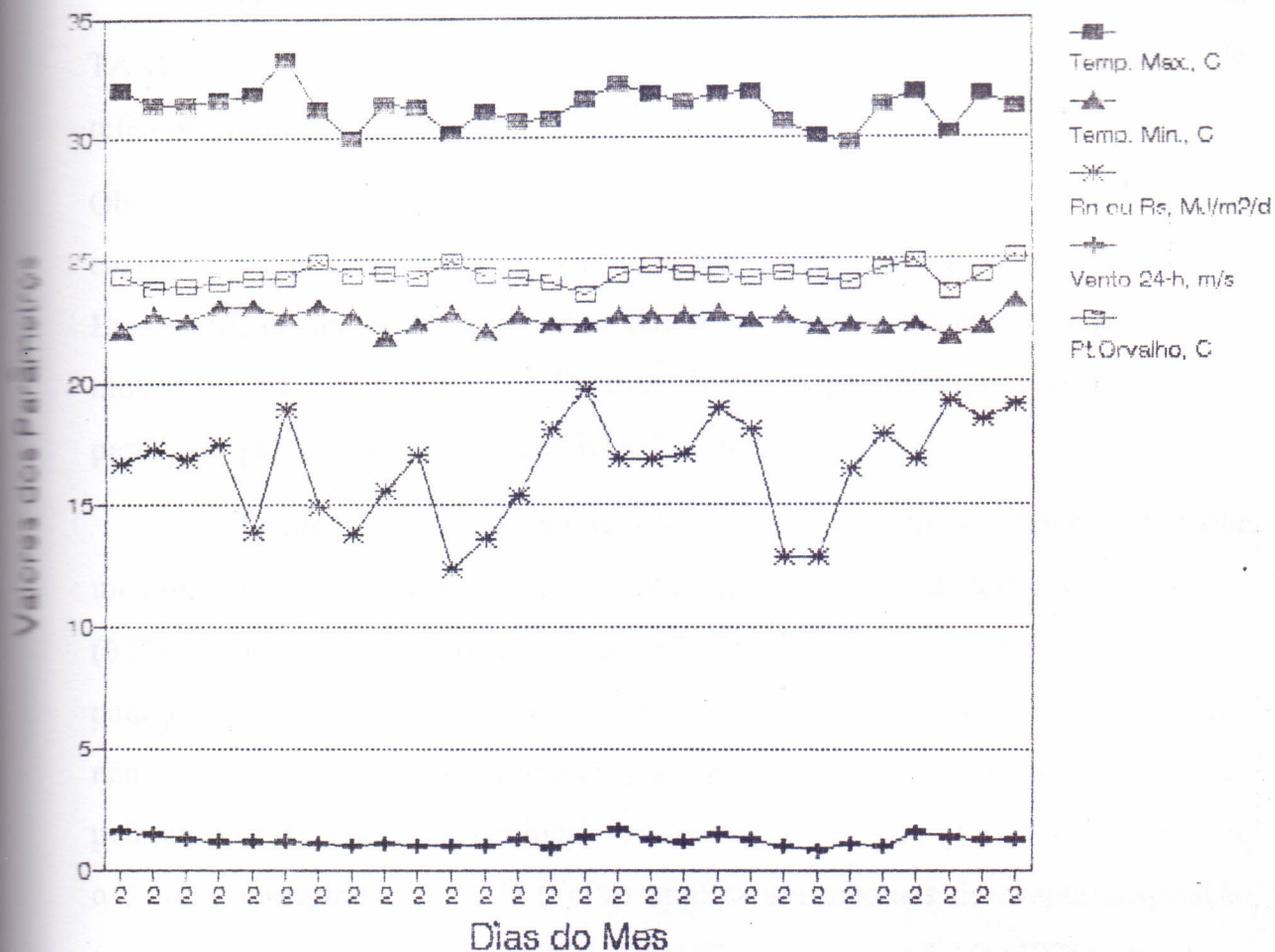


FIGURA - 7 Parâmetros climáticos referente a dados médios diários da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC), no período de 1974 a 1978, mes de fevereiro, Pentecoste - CE.

A FIGURA 8 apresenta as curvas correspondentes aos resultados de evapotranspiração de referência média diária do mês de fevereiro, para os métodos de: Penman-Monteith, Penman-Kimberly 1982, Penman Corrigido pela FAO e Penman 63.

Os valores correspondentes aos resultados (fevereiro), estão na TABELA 6. Mais uma vez o método de PMon, é considerado padrão de referência, daí porque aparece nas FIGURAS 8, 9, 11 e 12 (fevereiro e outubro).

Observa-se na FIGURA 8 que as curvas correspondentes aos métodos combinados se aproximam da curva padrão (Métodos de Penman-Monteith). Entretanto, os métodos de Penman Kimberly 1982 e Penman 63, se ajustam melhor ao PMon, em relação ao Penman Corrigido pela FAO, que durante todo o período superestima os valores de ETr (PMon).

O método de Penman Kimberly 1982 (KPen), referente aos dados médios diários, ajustou-se melhor a PMon em relação ao método de Penman 63 (63Pn), apesar de subestimativas em relação aos valores de ETr considerados padrão. CUENCA (1989) e ALLEN (1987) encontraram que o método de Penman não ajustado, apresentou resultados mais precisos do que o Penman Corrigido pela FAO (FcPn), para alguns locais. Ainda segundo o autor CUENCA (1989), se o método corrigido pela FAO (FcPn) implica em medidas de evapotranspiração superestimadas, de acordo com ALLEN (1987), o Penman FAO (1975) deverá ser aplicado. Vale ressaltar que o método de Penman FAO (DOORENBOS e PRUITT, 1975) não é objeto da análise, entretanto vale a referência pois o mesmo se aproxima da versão original de Penman (63Pn).

Na FIGURA 9 observam-se as curvas correspondentes aos métodos de Penman-Monteith, Hargreaves 1985, Radiação FAO, Blaney-Criddle Corrigido pela FAO e Tanque de Evaporação FAO. Com exceção dos métodos de Hargreaves 1985 (Harg) e o do Tanque de Evaporação FAO (FPan), os demais

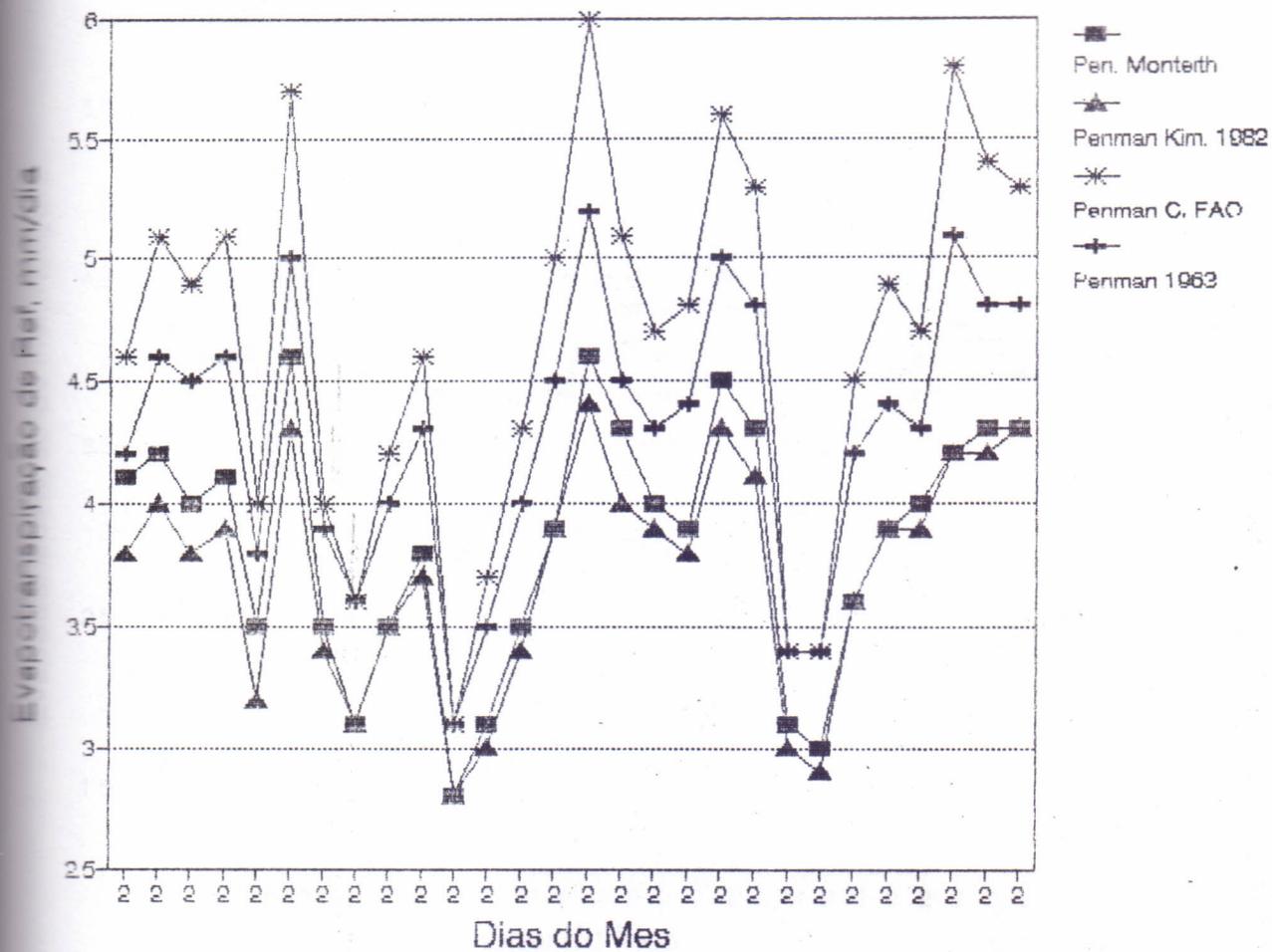


FIGURA - 8 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith(PMon), Penman Kimberly 1982(KPen), Penman corrigido pela FAO(FcPn) e Penman 1963(63Pn), baseada em dados médios diários do mes de fevereiro de 1874 a 1978 ( Pentecoste-CE ).

