



ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM CAMPOS SALES-CE

Janielle Lima Fernandes¹ ; Joaquim Branco de Oliveira² ; Naiara Samia de Caldas Izidio³; Monikuelly Mourato Pereira⁴; Gean Duarte da Silva⁵

¹ Tecnóloga em Irrigação e Drenagem, Mestrando em Solos e Qualidade de Ecossistemas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas - BA, Fone: (88) 97144475, email: janiigt@hotmail.com

² Profe. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, campus Iguatu.

³ Tecnóloga em Irrigação e Drenagem, Mestrando em Engenharia de Água e Solos, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN.

⁴ Tecnóloga em Irrigação e Drenagem, Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará – Fortaleza-CE.

⁵ Graduando em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, bolsista do CNPq, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, campus Iguatu.

RESUMO: O presente estudo teve como objetivo comparar valores de ETo em escala de tempo decenal e identificar os melhores métodos de estimativa com uso de poucas variáveis climatológicas para o município de Campos Sales-CE. Os dados meteorológicos de temperatura máxima e mínima do ar, evaporação do tanque classe A, velocidade do vento, umidade relativa e insolação foram obtidos a partir das estações convencionais pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas em Campos Sales-CE. A série de dados de 16 anos compreende um período de 1962 a 1978. Os métodos de Kimberly-Penman 1972, Penman 1948, Penman-Frère-Popov 1979, Blaney-Criddle modificado pela FAO24, Benevides & Lopes e FAO24-Radiação apresentaram desempenho ótimo no período analisado sendo recomendada a utilização dos mesmos em substituição ao método padrão Penman Monteith FAO56 na estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Campos Sales-CE.

Palavras-chave: variáveis climatológicas, Penman Monteith FAO 56, ETo.

1. INTRODUÇÃO

A água é dos principais fatores de produção agrícola, sendo essencial para o desenvolvimento sustentável da atividade agrícola (ARAÚJO et al., 2007). De acordo com Sales (2008), para a região do Ceará, a quantificação da evapotranspiração assume particular importância em virtude dos déficits hídricos ao longo do ano, constituindo séria limitação à produção agrícola, e uma permanente fonte de risco agrícola em quase todo o Estado, principalmente em áreas secas cujas características climáticas se aproximam da semiaridez. A estimativa das perdas por evaporação e transpiração é de grande importância para atividades como projetos de irrigação, gerenciamento de reservatórios e planejamento de uso e outorga de recursos hídricos (BORGES & MEDIONDO, 2007).

A possibilidade de estimar corretamente a evapotranspiração serve de subsídios para poder determinar a quantidade real de água a ser suprida ao solo no monitoramento da irrigação. Desse modo, conhecer e quantificar a evapotranspiração, de forma precisa, proporcionará a possibilidade de se estimar o volume e a intensidade de água a aplicar em uma comunidade vegetal, resultando na otimização do uso dos recursos hídricos dos equipamentos de irrigação e da energia elétrica, proporcionando redução nos custos de produção (SALES, 2008).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) no seu boletim número 56, vários são os métodos empíricos ou métodos indiretos, criados por vários cientistas e pesquisadores, para determinação da evapotranspiração de referência (ETo) utilizando diferentes elementos climáticos, e a determinação também por métodos diretos que utilizam lisímetros, parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo e método de entrada e saída de água em grandes áreas (FIGUEIRÊDO, 2008).

O presente estudo teve como objetivo comparar valores de ETo em escala de tempo decenal e identificar os melhores métodos de estimativa com uso de poucas variáveis climatológicas para o município de Campos Sales-CE.



2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos a partir da estação convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com latitude de $-40^{\circ} 22' 34''$, longitude $- 07^{\circ} 04' 28''W$ e altitude de 566 m. Os dados meteorológicos de temperatura máxima e mínima do ar, evaporação do tanque classe A, velocidade do vento, umidade relativa e insolação. A série de dados diária, de 1962 a 1978, equivalente a 16 anos. Utilizou-se o software REF-ET para o cálculo de treze métodos e planilha eletrônica para o cálculo de oito métodos de ET_0 que foram comparados com o métodos PM-FAO56 a fim de se determinar quais deles são melhores para estimar a ET_0 sob condições do clima semi-árido do Estado do Ceará.

A correlação entre o método de PM-FAO56 e os outros métodos foi realizada com base em indicadores estatísticos, a fim de se observar a precisão dada pelo coeficiente de correlação (r) que está associado ao desvio entre valores estimados e medidos indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média. A exatidão na estimativa da ET_0 em relação ao modelo padrão escolhido foi obtida através do índice de Willmott “d” apresentado por (WILLMOTT et al., 1985). Com a correlação entre os dados e a exatidão pôde-se calcular o desempenho dos métodos em estimar a ET_0 através do coeficiente de desempenho (c) que é o produto de r e d ($c = r.d$) (CAMARGO & SENTELHAS, 1997).

A regressão linear é descrita pela seguinte equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad [\text{Eq. 01}]1$$

em que:

- Y valor estimado pelos métodos avaliados;
- β_0 coeficiente linear (indica o ponto em que a reta de regressão passa pelo eixo x);
- β_1 coeficiente angular (indica a inclinação da reta de regressão);
- x valor estimado pelo método padrão (Penman-Monteith-FAO56).

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad [\text{Eq. 02}]2$$

$$\beta_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad [\text{Eq. 03}]3$$

$$S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad [\text{Eq. 04}]4$$

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad [\text{Eq. 05}]5$$

O coeficiente de correlação foi calculado usando-se a seguinte forma:

$$r = \frac{[\sum (Y_e - \bar{Y})(Y - \bar{Y})]^2}{\sum (Y_e - \bar{Y})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2} \quad [\text{Eq. 06}]6$$

em que:

- Y_e valor estimado do método avaliado;
- Y valor estimado do método Penman-Monteith-FAO56;
- \bar{Y} média dos valores do método padrão.



A seguir é apresentada a equação do índice de concordância de Willmott:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Y_e - \bar{Y})^2}{\sum(|Y_e - Y| + |Y - \bar{Y}|)^2} \right] \quad [\text{Eq. 07}]6$$

O índice de concordância “d”, varia de 0 a 1, em que o valor 1 significa uma concordância perfeita entre dados observados e estimados, enquanto que o valor 0, significa não haver concordância entre os valores analisados.

Camargo & Sentelhas (1997) apresentaram valores do coeficiente de confiança ou desempenho “c” para os resultados obtidos na análise estatística (tabela 1).

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de desempenho, conforme Camargo & Sentelhas (1997)

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

A quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas foi obtida pelo erro-padrão de estimativa (EPE) (Equação 8) e através da relação dos valores médios expressa em porcentagem (%) (Equação 9).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(Y_e - Y)^2}{n}} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\% = \frac{\bar{Y}_e \cdot 100}{\bar{Y}} \quad \text{Eq. 97}$$

em que:

\bar{Y}_e média do método avaliado;

\bar{Y} média do método padrão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Primeiro Decêndio

Observou-se que no primeiro decêndio que os métodos Pen 1948, PFP 17, BC FAO24, KPen 1972, FAO24-Rd, Pen mod FAO, Lin 1997 e B&L apresentaram ótimo desempenho, pois tiveram o coeficiente (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997) acima de 0,85 considerado desempenho ótimo (Tabela 2). Já os métodos BC, Ham 1961, Thorn, Khar 1985, e Cam 1971 apresentaram pior desempenho entre os métodos estudados, com c igual a 0,25, considerado como péssimo desempenho. Ham 1961 apresentou maior erro padrão de estimativa, onde o valor foi a 2,13, e isso significa dizer que quanto maior o erro padrão maior a variação média ao redor da reta da regressão, e assim confirmando ser um método que pode ser descartado no uso da estimativa da ET_o. Já o método Pen 1948 foi o que obteve o menor erro padrão de estimativa, que foi igual 0,22, ou seja, menor a variação média ao redor da reta de regressão, e apresentando assim um método com resultados semelhantes ao método padrão Penman Montheit FAO56. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Cavalcante Junior (2010) em estudo para a cidade de Mossoró-RN, também encontrou menor erro padrão de estimativa igual a 0,23, para o modelo Pen 1948.

A equação de Khar 1985 foi a que mais superestimou entre os 21 métodos correlacionados com o método padrão PM FAO56, onde apresentou valor equivalente a 120,4%, já o método de Ham 1961 foi a equação que mais subestimou entre as equações avaliadas, obtendo valor igual a 64,8%. Araújo (2010) em estudo semelhante para a cidade de Crateús-CE o método Ham 1961 subestimou PM FAO56 com valor igual



a 54,5%. Na Figura 1 é possível observar o desempenho de onze métodos de estimativa de ET_0 que obtiveram desempenho bem diferentes. Pode-se observar que, cada equação se comporta de maneira diferente em relação ao método padrão Penman Montheit FAO, mostrando que cada método possui suas características específicas e comportamentos dispersos.