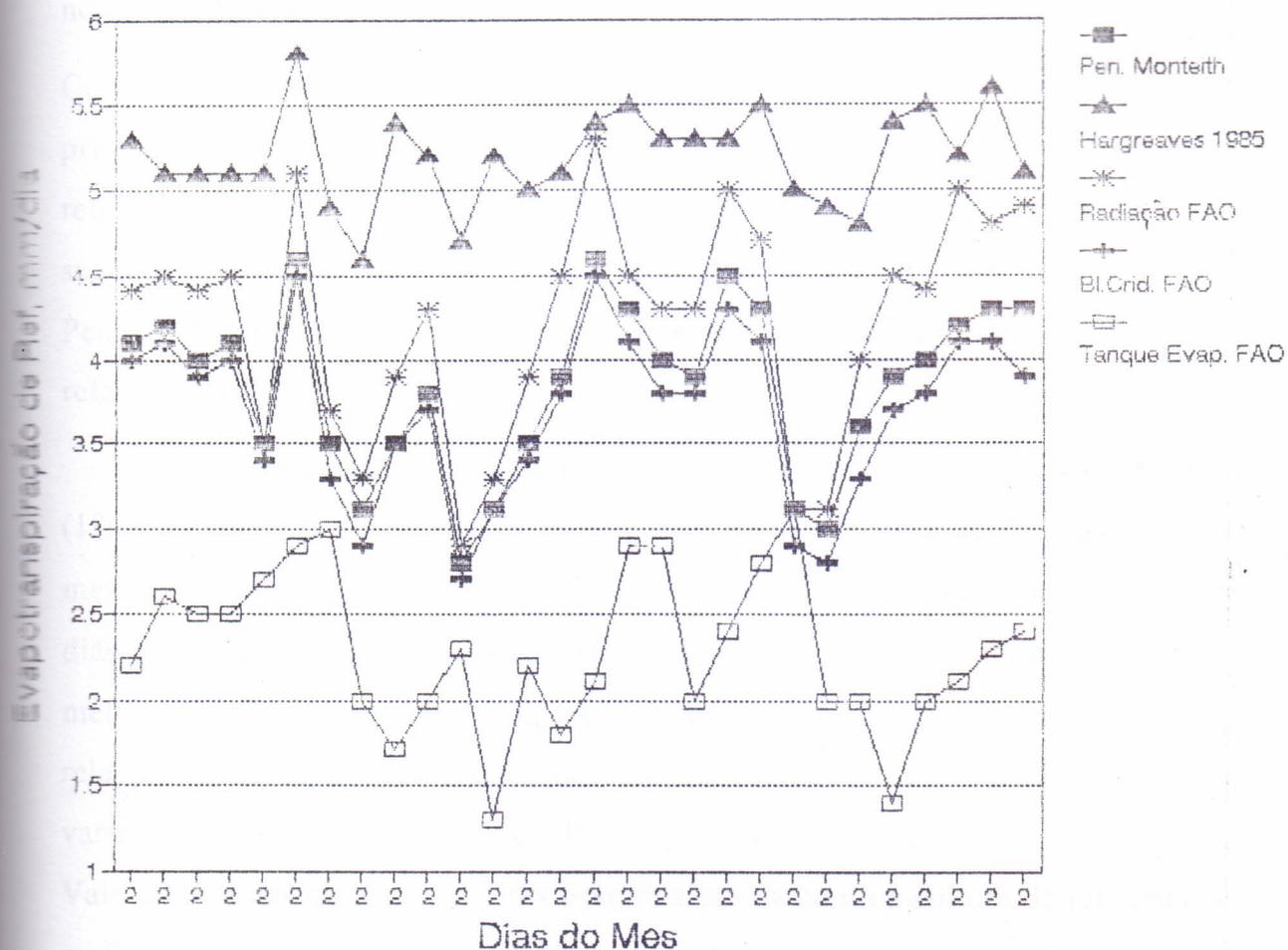


FIGURA - 9 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney - Criddle corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), baseada em dados médios diários do mês de fevereiro, no período de 1974 a 1978 (Pentecoste - CE).

ajustaram-se relativamente bem ao padrão.

O método de Blaney-Criddle FAO apesar de subestimar os valores de ETr em relação ao método de Penman-Monteith durante todo o mês, tendo uma variação mínima a partir de valores iguais nos dias 9 e 12, a um máximo de 9% no dia 28, ajustou-se melhor ao padrão.

Com relação aos métodos de Hargreaves 1985 e do Tanque de Evaporação, o primeiro superestimou os valores durante todo mês, em um mínimo de 15% referente aos dias 15 e 19 e um máximo de 40% no dia 12 do mês em questão. O segundo (FPan), variou durante todo o mês subestimando os valores em relação a Penman-Monteith, em um valor mínimo de 0% do dia 21 e um máximo de 54% referente ao dia 15.

O resultado observado acima está de acordo com SOUZA e YODER (1994) os quais comparando os resultados de evapotranspiração de referência no mesmo período de tempo (1974-1978), para a mesma localidade a partir de dados diários totalizados em meses, constataram que os valores obtidos através do método de Hargreaves 1985, superestimaram os valores de ETr calculados em relação ao de Penman-Monteith durante vários meses no período. Os valores variaram de uma faixa mínima de 4% a 8%, e uma faixa máxima de 32% a 35%. Vale acrescentar que estes autores usaram a grama como a cultura de referência, e realizaram suas comparações em base de cálculos diários totalizados para cada mes.

Segundo JENSEN et al. (1990), todos os métodos baseados na temperatura, com possíveis exceções para o Blaney-Criddle FAO, parecem requerer calibração local para proporcionar estimativas mais precisas de evapotranspiração potencial.

As FIGURAS 10, 11 e 12 e a TABELA 7, se referem ao mês de outubro do período de 1974 a 1978 onde são analisados dados médios diários.

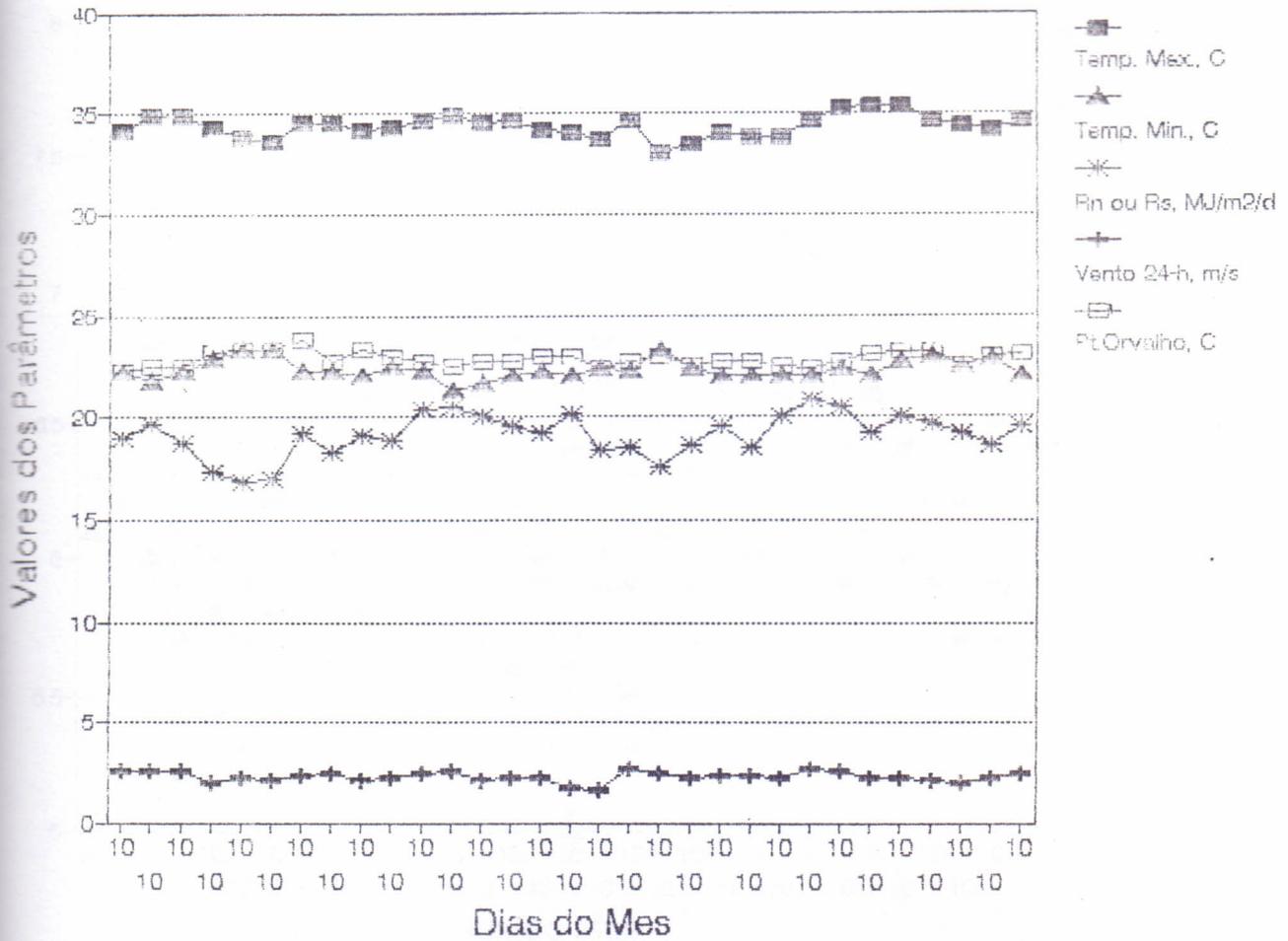


FIGURA - 10 Parâmetros climáticos referentes a dados médios diários da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC), no período de 1974 a 1978, mes de outubro (Pentecoste-CE).

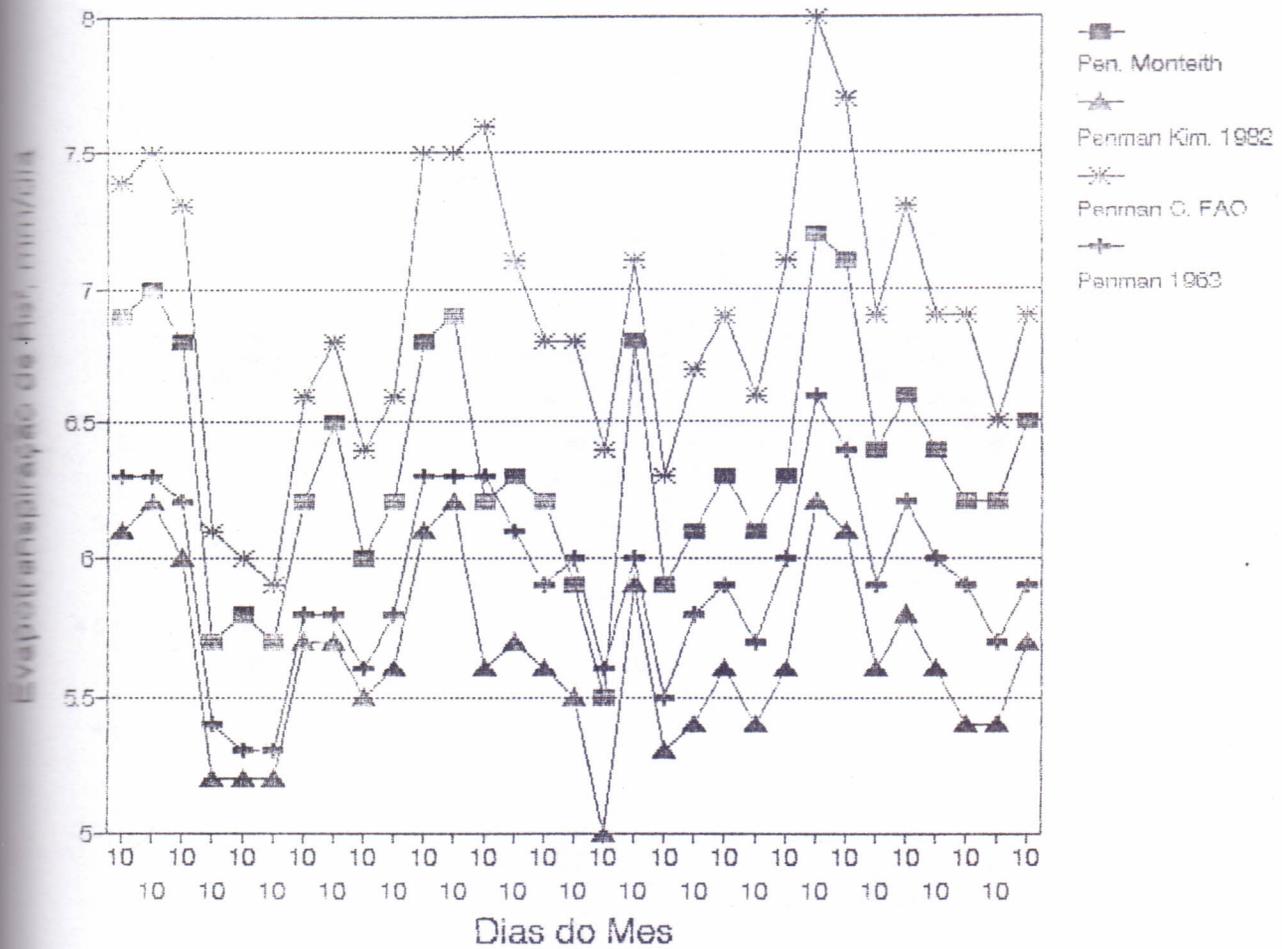


FIGURA - 11 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman corrigido pela FAO (FcPn) e Penman 1963 (63Pn), baseada em dados médios diários do mês de outubro, no período de 1974 a 1978 (Pentecoste-CE).