Tabela 2 - Variáveis estatísticas da comparação entre os diferentes métodos com método PM-FAO56 em 1º decêndio, para o município Campos Sales-CE

Métodos	r^2	EPE	%	d	c	Desempenho
Pen1948	0,990	0,225	102,176	0,993	0,983	Ótimo
FAO PFP 17	0,990	0,281	103,923	0,990	0,980	Ótimo
FAO24 BC	0,974	0,349	97,236	0,981	0,956	Ótimo
KPen 1972	0,983	0,503	107,518	0,970	0,953	Ótimo
FAO24-Rd	0,966	0,492	106,751	0,966	0,933	Ótimo
Pen mod FAO	0,985	0,883	114,410	0,923	0,909	Ótimo
Lin 1997	0,931	0,574	95,283	0,944	0,879	Ótimo
B&L	0,924	0,654	107,803	0,936	0,864	Ótimo
KPen 1996	0,866	0,683	98,995	0,917	0,794	Muito Bom
Harg 1982	0,894	0,795	93,690	0,862	0,770	Muito Bom
J&H 1963	0,890	0,999	115,180	0,844	0,751	Bom
Pan FAO	0,798	1,778	93,964	0,792	0,632	Mediano
Turc 1961	0,846	1,178	84,169	0,726	0,615	Mediano
Harg 1985	0,775	1,001	91,835	0,768	0,595	Sofrível
Makk 1957	0,895	1,728	70,764	0,625	0,559	Sofrível
Prs&Tylr	0,737	1,125	88,996	0,707	0,521	Sofrível
Thorn	0,623	1,502	79,585	0,604	0,376	Péssimo
Khar 1985	0,613	1,509	120,439	0,609	0,373	Péssimo
Cam 1971	0,554	1,426	82,859	0,624	0,345	Péssimo
Ham1961	0,594	2,131	64,835	0,518	0,308	Péssimo
BC	0,563	1,231	104,949	0,449	0,252	Péssimo

Na Figura 1 nota-se que os métodos Pen 1948, PFP 17, B&L, KPen 1972 obtiveram boa correlação na escala decendial não apresentando falhas ao estimar a ET_0 . Os métodos Lin 1977 e Thorn mostrou valores dispersos. Souza et al. (2010) em estudo comparando métodos de estimativa de evapotranspiração de referência em período de sete dias para região do Estado de Sergipe, no perímetro irrigado de Califórnia correlacionou a equação de Lin 1977 com o padrão PM FAO56 e encontrou desempenho muito bom, o mesmo comportamento foi encontrado nesse estudo.

3.2 Segundo Decêndio

No segundo decêndio (Tabela 3) os métodos de KPen 1996, KPen 1972, Pen 1948, Pen mod FAO, PFP 17, FAO24-Rd, BC FAO24 e Pan FAO obtiveram ótimo desempenho com ($c > 0,85$). Já os métodos de Thorn, Harg 1982, BC, B&L, e Lin 1997 foram os que apresentaram péssimo desempenho, ($c \leq 0,40$). Araújo et al. (2010) em estudo semelhante para região de Jaguaruana – CE, encontrou desempenho ótimo dos métodos de KPen 1996 e Pen mod FAO, mesmo comportamento obtido no primeiro decêndio do presente estudo.

O método de B&L foi o que mais subestimou o método padrão entre os vinte métodos correlacionados, obtendo valor igual a 64,7%, Já o método FAO24 Rd foi o que mais superestimou o padrão, apresentando valor igual a 114,1%, pois é um método baseado na temperatura e isolamento.