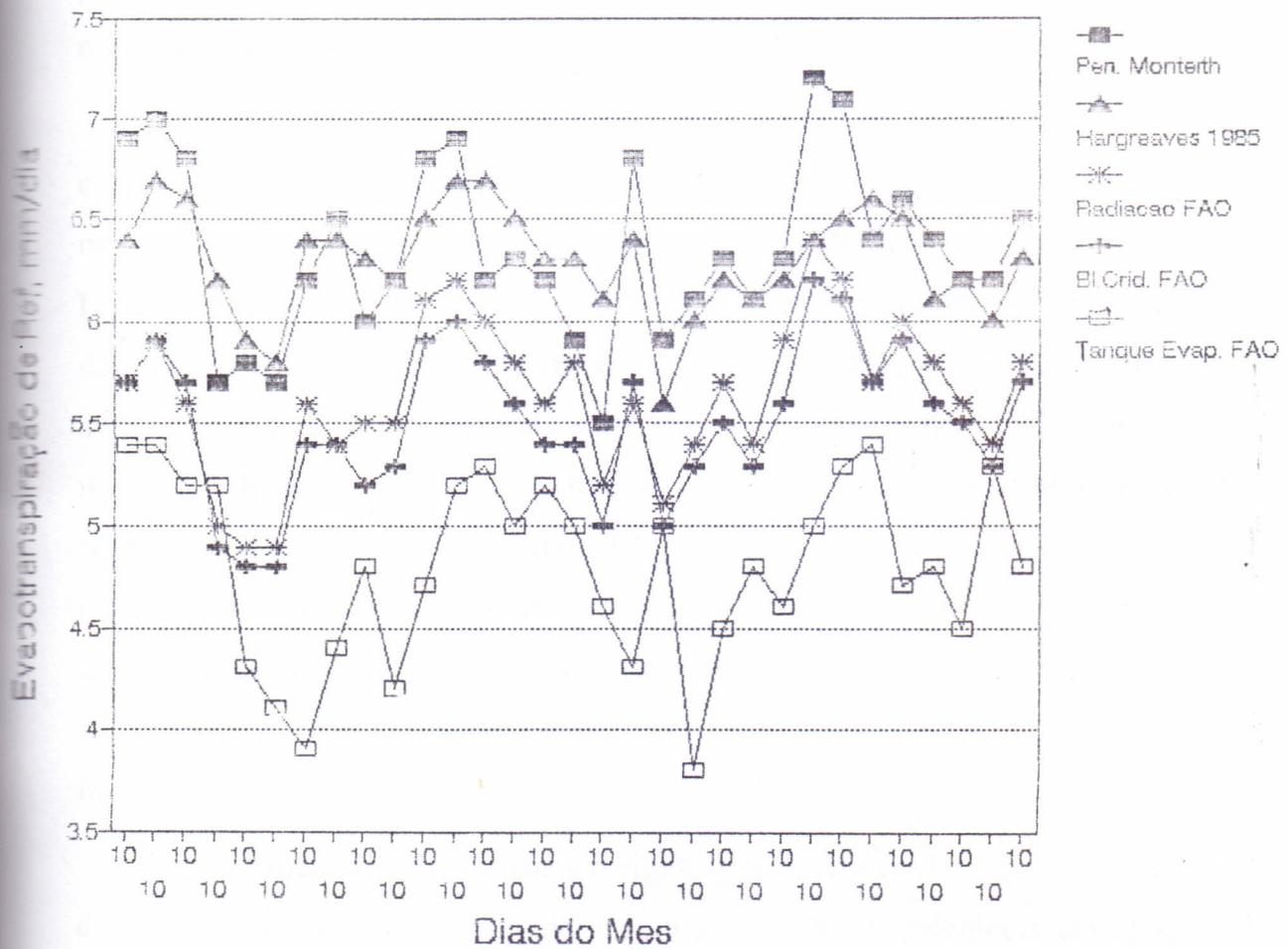


FIGURA - 12 Evapotranspiração de referência calculada pelos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney - Criddle corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), baseada em dados médios diários do mês de outubro, no período de 1874 a 1978 (Pentecoste-CE).

Na FIGURA 10 estão plotados os dados climáticos para o mês de outubro, tais como: temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho, radiação solar e velocidade do vento. Assim como o mês de fevereiro, comentado anteriormente, as curvas referentes a temperaturas e velocidade do vento, permanecem praticamente inalteradas durante o mês. Entretanto, pequenas oscilações são observadas na curva de radiação solar.

Com relação a FIGURA 11 observam-se os resultados da evapotranspiração de referência com dados médio diários calculados pelos métodos de: Penman-Monteith, Penman Kimberly 1982, Penman Corrigido pela FAO e Penman 63 versão original. Nota-se que as curvas referentes aos métodos de Penman Kimberly 1982 (KPen) e Penman 63 (63Pn), se correlacionam bem, ainda que, os referidos métodos subestimem os valores do método padrão. O método de KPen diferencia-se em relação ao padrão em valores de no mínimo 7% para o dia 16, e um máximo de 14% para os dias de 24 e 25 do mês. Com referência ao método de Penman 63 (63Pn), nota-se um melhor ajuste em relação ao padrão de comparação, Penman - Monteith (PMon). Observa-se uma variação aproximada mínima de 2% nos dias 13, 16, 17 e uma diferença máxima de 13% no dia 18.

O método de Penman Corrigido pela FAO (FcPn), ao contrário dos demais, superestima os valores de evapotranspiração de referência em relação a PMon em todo o período. A variação alcança valores mínimos de 3% nos dias 5 e 6, e máximo de 18% no dia 13.

Na FIGURA 12 são apresentadas as curvas referentes aos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney-Cridle FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan). Observa-se um melhor ajuste em relação ao padrão (PMon) dos métodos de Hargreaves 1985 (Harg) e Radiação FAO (FRad).

HARGREAVES (1993) encontrou boa correlação entre sua equação (Hargreaves 1985) e as equações combinadas de Penman, recomendando a mesma

para uso geral devido a simplicidade de uso, pois requer somente dados de temperaturas máximas e mínimas, e a precisão dos resultados.

Comparando os resultados da TABELA 7 e as curvas referentes aos métodos na FIGURA 12, podemos afirmar que, o método de Hargreaves 1985 ajustou-se melhor ao PMon do que o da Radiação FAO.

O método do Tanque de Evaporação FAO subestimou os valores de PMon em todo o mês. A variação percentual em relação a PMon, foi de um valor mínimo de 8% no dia 4, a um máximo de 37% nos dias 7 e 20 do mês.

#### 4.2.2 - Evapotranspiração de referência média diária totalizados para cada mês, para o período de 1974 a 1978 (Estação Experimental do Vale do Curu).

A partir dos resultados de evapotranspiração média diária para o período de 1974 a 1978, os valores foram totalizados para cada mês como se observa na TABELA 8 e plotados em gráficos (FIGURAS 13 e 14).

A FIGURA 13 consta de curvas representativas dos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn), Penman 63 versão original (63Pn) e Hargreaves 1985 (Harg), para o período estudado (1974-1978).

A curva representativa do método de FcPn, superestima os valores em relação a PMon, durante todo o período. SOUZA e YODER (1994), utilizando a grama como cultura de referência, encontraram resultados semelhantes, comparando dados médios diários totalizados em meses para o mesmo período em relação a Pentecoste, a curva permaneceu acima durante todo o período.

Com relação as curvas dos métodos de Penman Kimberly 1982 e Penman 63, parecem ajustar-se melhor ao padrão, já que permanecem a maior parte do período mais correlacionadas.

TABELA 8 -Evapotranspiração média diária em mm do período (1974-1978) totalizados em meses para os métodos de PMon, KPen, FcPn, 63Pn, Harg, FRad, FB-C e FPan.

Meses	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPan
Janeiro	156,2	133,1	172,6	153,1	168,6	148,1	145,7	117,9
Fevereiro	107,7	104,3	130,8	120,2	145,4	118,1	103,5	64,1
Março	107,6	108,7	131,9	123,5	156,8	114,4	100,4	50,1
Abril	105,0	110,1	129,5	106,8	152,2	117,1	99,5	46,3
Maiο	115,0	121,0	142,6	131,1	160,9	133,4	117,1	62,5
Junho	112,8	125,6	135,7	123,4	154,6	126,7	121,2	91,2
Julho	130,8	142,6	152,7	136,3	168,3	137,8	135,8	121,9
Agosto	177,5	177,2	200,7	172,7	191,6	167,7	165,0	161,6
Setembro	228,2	197,6	230,8	195,1	194,3	180,8	178,7	150,9
Outubro	196,7	175,1	214,1	183,8	195,1	174,7	170,6	148,7
Novembro	194,9	164,3	210,1	178,7	182,8	171,1	172,7	155,2
Dezembro	172,5	145,9	191,5	166,8	175,1	161,7	162,3	144,2

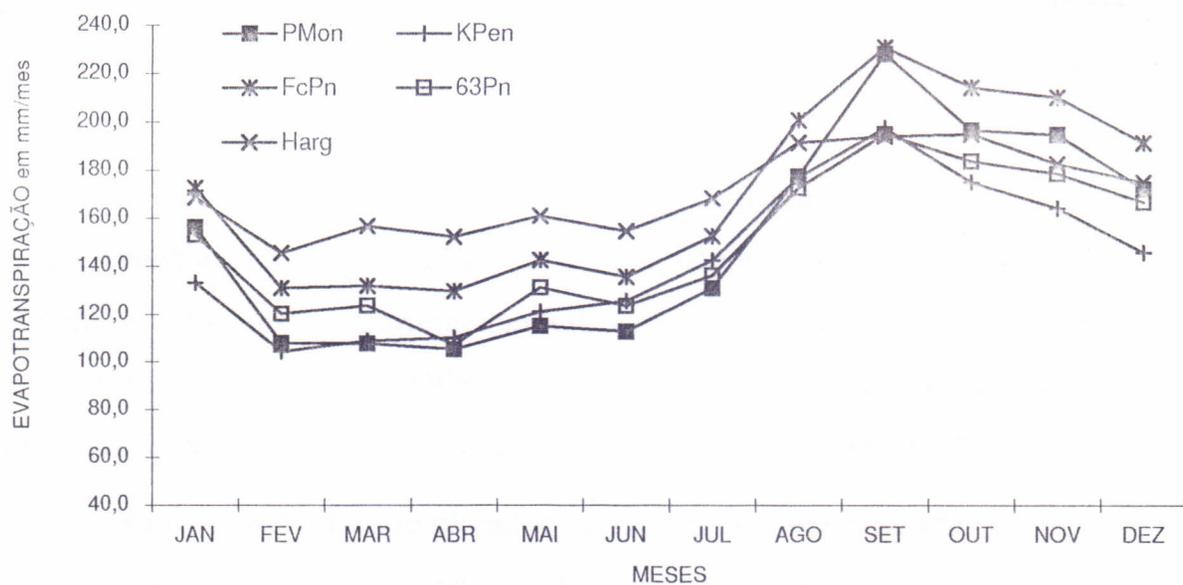


FIGURA - 13 Evapotranspiração média diária (1974 - 1978), totalizado em meses para os métodos de: PMon, KPen, FcPn, 63Pn e Harg.

Os valores de KPen diferem de PMon de um mínimo de 0,2% no mês de agosto, a um máximo de 13% referente a setembro. Em relação ao método de Penman 63, a diferença ocorre na faixa de um mínimo de 1,7% no mês de abril, a um valor máximo de 14% no mês de setembro.

O método de Penman Corrigido pela FAO (FcPn), superestimou os valores em relação a PMon durante todo o período. A variação de valores superestimados está na faixa de um mínimo de 1,1% em setembro e um máximo de 19% em maio.

O método de Hargreaves 1985 (Harg), ajustou-se menos ao padrão PMon, superestimando os valores de janeiro a agosto e em dezembro. Nos meses de setembro a novembro, ocorreram subestimativas. Este resultado é condizente com a análise de SOUZA e YODER (1994), que encontraram superestimativas de evapotranspiração potencial com as equações de Hargreaves 1974 e 1985..

Na FIGURA 14 estão plotados os valores de ETr totalizados em meses para os métodos de: Penman-Monteith, Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan). Nota-se claramente que o método FPan, ajustou-se menos em relação ao padrão do que os demais, subestimando os valores em todo o período. Os valores atingem um mínimo de 7% em julho, a um máximo de 19% em setembro. O resultado está de acordo com as análises anteriores, onde mais uma vez fica demonstrado que o referido método (FPan), pode ser aplicado para as condições de Pentecoste desde que observado as condições de instalação e manejo e estudos de calibração com lisímetro para estimativa do Kp.

Os demais métodos, FRad e FB-C, mantiveram-se mais ajustados a PMon, sendo que o segundo (FB-C) correlacionou-se melhor. Os valores em relação aos métodos de FB-C e PMon, diferem entre si em um mínimo de 2% em maio e um máximo de 21% em setembro.

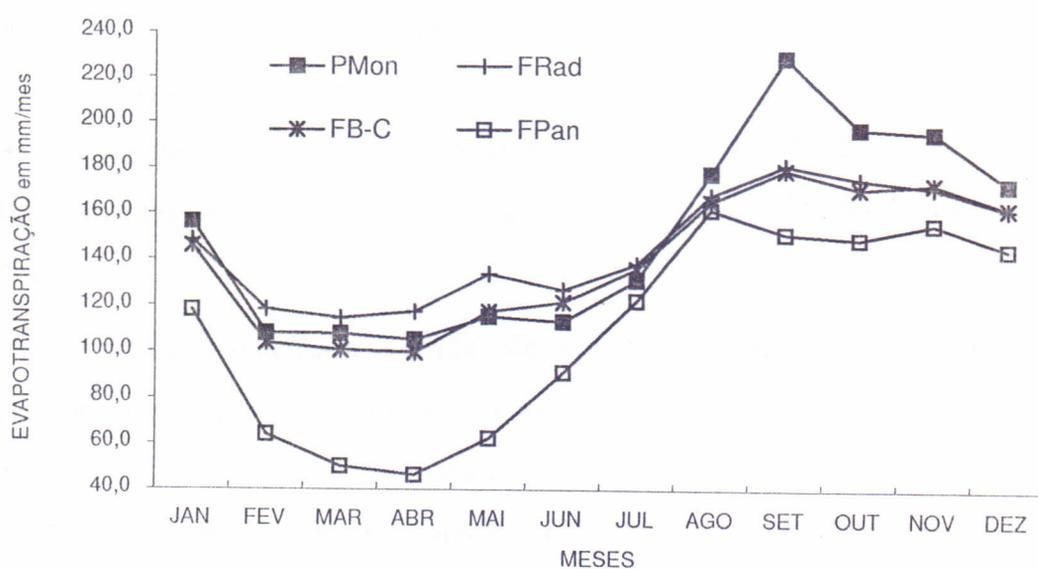


FIGURA - 14 Evapotranspiração média diária (1974-1978), totalizado em meses para os métodos de: PMon, FRad, FB-C e FPan.

Nota-se uma tendência do método de Penman Corrigido pelo FAO-24 (FcPn), a superestimativa. A tendência foi observada, nas análises de dados em períodos diários e totalizados em meses (1974 - 1978).

ALLEN et al (1994) observaram essa tendência de superestimativa do método FcPn, em estudos realizados por PRUITT e SWANN (1986) e PRUITT (1990), baseados em comparações com medidas de ETo (evapotranspiração-grama), e medidas micrometeorológicas, em Davis, Califórnia e New South Wales, Austrália. Os autores relatam que Weiss (1982) encontrou superestimativa do método (Penman Corrigido pela FAO-24), em relação a medidas de ETr (evapotranspiração de referência - alfafa), com lisímetros em Mead, Nebraska. Ainda segundo o autor, ALLEN et al (1982), encontraram superestimativas de ETr, pelo método de Penman Corrigido pela FAO-24, depois de ajustar a relação entre ETr/ETo para 1,25, em Scottsbluff, Nebraska.

Com relação a medidas de evapotranspiração de referência efetuadas em meses de pique de demanda evaporativa (no caso setembro a novembro) os autores (ALLEN, et al 1994), relatam que ALLEN et al (1989) e JENSEN et al 1990, encontraram superestimativas pelo método de FcPn, em relação a medidas de lisímetros localizados em U.S.A. e na Austrália. Os referidos locais, nos estudos, foram classificados como climas áridos e semi-áridos.

Na análise de dados médios diários do período de 1974 a 1978 (Pentecoste - CE ), dois meses foram tomados como representativos das estações predominantes, fevereiro (chuvoso) e outubro (seco). Entre os métodos comparados através de gráficos e tabelas, com relação a fevereiro, observou-se melhor ajuste a Penman-Monteith contra Penman Kimberly (1982) e Penman 1963 (Figura 8), Radiação FAO e Blaney - Criddle FAO (Figura -9).

No caso de outubro, observa-se melhor ajuste com as equações combinadas de Penman, entre Penman 1963 (Figura 11) e Hargreaves 1985 (Figura 12).

No primeiro caso, o método de Penman Kimberly 1982, parece ajustar-se melhor a PMon do que Penman 1963. Como a diferença entre os dois métodos,

decorre do valor dos coeficientes de função de vento ( $a_w$  e  $b_w$ ) determinados para as condições de Idaho, e considerando que KPen e PMon estarão associados a utilização de alfafa como referência, esse fato pode explicar a maior aproximação. Vale ressaltar, que as determinações foram baseadas na alfafa e somente PMon e KPen, estão associados a essa cultura, os demais métodos se baseiam na grama como referência. Os métodos de FRad e FB-C ajustaram-se melhor a PMon na Figura 9, sendo que FB-C aproximou-se mais do padrão. Conforme JENSEN *et al* (1990) todos os métodos baseados na temperatura com possível exceção de FB-C, parecem requerer calibração local ou regional para efetuar estimativas mais precisas.

DOORENBOS e PRUITT (1977) sugerem a aplicação de FB-C para estimativas de até 30 dias, porém ALLEN e PRUITT (1986) relatam que, a aplicação de FB-C com base em dados diários de temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa mínima, proporciona bons resultados.

No segundo caso, mês de outubro com base em dados médios diários, os métodos de 63Pn e Hargreaves 1985, ajustaram-se melhor a PMon.

Em Pentecoste, no segundo semestre do ano, de agosto a dezembro, normalmente ocorrem altas temperaturas, altas velocidades de ventos diurnas, elevada radiação solar e alto déficit de pressão de vapor. As diferenças de estimativas entre os métodos está associada a essas medidas. O resultado, no caso do método de Harg, é condizente com a análise de Hargreaves (1989), em que quatro lisímetros e Tanque Classe A na Califórnia, indicaram estimativas razoavelmente boas, baseadas em faixa média de temperatura (temperatura máxima menos temperatura mínima). Ainda segundo Hargreaves (1989), temperaturas máxima e mínima, podem ser usadas para determinar temperatura média do ar, radiação solar, umidade relativa, e pressão de vapor de saturação.

No caso do método de Penman 1963 (63Pn), vários autores citados anteriormente, constataram que o uso de equações combinadas de Penman proporcionam bons resultados. Segundo AMATYA *et al* (1992), vários autores têm mostrado que o método de Penman-Monteith (PMon) com resistência a troca de calor sensível e latente igual a zero ( $r_c = 0$ ), é essencialmente igual 63Pn, porém com uma função do vento diferente no caso de uma cultura verde

uniformemente bem molhada. De acordo com PERES (1994), a modificação consiste em substituir a função do vento pelo inverso da resistência aerodinâmica ( $r_a$ ). O modelo assim proposto proporciona a estimativa de evaporação de superfície livre de água, o que difere de evapotranspiração potencial (ETp) das culturas, onde geralmente ocorre um valor de  $r_c \neq 0$ .

#### 4.3 - Evapotranspiração de Referência calculada por oito métodos com dados diários totalizados para todos os meses de 1977 (ano normal) e 1979 (ano seco).

Para analisar se existe diferença na estimativa de ETr em um ano normal comparado a um ano seco, foram efetuados cálculos de evapotranspiração para dois conjuntos de dados selecionados.

##### 4.3.1 - Resultados de cálculos de evapotranspiração de referência, totalizados para o ano de 1977

Na TABELA 9 constam os dados de evapotranspiração de referência diária totalizados para cada mês, para o ano de 1977, considerado um ano normal em relação a ocorrência de precipitações para o local de estudo.

Na FIGURA 15 estão representadas as curvas referentes aos resultados de ETr, para os métodos de: Penman-Monteith, Penman Kimberly 1982, Penman Corrigido pela FAO, Penman 63 e Hargreaves 1985.

Nota-se que até o mês de agosto, o método KPen aproxima-se melhor do padrão (PMon), a partir daí subestimando os valores. O método de FcPn, superestima valores em relação a PMon, durante todo período considerado. O resultado é condizente com observações relatadas anteriormente (ALLEN et al, 1994). O método de Kpen varia em relação ao padrão de um mínimo de 0,9% a um valor máximo de 17%, referentes aos meses de agosto e novembro,

TABELA 9 - Evapotranspiração diária (1977) totalizados em mm/mes

Meses	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPan
Janeiro	120,3	105,1	133,0	122,0	151,8	115,0	114,0	109,5
Fevereiro	101,4	99,8	125,8	115,7	138,7	113,1	97,3	58,2
Março	106,4	108,2	131,6	123,0	154,1	117,7	99,7	57,2
Abril	112,2	117,6	141,3	130,4	154,7	125,5	104,3	52,0
Maio	114,4	125,1	148,6	131,6	158,8	136,9	117,7	68,1
Junho	93,3	106,3	112,9	104,9	145,3	109,3	103,3	70,2
Julho	113,9	126,3	135,7	123,1	148,1	122,9	120,6	119,4
Agosto	160,1	161,5	179,5	157,8	185,8	154,7	149,8	150,6
Setembro	220,1	190,6	224,2	191,7	200,2	172,4	175,0	131,3
Outubro	202,2	175,4	210,4	211,4	201,2	167,6	170,0	140,6
Novembro	197,9	164,6	214,0	182,1	187,1	178,4	175,8	139,9
Dezembro	175,0	147,9	196,6	170,1	181,8	165,4	167,3	135,5

respectivamente. Observa-se, portanto, que num período normal de precipitação, o método de Penman Kimberly 1982, ajusta-se bem ao método padrão (Penman-Monteith).