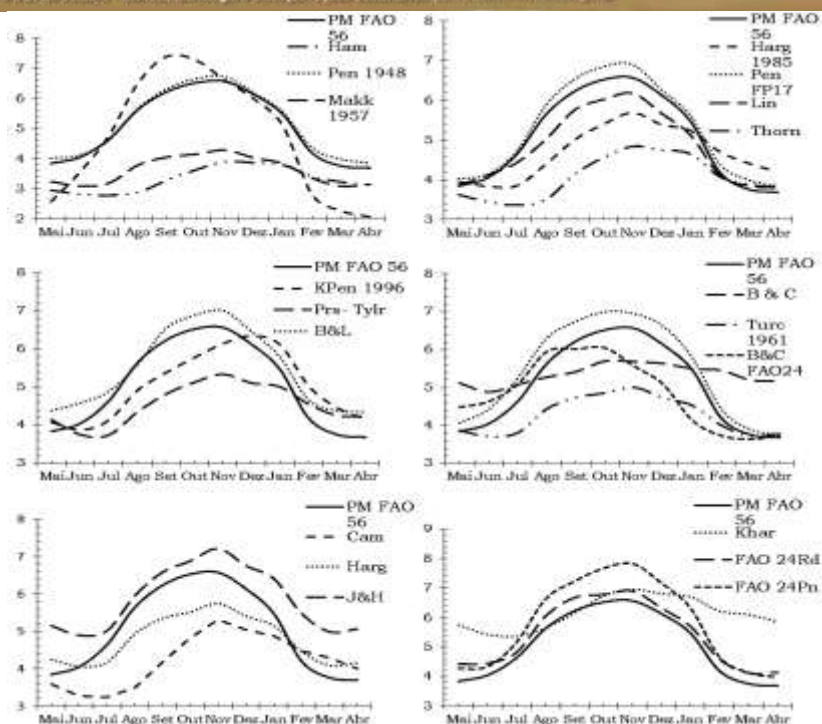


Figura 1 - Comparação do comportamento da evapotranspiração de referência (ET₀), estimada por diferentes métodos para os meses secos e chuvosos, correlacionando com o método de PM FAO56 no 1º decênio, para o município Campos Sales - CE

Tabela 3 - Variáveis estatísticas da comparação entre os diferentes métodos com método PM-FAO56 em 2º decênio, para o município Campos Sales-CE

Métodos	r ²	EPE	%	d	c	Desempenho
Pen 1948	0,989	0,227	101,959	0,992	0,981	Ótimo
Pen FP17	0,989	0,289	103,838	0,988	0,977	Ótimo
BC FAO24	0,974	0,352	96,827	0,980	0,954	Ótimo
Kpen 1972	0,981	0,520	107,821	0,966	0,947	Ótimo
FAO24 Rd	0,960	0,477	106,010	0,965	0,927	Ótimo
Pn FAO24	0,985	0,845	114,154	0,923	0,909	Ótimo
Lin	0,926	0,570	95,026	0,942	0,872	Ótimo
B&L	0,914	0,653	107,467	0,932	0,853	Ótimo
Kpen 1996	0,852	0,684	99,418	0,910	0,776	Muito Bom
Harg 1982	0,880	0,812	93,033	0,845	0,743	Bom
J&H	0,880	0,973	114,391	0,840	0,739	Bom
Turc 1961	0,878	1,195	83,248	0,698	0,613	Mediano
Pan FAO	0,781	1,738	93,385	0,784	0,613	Mediano
Harg 1985	0,774	0,980	91,485	0,767	0,593	Sofrível
Makk 1957	0,875	1,756	70,213	0,597	0,523	Sofrível
Prs-Tylr	0,711	1,131	88,487	0,682	0,485	Mau



Thorn	0,617	1,482	79,483	0,601	0,371	Mau
Cam 1971	0,572	1,389	82,723	0,634	0,363	Mau
Kar	0,602	1,490	120,431	0,601	0,362	Mau
Ham	0,594	2,118	64,716	0,510	0,303	Mau
BC	0,545	1,197	104,832	0,436	0,238	Mau

Pode se observar a relação entre os métodos analisados e o método PM-FAO56 para o 2º decêndio na Figura 2, nota-se que os métodos Pen 1948, PFP 1979 obtiveram boa correlação na escala decendial não apresentando falhas ao estimar a ET_0 . Os métodos Lin 1997 e Thorn mostraram valores dispersos.

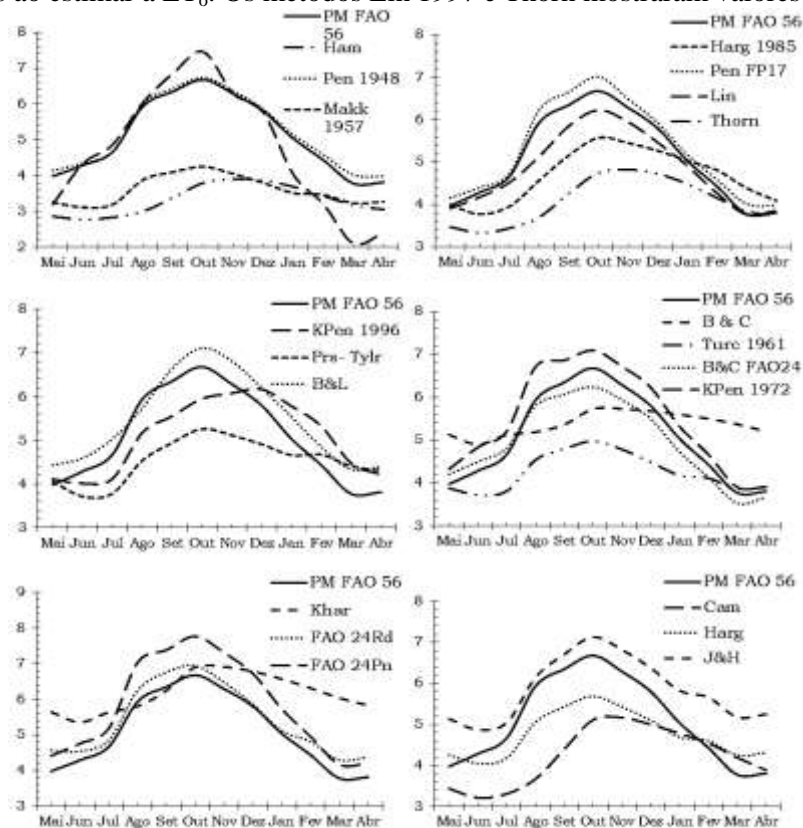


Figura 2 - Comparação do comportamento da evapotranspiração de referência (ET_0), estimada por diferentes métodos para os meses secos e chuvosos, correlacionando com o método de PM-FAO56 no 2º decêndio, para o município Campos Sales - CE

3.3 Terceiro Decêndio

Para o terceiro decêndio (Tabela 4) Pen 1948, PFP 17, BC FAO24, KPen 1972, FAO Rd, Pen mod FAO24, B&L e Lin 1971 apresentam desempenho ótimo, ($c > 0,85$). Já os métodos de Thorn 1948, Khar 1985, Cam 1971, Ham 1981, BC, obteve péssimo desempenho ($c \leq 0,40$).

Tabela 4 - Variáveis estatísticas da comparação entre os diferentes métodos com método PM-FAO56 em 3º decêndio, para o município Campos Sales-CE.

Métodos	r^2	EPE	%	d	c	Desempenho
Pen 1948	0,989	0,230	102,245	0,992	0,980	Ótimo
PFP 17	0,989	0,282	103,936	0,988	0,978	Ótimo
BC FAO24	0,972	0,347	97,099	0,980	0,953	Ótimo
KPen 1972	0,978	0,525	107,799	0,964	0,943	Ótimo
FAO24 Rd	0,957	0,501	106,565	0,961	0,919	Ótimo



Pen mod FAO24	0,984	0,855	114,278	0,920	0,905	Ótimo
Lin	0,924	0,568	95,140	0,941	0,869	Ótimo
B&L	0,914	0,652	107,690	0,931	0,851	Ótimo
KPen 1996	0,851	0,680	99,441	0,909	0,773	Muito Bom
Harg 1982	0,872	0,793	93,695	0,848	0,740	Bom
J&H	0,871	1,001	115,117	0,830	0,723	Bom
Turc 1961	0,872	1,160	83,884	0,707	0,617	Mediano
Pan FAO	0,782	1,758	94,372	0,780	0,610	Mediano
Harg 1985	0,754	0,972	92,104	0,762	0,574	Sofrível
Makk1957	0,868	1,713	70,782	0,606	0,526	Sofrível
Prs-Tylr	0,698	1,106	89,206	0,687	0,480	Mau
Thorn	0,607	1,462	79,765	0,599	0,364	Péssimo
Khar 1985	0,594	1,494	120,884	0,600	0,357	Péssimo
Cam 1971	0,545	1,385	82,963	0,619	0,338	Péssimo
Ham 1961	0,578	2,090	65,004	0,510	0,295	Péssimo
BC	0,537	1,191	105,430	0,446	0,240	Péssimo

Pode-se observar também que o método Khar 1985 subestimou o método PM FAO56 com o valor aproximadamente de 120,8%. Já o método Hamom 1961 foi o que mais superestimou a ET_o na escala decencial, e apresentou maior erro padrão de estimativa, onde o valor foi igual a 2,09, já o método de Pen 1948 foi o que obteve menor erro padrão de estimativa, que foi igual a 0,230, por ser um método semelhante ao de PM FAO56.