Na FIGURA 15 nota-se ainda, que o método de Hargreaves 1985 difere mais dos resultados obtidos pelo PMon, com exceção dos meses de outubro a dezembro.

O método de Harg, como observado anteriormente, não estima como precisão boa, os resultados de ETr em relação a Penman Monteith. No ano em questão ele superestima os valores até agosto e no mês de dezembro. A diferença observada no ano, no caso de Harg, é de um mínimo 0,5% e um máximo de 36% (junho). Deve-se levar em consideração, entretanto, a falta de dados de umidade relativa no mês de setembro, os quais foram substituídos por dados médios diários do período de 1974 a 1978. Segundo HARGREAVES (1993) a qualidade dos dados é tão importante quanto a equação de referência usada.

Na FIGURA 16 estão plotados os dados de evapotranspiração de referência, pelos métodos de: Penman-Monteith, Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), referentes ao ano de 1977.

Observa-se que os métodos que melhor se ajustaram ao PMon, foram o Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Radiação FAO (FRad). O método de FB-C, subestima os valores de PMon de janeiro a abril e agosto a dezembro. A variação percentual no ano é de um mínimo de 3% observado em maio a um valor máximo de 20% para setembro. Entre os dois métodos (FB-C e FRad), o FB-C ajustou-se melhor ao padrão de comparação (PMon).

O método que menos se ajustou ao padrão foi o FPan, com exceção dos meses de julho e agosto onde a diferença de estimativa foi de 4 a 6% a mais. Os valores são subestimados de janeiro a junho. Em julho ocorre uma superestimativa, e a partir de agosto a dezembro, ocorrem subestimativas em

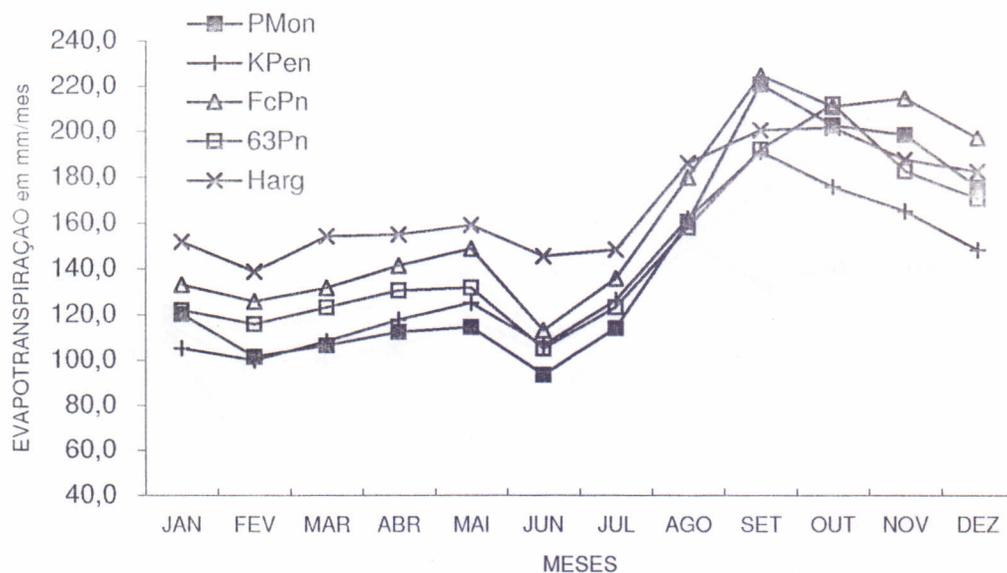


FIGURA - 15 Evapotranspiração diária (1977), totalizado em meses para os métodos de: PMon, KPen, FcPn, 63Pn e Harg.

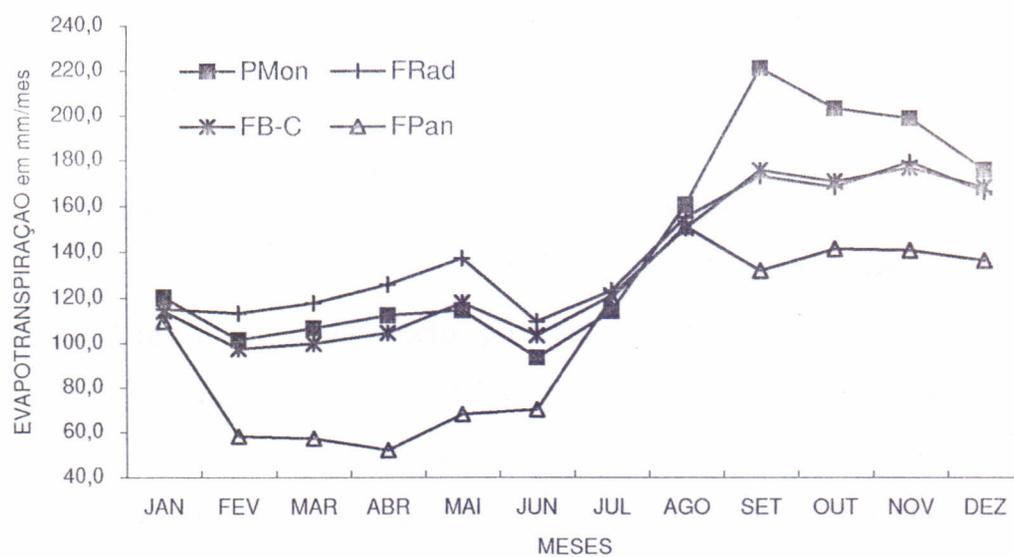


FIGURA - 16 Evapotranspiração diária (1977), totalizado em meses para os métodos de: PMon, FRad, FB-C e FPan.

relação a PMon. A diferença percentual máxima no período foi de 40%, referente ao mês de setembro.

#### 4.3.2 - Evapotranspiração de referência, totalizados para o ano de 1979, ano seco.

Na Tabela 10 são apresentados os dados diários de 1979, totalizados em meses, considerando o ano como seco, tendo como referência a ocorrência de precipitações.

Comparando as Tabelas 9 e 10, observamos uma tendência a superestimativa nos resultados de 1979 (seco), em relação aos resultados de 1977 (normal). O resultado era esperado, pois em um ano seco ocorrem elevações de temperatura, radiação solar, advecção, ventos, insolação, evaporação, déficit de pressão de vapor e redução em umidade relativa e precipitações, em relação ao ano normal, o que favorece o aumento da taxa de evapotranspiração. Entretanto, ocorreram subestimativas entre o ano seco e o normal, em relação a alguns meses e métodos. No caso dos métodos FPan (Tanque de Evaporação FAO) e FRad (Radiação FAO), tal comportamento não foi observado. A maioria das subestimativas no ano de 1979 em relação a 1977, ocorreram nos meses de maio, setembro e novembro.

Tomando-se os resultados do método de Penman Monteith, padrão de comparações, pode-se observar que a variação percentual de superestimativas de 1979 em relação a 1977, é de um valor máximo de 27% em janeiro a um mínimo de 0,5% observado em agosto.

Vale lembrar a questão abordada anteriormente da falta de dados, onde os mesmos foram substituídos por valores médios do período de 1974 a 1978.

Foram substituídos dados de: velocidade dos ventos do dia 6 a 28 de fevereiro e de 7 a 9 de outubro; radiação solar nos meses de junho e julho.

TABELA 10 - Evapotranspiração diária (1979) totalizados em mm/mes.

Meses	PMon	KPen	FcPn	63Pn	Harg	FRad	FB-C	FPan
Janeiro	165	147	195	170	174	171	158	119
Fevereiro	133	121	158	142	169	136	129	111
Março	134	127	159	144	171	136	122	79
Abril	139	137	172	154	171	148	132	99
Maiο	112	124	139	128	162	125	115	72
Junho	127	142	152	134	169	133	136	101
Julho	152	164	170	150	191	147	154	139
Agosto	161	165	187	165	196	162	159	161
Setembro	199	182	219	187	194	176	171	158
Outubro	209	185	230	197	199	191	180	171
Novembro	163	147	193	169	184	167	161	146
Dezembro	169	148	199	174	187	173	170	157

Na FIGURA 17 estão plotados os resultados de evapotranspiração de referência diária para o ano de 1979, totalizados em meses dos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn), Penman 63 (63Pn) e Hargreaves 1985 (Harg).

Observa-se na FIGURA 17 que todas as curvas referentes aos métodos, cortam a curva do método de Penman-Monteith, exceção feita ao FcPn, superestima PMon em todo período considerado. O método Hargreaves 1985, ajustou-se menos ao padrão (PMon), superestimando os valores durante todo o período, com exceção dos meses de setembro e outubro, onde se observa maiores taxas de evapotranspiração. Durante o período, nota-se uma variação nos resultados de Harg em relação a PMon de um mínimo de 2,6% em setembro a um máximo de 31% em maio. O comportamento era esperado tendo em vista as análises anteriores. A curva, como se observa, não acompanha as oscilações dos demais métodos, em relação ao método de Penman-Monteith.

As curvas referente aos métodos de KPen e 63Pn, ajustaram-se melhor a PMon. A variação de KPen ocorre de um valor mínimo de 1,4% a um máximo de 11,5%, referente aos meses de abril e outubro, respectivamente. Com relação a 63Pn, observa-se uma variação percentual de um valor mínimo de 1,3% a um máximo de 12,5%.

A FIGURA 18 apresenta as curvas representativas dos métodos de: Penman-Monteith (PMon), Radiação FAO (FRad), Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan). Nota-se claramente que o método FPan, novamente não se ajustou bem ao método de PMon. Durante todo o período o método FPan subestimou o padrão, com exceção do mês de agosto onde se observam valores iguais. A maior variação ocorreu no mês de março com 41%.

Os métodos de FRad e FB-C, se ajustaram melhor (FIGURA 18) em relação a PMon. O método FRad, mostrou uma diferença em relação a PMon, de um valor mínimo de 0,6% no mês de agosto, e um máximo de 11,5% em setembro. Com relação ao FB-C, a variação foi de 0,6% (mínimo) em dezembro e

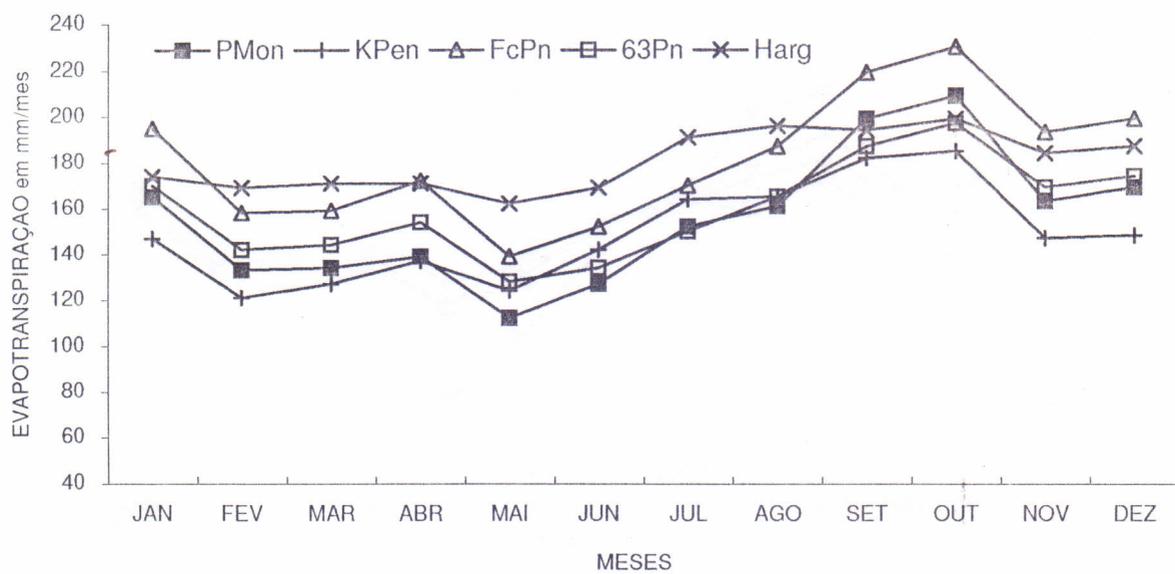


FIGURA - 17 Evapotranspiração diária (1979), totalizado em meses para os métodos de: PMon, KPen, FcPn, 63Pn e Harg.

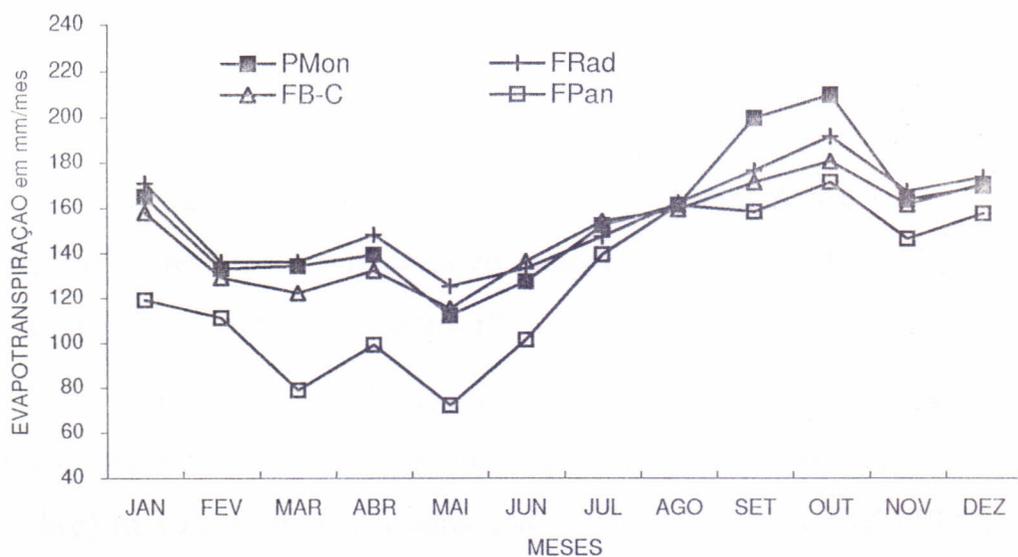


FIGURA - 18 Evapotranspiração diária (1979), totalizado em meses para os métodos de: PMon, FRad, FB-C e FPan.

14% (máximo) em outubro. Portanto, pode-se afirmar que os dois métodos (FRad e FB-C), poderiam no caso específico, serem empregados para determinação de ETr, com aproximação boa em relação a PMon.

4.4 - Comparativo de Resultados Totalizados em Meses para o Período de 1974 a 1978 e os Anos de 1977 e 1979, respectivamente um Ano Normal e outro Seco.

A Tabela 11 foi obtida a partir das Tabelas 8, 9 e 10 das quais foram extraídos os resultados referentes ao método de Penman-Monteith e comparados no gráfico, representado na Figura 19.

Na Figura 19, observa-se o comportamento das curvas nos períodos citados. Nota-se que nos meses de pique de demanda evaporativa (setembro e outubro) os valores de evapotranspiração para um ano normal (1977), aparecem no espaço médio entre os demais valores. O mês de maio apresentou praticamente um valor comum para todas as situações, o que demonstra não ser um bom período de estimativa, caso seja necessário valores extremos. Com relação aos meses de janeiro fevereiro, junho e julho, a curva corresponde ao esperado, isto é, valores superiores para 1979, médios para o período de 1974 a 1978 e mínimo para 1977. Observa-se também que em outubro, os valores de evapotranspiração de referência referentes aos dados médios diários (1974-1978), são superiores aos resultados de um ano normal (1977).

Em geral os valores de evapotranspiração para um ano seco (1979), são maiores que os observados em 1977 e em relação a média de 1974 a 1978. A partir de julho observou-se uma variação diferenciada.

Os resultados diferentes dos esperados, no caso do período de verão (segundo semestre), são consequência também da falta de dados em determinados meses nos anos de 1977 e 1979, os quais foram substituídos por dados do período

**TABELA - 11** Evapotranspiração de referência a partir de dados médios (1974 - 1978), e dos anos de 1977 e 1978, totalizados em meses, para o método de Penman - Monteith (PMon).

MESES	PMon (1974-1978)	PMon (1977)	PMon (1979)
janeiro	156,2	120,3	165,0
fevereiro	107,7	101,4	133,0
março	107,6	106,4	134,0
abril	105,0	112,2	139,0
maio	115,0	114,4	112,0
junho	112,8	93,3	127,0
julho	130,8	113,9	152,0
agosto	177,5	160,1	161,0
setembro	228,2	220,2	199,0
outubro	196,7	202,2	209,0
novembro	194,9	197,9	163,0
dezembro	172,5	175,0	169,0

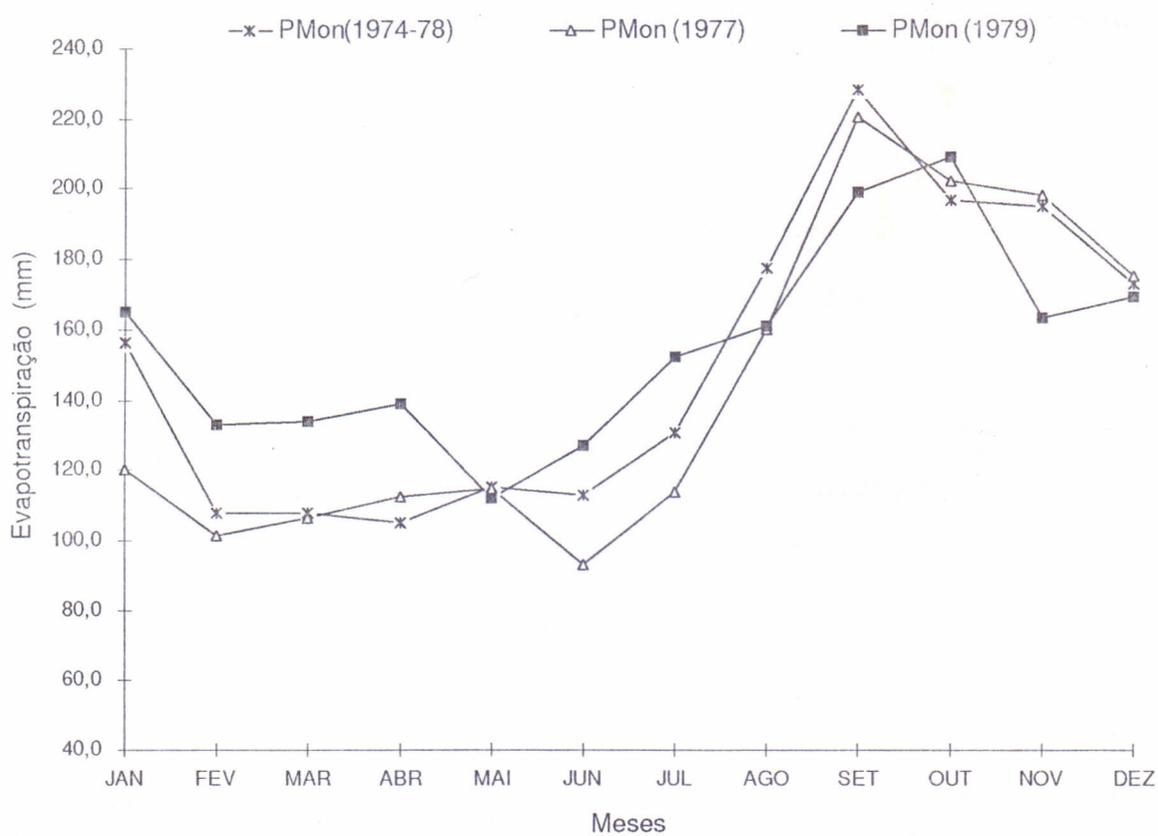


FIGURA - 19 Evapotranspiração de referência a partir de dados médios diários de 1974 a 1978, dados diários dos anos de 1977 e 1979, totalizados em meses para o método de Penman - Monteith (PMon).

de 1974 a 1978. Por exemplo, foram substituídos dados em 1979 nos meses de fevereiro e outubro (velocidade do vento), junho e julho (radiação solar).

#### 4.5 - Análise de Regressão dos dados médios diários para o período de 1974 a 1978 da Estação Experimental do Vale do Curu-(Pentecoste - CE).

A análise de regressão foi feita com os resultados de evapotranspiração de referência média diária para o período de 1974 a 1978, para os métodos de: Penman Kimberly 1982 (KPen), Penman Corrigido pela FAO (FcPn), Penman 63 versão original (63Pn), Hargreaves 1985 (Harg), Radiação FAO (FRad), Blaney e Criddle Corrigido pela FAO (FB-C) e Tanque de Evaporação FAO (FPan), em relação ao padrão de comparação Penman-Monteith (PMon).

As TABELAS 12, 13 e 14 apresentam os resultados das análises de regressão de janeiro a dezembro, com as variáveis: equação de regressão referente a cada método para o período, coeficiente de correlação ( $R^2$ ), erro padrão de valores estimados (RMSE) e o coeficiente de variação (CV).

Na análise de regressão a seguinte equação foi usada:

$$Y = a + bx$$

onde: Y = ET de referência média diária pelo método de Penman-Monteith (mm);

X = ET de referência média diária para qualquer um dos outros métodos (mm);

a = ordenada a origem;

b = declividade da reta.

Por exemplo, na Tabela 12, para o método de Penman Kimberly 1982 (KPen), mês de janeiro:

$$Y = -1,21158 + 1,455739X_1$$

Onde: Y = ETr pelo método de PMon em  $\text{mm.dia}^{-1}$ ; e

$X_1$  = ETR pelo método de KPen (Penman Kimberly, 1982) em  $\text{mm.dia}^{-1}$ .

TABELA - 12

ANÁLISE DE REGRESSÃO PELOS 8 MÉTODOS SENDO PENMAN-MONTEITH, CONSIDERADO PADRÃO DE COMPARAÇÃO, USANDO DADOS MÉDIOS DIÁRIOS NO PERÍODO DE (1974-1978).