Observa-se a relação entre os métodos analisados e o método PM-FAO56 para o 3º decêndio na Figura 3, Nota-se que os métodos Penman 1948, PFP 17 obtiveram boa correlação na escala decencial não apresentando falhas ao estimar a ET_o . Os métodos Turc 1961 e Ham 1961 mostraram valores dispersos.

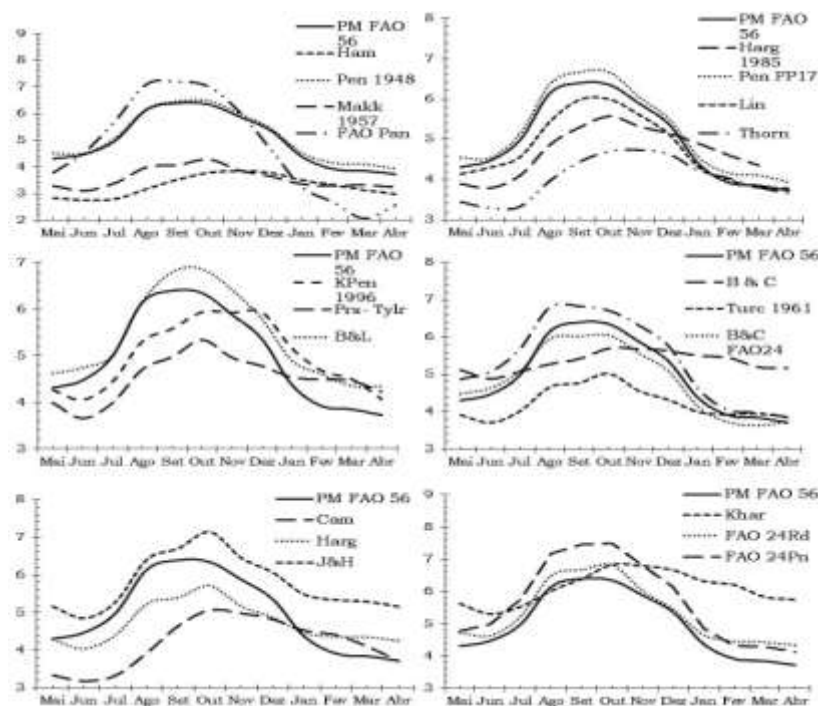


Figura 3 - Comparação do comportamento da evapotranspiração de referência (ET_o), estimada por diferentes métodos para os meses secos e chuvosos, correlacionando com o método de PM FAO56 no 3º decêndio, para o município Campos Sales – CE



4. CONCLUSÕES

No estudo de comparação dos vinte métodos avaliados em relação ao método padrão Penman Monteith FAO56 no período estudado pode se concluir:

Os métodos Kimberly-Penman 1996, Kimberly-Penman 1972, Penman 1948, Penman mod p FAO, Penman-Frère-Pop 1979, FAO24-Radiação, e Blaney-Cridlle FAO24, devido ter mostrado significativa correlação, mas para a estimativa da evapotranspiração de referência em período decendial é recomendado FAO24-Radiação por ser um método mais simples que os demais aqui estudados.

5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. M. **Comparação e calibração de equações de estimativa de ET_0 em Crateús-CE.** Iguatu: IFCE-CE, *Campus Iguatu*, 2010, 130p.

BORGES, A.C.; MEDIONDO, E.M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.11, n.3, p.293–300, 2007.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n.1, p. 89-97, 1997.

SALES, J. C. de. **Caracterização climática e comparação de métodos de evapotranspiração de referencia para regiões do estado do ceará.** Botucatu, 2008.

FIGUEIRÊDO., V., BATISTA. **Evapotranspiração, crescimento e produção da melancia e melão irrigados com águas de diferentes salinidades.** Tese. BOTUCATU-SP, 2008.

WILLMOTT, C.J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.