Y= ETr média diária pelo método de Penman-Monteith

X=ETr média diária para os demais métodos

## JANEIRO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimberly(1982)	$Y = -1,21158 + 1,455739X1$	0,931925	0,216925	0,05053
Penman C. FAO	$Y = 0,067935 + 0,78296X2$	0,892882	0,272162	0,04886
Penman 63	$Y = 0,65569 + 1,15301X3$	0,901178	0,261411	0,05293
Hargreaves (1985)	$Y = -6,64612 + 2,14847X4$	0,831755	0,341089	0,06271
Radiação FAO	$Y = 0,387722 + 0,97353X5$	0,798454	0,373322	0,07814
Blaney-CriddleFAO	$Y = 0,048416 + 1,06173X6$	0,955684	0,175056	0,03724
Tanque Evapor. FAO	$Y = 2,885133 + 0,56625X7$	0,333368	0,678953	0,17852

## FEVEREIRO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimberly(1982)	$Y = -0,09667 + 1,05855X1$	0,961142	0,101326	0,02817
Penman C. FAO	$Y = 0,898183 + 0,63112X2$	0,936825	0,129198	0,02864
Penman 63	$Y = 0,08849 + 0,87717X3$	0,92948	0,136501	0,03293
Hargreaves (1985)	$Y = -3,05494 + 1,32901X4$	0,524143	0,354584	0,07072
Radiação FAO	$Y = 0,691708 + 0,74794X5$	0,951232	0,113513	0,02787
Blaney-Criddle FAO	$Y = 0,163732 + 0,99628X6$	0,972356	0,085464	0,02096
Tanque Evapor. FAO	$Y = 3,247872 + 0,26146X7$	0,058382	0,49879	0,22566

## MARÇO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y = 0,19819 + 1,04541X1$	0,973234	0,069702	0,01988
Penman C. FAO	$Y = 0,552161 + 0,68599X2$	0,947355	0,097753	0,02297
Penman 63	$Y = -0,10926 + 0,89866X3$	0,943837	0,081019	0,02336
Hargreaves (1985)	$Y = -1,9373 + 1,06924X4$	0,429057	0,321921	0,6364
Radiação FAO	$Y = 0,482113 + 0,78255X5$	0,968914	0,075117	0,01967
Blaney-Criddle FAO	$Y = 0,18073 + 1,12639X6$	0,919657	0,120761	0,033725
Tanque Evapor. FAO	$Y = 3,140091 + 0,20473X7$	0,020401	0,421675	0,26092

## ABRIL

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y = -0,08846 + 0,97596X1$	0,96405	0,068538	0,01867
Penman C. FAO	$Y = 0,826897 + 0,61771X2$	0,932527	0,093896	0,02175
Penman 63	$Y = 0,0238552 + 0,80631X3$	0,967055	0,083175	0,0206
Hargreaves (1985)	$Y = 0,455349 + 0,60477X4$	0,303266	0,301728	0,06006
Radiação FAO	$Y = 0,887855 + 0,67036X5$	0,915642	0,10499	0,02701
Blaney-Criddle FAO	$Y = 0,063566 + 1,03203X6$	0,918067	0,103469	0,03113
Tanque Evapor. FAO	$Y = 2,880965 + 0,39678X7$	0,090954	0,344648	0,22331

RMSE - erro padrão de valores estimados

R<sup>2</sup> - coeficiente de correlação

C.V - coeficiente de variação

TABELA - 13

ANÁLISE DE REGRESSÃO PELOS 8 MÉTODOS SENDO PENMAN-MONTEITH, CONSIDERADO PADRÃO DE COMPARAÇÃO, USANDO DADOS MÉDIOS DIÁRIOS NO PERÍODO DE (1974-1978).

Y= ETr média diária pelo método de Penman-Monteith

X=ETr média diária para os demais métodos

MAIO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y = -0,14943 + 0,96023X1$	0,966412	0,07841	0,0196
Penman C. FAO	$Y = 1,741811 + 0,42991X2$	0,561227	0,283401	0,06161
Penman 63	$Y = 1,193289 + 0,59731X3$	0,594412	0,272474	0,06487
Hargreaves (1985)	$Y = 1,546045 + 0,41872X4$	0,026334	0,381155	0,0733
Radiação FAO	$Y = 0,84311 + 0,66839X5$	0,891218	0,141111	0,03282
Blaney-Criddle FAO	$Y = 0,58453 + 0,83131X6$	0,799831	0,191417	0,05037
Tanque Evapor. FAO	$Y = 3,655475 + 0,03168X7$	0,000858	0,4277	0,21385

JUNHO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y = -0,05969 + 0,91235X1$	0,975213	0,055759	0,01332
Penman C. FAO	$Y = 0,525491 + 0,71560X2$	0,919765	0,100318	0,02219
Penman 63	$Y = -0,23581 + 0,97301X3$	0,905405	0,108926	0,02652
Hargreaves (1985)	$Y = -1,9395 + 1,10598X4$	0,457887	0,260761	0,0506
Radiação FAO	$Y = 0,650825 + 0,73619X5$	0,86322	0,130981	0,03101
Blaney-Criddle FAO	$Y = 0,120901 + 0,90077X6$	0,963862	0,067326	0,01666
Tanque Evapor. FAO	$Y = 3,064783 + 0,22869X7$	0,122289	0,331798	0,10914

JULHO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y = -0,78541 + 1,08647X1$	0,964319	0,10782	0,02341
Penman C. FAO	$Y = 0,485427 + 0,75803X2$	0,946261	0,31232	0,02686
Penman 63	$Y = -0,54077 + 1,08264X3$	0,934087	0,146543	0,03333
Hargreaves (1985)	$Y = -3,33613 + 1,39168X4$	0,365667	0,45461	0,08374
Radiação FAO	$Y = 0,091617 + 0,92859X5$	0,848445	0,222211	0,04999
Blaney-Criddle FAO	$Y = -0,45679 + 1,06745X6$	0,91756	0,163889	0,03741
Tanque Evapor. FAO	$Y = 2,572288 + 0,41579X7$	0,224575	0,502631	0,12688

AGOSTO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y = -1,66078 + 1,29957X1$	0,910701	0,146179	0,02772
Penman C. FAO	$Y = 0,085967 + 0,87069X2$	0,681068	0,276255	0,04265
Penman 63	$Y = -1,16731 + 1,23733X3$	0,724497	0,256758	0,04609
Hargreaves (1985)	$Y = 0,779352 + 0,80031X4$	0,227832	0,42985	0,06955
Radiação FAO	$Y = 0,539782 + 0,95866X5$	0,528037	0,336058	0,06212
Blaney-Criddle FAO	$Y = -0,45599 + 1,15932X6$	0,56705	0,321869	0,06036
Tanque Evapor. FAO	$Y = 6,193915 - 0,08980X7$	0,005827	0,487743	0,09357

RMSE - erro padrão de valores estimados

R<sup>2</sup> - coeficiente de correlação

C.V - coeficiente de variação

TABELA - 14

ANÁLISE DE REGRESSÃO PELOS 8 MÉTODOS SENDO PENMAN-MONTEITH, CONSIDERADO PADRÃO DE COMPARAÇÃO, USANDO DADOS MÉDIOS DIÁRIOS NO PERÍODO DE (1974-1978).

Y= ETr média diária pelo método de Penman-Monteith

X=ETr média diária para os demais métodos

SETEMBRO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y=2,578506 + 0,75763X1$	0,706897	0,269694	0,04067
Penman C. FAO	$Y=2,950481 + 0,60444X2$	0,515029	0,34717	0,04507
Penman 63	$Y=0,503419 + 1,09057X3$	0,70326	0,271564	0,04169
Hargreaves (1985)	$Y=2,353211 + 0,81114X4$	0,099624	0,473038	0,07304
Radiação FAO	$Y=3,665318 + 0,65398X5$	0,409257	0,363163	0,06316
Blaney-Criddle FAO	$Y=1,156357 + 1,08591X6$	0,591747	0,318529	0,05362
Tanque Evapor. FAO	$Y=6,142468 + 0,29109X7$	0,110603	0,470145	0,09347

OUTUBRO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y= -0,91933 + 1,28612X1$	0,928394	0,118602	0,02099
Penman C. FAO	$Y=1,198521 + 0,74519X2$	0,771904	0,211678	0,03065
Penman 63	$Y= -0,50081 + 1,15465X3$	0,749804	0,221695	0,03739
Hargreaves (1985)	$Y= -0,27662 + 0,53233X4$	0,450755	0,328472	0,05224
Radiação FAO	$Y=1,167734 + 1,91872X5$	0,620942	0,272878	0,04842
Blaney-Criddle FAO	$Y=0,500154 + 1,05962X6$	0,745395	0,22364	0,04054
Tanque Evapor. FAO	$Y=4,70931 + 0,34103X7$	0,127182	0,414073	0,08632

NOVEMBRO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y=0,679001 + 1,06097X1$	0,938093	0,12971	0,02365
Penman C. FAO	$Y=1,594556 + 0,69997X2$	0,877559	0,182418	0,02605
Penman 63	$Y=0,349422 + 1,03199X3$	0,88363	0,177838	0,02985
Hargreaves (1985)	$Y= -1,12299 + 1,25049X4$	0,41893	0,397391	0,06522
Radiação FAO	$Y=1,804936 + 0,82263X5$	0,811891	0,226104	0,03711
Blaney-Criddle FAO	$Y=0,499569 + 1,04177X6$	0,86051	0,194704	0,03382
Tanque Evapor. FAO	$Y=5,658487 + 0,16631X7$	0,08512	0,499893	0,09918

DEZEMBRO

MÉTODOS	Regressão	R2	RMSE	C.V
Pen-Kimbrelly(1982)	$Y= -0,07079 + 1,19736X1$	0,829356	0,209107	0,04443
Penman C. FAO	$Y=0,573706 + 0,80791X2$	0,863816	0,186804	0,03024
Penman 63	$Y= -0,6884 + 1,16211X3$	0,841165	0,201742	0,03749
Hargreaves (1985)	$Y= -3,79343 + 1,65675X4$	0,464459	0,370442	0,06558
Radiação FAO	$Y=1,550431 + 0,76955X5$	0,596273	0,321638	0,06166
Blaney-Criddle FAO	$Y=0,325855 + 1,00374X6$	0,830885	0,208168	0,03988
Tanque Evapor. FAO	$Y=3,664247 + 0,40852X7$	0,120768	0,474652	0,1024

RMSE - erro padrão de valores estimados

R<sup>2</sup> - coeficiente de correlação

C.V - coeficiente de variação

O método de Blaney-Criddle Corrigido pela FAO (FB-C), apresentou o maior coeficiente de correlação ( $R^2$ ), nos meses de janeiro e fevereiro; nos demais meses do ano, ele figura como 2º 3º ou 4º a se correlacionar melhor com PMon. O erro padrão de valores estimados correspondente aos meses de janeiro e fevereiro para o FB-C, foi menor.

Os demais meses do ano, com relação ao parâmetro  $R^2$ , o maior valor observado de março a novembro, foi para o método de KPen. No mês de dezembro o maior  $R^2$ , está relacionado ao método de FcPn.

O parâmetro RMSE (erro padrão de valores estimados), de março a novembro foi menor para o método de KPen.

Com relação ao C.V. (Coeficiente de Variação), que representa o erro padrão de valores estimados em relação a média de evapotranspiração de cada método mês a mês, observamos menores valores obtidos para: o método de Penman Kimberly 1982 (KPen) nos meses de abril a novembro (associado ao maior valor de  $R^2$  e menor valor de RMSE), o método de Blaney-Criddle corrigido pela FAO (FB-C) nos meses de janeiro e fevereiro (também associado ao maior  $R^2$  e menor RMSE), o método de Penman Corrigido pela FAO (FcPn) no mês de dezembro (associado no maior  $R^2$  e menor RMSE). Em março (menor C.V. para o método de Radiação FAO), apesar do maior  $R^2$  e menor RMSE está associado ao método de KPen.

Observa-se numa análise geral, que o método de Penman Kimberly 1982, manteve-se mais ajustado ao método padrão (PMon) no período, apresentando maior coeficiente de correlação ( $R^2$ ) nos meses de março a novembro, menor erro padrão de estimativa (RMSE) nos meses de março a novembro, além do menor coeficiente de variação (C.V.) de abril a novembro, o que veio comprovar as análises anteriores das FIGURAS 10, 11 e 12.

O método que menos se ajustou ao padrão (PMon), conforme as análises anteriores e a análise de regressão, foi o Tanque de Evaporação FAO (FPan), com menor coeficiente de correlação ( $R^2$ ) em todo período. Com relação

aos demais parâmetros RMSE e C.V, FPan apresentou maiores valores em todo período, exceção feita a RMSE, no mês de setembro, sendo o maior valor para o método de Hargreaves 1985.

O fato de ocorrer melhor correlação de PMon com KPen, em segundo lugar 63Pn e dos métodos não combinados, tenha sido encontrado um bom ajuste com FRad, está de acordo com observações feitas em ALLEN et al (1994), onde os autores relatam a análise no Manual 70 da ASCE. De acordo com os autores 20 equações foram avaliadas, onde nove delas eram combinadas, em 11 locais com medidas de lisímetros de pesagem, para comparação.

ALLEN et al. (1989) analisaram dados usados em comparações de métodos a partir de publicações e trabalhos ou por comunicação pessoal, tendo como base dados médios de ET diários e mensais e medidas de lisímetros, além de dados de outros locais. Os locais de 11 lisímetros variaram em uma faixa de 30 metros abaixo do nível do mar a 2774 metros acima, em latitudes de 38°S para Aspendale, Austrália passando próximo a 0°N em Yangambi, Zaire até 56°N em Copenhague, Dinamarca, abrangendo clima de árido a úmido. O método de PMon forneceu melhores estimativas de ETo e ETr em períodos diários e mensais, seguido por KPen e 63Pn, sendo o quinto colocado o FcPn. Uma pequena parte da superestimativa, de FcPn, foi devido ao uso da equação de regressão de Frevert et al. (1983), na estimativa do fator de correção c, ao contrário do uso de valores interpolados apresentados por DOORENBOS e PRUITT (1977), no manual 24 da FAO.

Baseado nas análises apresentadas no presente trabalho, nas citações de pesquisas efetuadas por autores de renome internacional e instituições envolvidas, tendo sido usado como cultura de referência a alfafa, que segundo ALLEN et al. (1989) é preferida pelos autores devido a semelhança da cultura com a maioria das culturas agrícolas, o método de Penman-Monteith (PMon) considerado padrão de comparação, aproxima-se mais dos estimativas do método de Penman Kimberly 1982 (KPen) seguido por Penman 63 e Blaney-Criddle FAO (FB-C). O método de

Penman Corrigido pela FAO (FcPn), desvia-se dos resultados de PMon por sua tendência a superestimativas, não sendo considerado um bom modelo para as condições estudadas. Além do mais, de acordo com o resultado, o método que menos se ajustou em todos os períodos de tempo (média mensal, média diária, diária, totalizada em meses) foi o Tanque de evaporação FAO, devido a calibração tendo por base a superfície livre de água, as condições de contorno nem sempre observadas nas estações de meteorologia, aliada ao manejo e manutenção dos tanques tipo Classe A. Além dos aspectos analisados nunca é demais lembrar o fato da qualidade e ausência de dados. No que se refere a qualidade, podemos destacar as circunvinhaças das estações de meteorologia, onde a aridez e a advecção interferem na leitura de parâmetros de importância como a velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar. Uma outra atenuante está associada a ausência de aparelhos de leitura direta de radiação, além falta de lisímetros de precisão como forma de determinação mais precisa do requerimento de água pelas plantas.

Segundo ALLEN e PRUITT (1986), a aridez no local de medição de temperatura pode aumentar de 4 a 5°C, em relação aos valores observados de temperatura do ar em culturas irrigadas. De acordo com os autores ALLEN e BROCKWAY (1985) sugerem o uso de Índice de Aridez para corrigir esses efeitos ambientais em medidas de temperatura do ar.

## 5 - CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho conduzem às seguintes conclusões:

- 5.1. Com relação as séries históricas utilizadas deve-se resaltar que as mesmas não foram atualizadas ( Pentecoste 1966 a 1986 e Mossoró 1970 a 1982 ), o que pode ter afetado os resultados; além do mais as médias mensais de evaporação de Pentecoste, estão relativamente baixas para o semi-árido do nordeste, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.
- 5.2. Com relação a análise de evapotranspiração de referência nos dados médios mensais, pode-se afirmar que:
  - a) Dentre os métodos combinados, o método de Penman corrigido pela FAO, apresentou o melhor resultado em relação ao padrão de comparação Penman-Monteith, para as duas localidades.
  - b) Dentre os métodos baseados na temperatura os melhores resultados foram de Hargreaves 1985, para Pentecoste, e Blaney-Criddle corrigido pela FAO, para Mossoró.
  - c) O Tanque de Evaporação FAO, apresentou a pior performance para Pentecoste, mas foi o segundo melhor ajuste, com os dados de Mossoró.
- 5.3. Com relação a análise de evapotranspiração de referência baseada nos dados médios diários para as localidades de Pentecoste, pode-se dizer que:
  - a) Considerando os métodos combinados, o método de Penman Kimberly 1988 é o que melhor ajuste apresentou em relação ao padrão;
  - b) Por outro lado, dentre os demais métodos, o modelo de Blaney-Criddle FAO, é o que apresenta melhor estimativa de E<sub>t</sub>;
  - c) Quando a análise é feita com os dados médios diários totalizados em meses, o método de Penman Kimberly 1982, ainda ajusta-se melhor,

enquanto que o Tanque de Evaporação FAO é responsável pelo pior ajuste;

d) Os resultados do item anterior são confirmados quando se analisa o comportamento da Etr com dados de um ano chuvoso (1977) e de um ano seco (1979), ou seja, Penman Kimberly 1982 ajusta-se melhor ao padrão e o Tanque de Evaporação FAO, apresenta a pior performance.

5.4. Na análise de regressão, utilizando um modelo linear e baseada nos resultados de evapotranspiração de referência, tendo como base os dados medios diários no período de 1974 a 1978, observou-se uma correlação do método de Penman-Monteith predominantemente com o Penman Kimberly 1982 de março a novembro. Nos meses de janeiro e fevereiro, o padrão correlacionou-se melhor com Blaney-Criddle corrigido pela FAO e em dezembro com o método de Penman Corrigido pela FAO. Menores valores de erro padrão de valores estimados (RMSE) e coeficientes de variação (C.V.) foram observados predominantemente com relação ao método de Penman Kimberly 1982. Os métodos de Blaney-Criddle e Penman Corrigidos pela FAO, obtiveram menores valores de RMSF e C.V em menor escala. Somente em março observou-se menor C.V, em relação ao método da Radiação.

Nesta análise ficou claro o menor ajuste do método do Tanque de Evaporação FAO em relação a Penman-Monteith, tendência essa observada em todas situações anteriores.

5.5 Na análise em que se considera o mês de maior demanda e a média anual, para as localidades de Pentecoste e Mossoró, tendo como base dados médios mensais, o método de Hargreaves 1974 (Hg74) não proporcionou estimativas razoáveis. O referido método tem importância por se tratar de fonte de pesquisas para cálculos de evapotranspiração de referência, para projetos de irrigação no Nordeste.

## RECOMENDAÇÕES

- 1 - Realizar estudo comparativo de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência usando o REF-ET, em todas as localidades que disponham de dados, visando detectar quais dentre os métodos mais simples devem ser usados e que melhor corresponda a realidade local.
- 2 - Tendo em vista que as melhores equações de estimativas de evapotranspiração de referência estejam relacionadas aos métodos combinados, estabelecer uma rede de estações micrometeorológica automatizadas junto a todos os açudes e demais obras públicas existentes e a serem construídas, em face a escassez de dados climatológicos na região nordestina.
- 3 - Realizar estudos para estimativa de parâmetros para calibração local das equações de evapotranspiração de referência utilizando lisímetros de precisão, sobretudo as mais adaptadas às condições de semi-árido e mais simples como Hargreaves 74 e Tanque Classe .A..
- 4 - Desenvolver pesquisas para estimativa de valores confiáveis dos coeficientes das principais culturas exploradas no nordeste brasileiro, tendo em vista o cálculo da evapotranspiração das culturas, nos vários estágios do ciclo fenológico.
- 5 - Refazer os cálculos de evapotranspiração de referência usando a grama

## 7 - LITERATURA CITADA

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

ALLEN, R.G. , SMITH, M., PERRIER, A. et al. An Update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID BULLETIN, v.43, n.2, p.35-91, 1994.

ALLEN, R.G. Irrigation engineering principles. Logan: Utah State University, 1991. Lecture Notes

ALLEN, R.G. REF-ET: Reference evapotranspiration calculator, version 2.1. Logan, VT: Utah State University, 1990. 39p.

ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J., v.81, p.650-662, 1989.

ALLEN, R.G., PREUGER, J.R., HILL, R. W. Evapotranspiration from usadated stands of hydrophytes: cattail and bulrush. Transactions of the ASAE, v.35, n.4, p.1191-1198, july/aug. 1992.

ALLEN, R.G., PRUIT, W.O. FAO-24 Reference evapotranspiration factors. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.117, n.5, p.758-773, oct. 1991.

ALLEN, R.G., Pruit, W.O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. Journal of Irrigation and Danage Engineering, v.112, n.2, p.139-155, may, 1986.

CHANG, J. Climate and agriculture; an ecological survey. Chicago: Aldine Publishing Company, 1971 304p. Cap. 13: Evapotranspiration.

CUENCA, R.H. Irrigation system design an engineering approach. São Jersey: Hall, Englewood Cliffs, 1989. p. chap. 5: Crop water requirements.

- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. Crop Water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United States, 1977. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- GUIMARÃES, J.W.A. Manejo do Algodão Irrigado no Projeto Jaguaribe-Apodi, utilizando um modelo computacional. Fortaleza-CE, 1993. 182p. (Mestrado - Departamento de Engenharia Agrícola/UFC).
- HARGREAVES, G.H. Accuracy of estimated reference crop evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.115, n.6, p.1000-1006, dec. 1989.
- HARGREAVES, G. H. Potencial evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil. Utah: Utah State University, 1974.
- JENSEN, M.W. BURMAN, R.D., ALLEN, R.G et al. Evapotranspiration and irrigation Water requirements New York: American Society of Civil Engineers, 1989. 329p. (ASCE Manual and Reports on Engineering Practices, n. 70).
- OMETO, J.C. Bioclimatologia Vegetal. São Paulo, CERES, 1981. 425p.
- PEREIRA, A. R. Evapo(tranpi)ração. Piracicaba: DFM/ESALQ/USP, 1992. 51p.
- PERES, J.G. Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do Estado de São Paulo. Piracicaba, 1994. 116p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura .Luiz de Queiroz./USP).
- SILVA, A.A.G. Avaliação da eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba-PI. Piracicaba, 1989. 81p. (Mestrado-Escola Superior de Agricultura .Luiz de Queiroz./USP).
- SMITH, M. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements: Rome: FAO, 1991. 54p. professor.

SOUZA, F. de, YODER, RONALD. ET Estimation in the Northeast of Brazil: Hargreaves or Penman-Monteith Equation. In: INTERNATIONAL WINER MEETIN AN ASAE. PAPER... Atlanta: ASAE, 1994. 6f. Paper nº 942545.