

AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ: I - EVAPOTRANSPIRAÇÃO.

Francisco de Souza

Professor Titular Departamento de Engenharia Agrícola da UFC, Campus do Pici - Bloco 804 - Cx. Postal 12.168 - CEP. 60450-760 - Fortaleza-CE.

1 RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma aplicação da equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração potencial (ETp) de sete municípios do Ceará com dados disponíveis no plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH). Os métodos comparados - Hargreaves e Thornthwaite, baseados na temperatura - não apresentaram resultados satisfatórios. Thornthwaite (1948) apresenta os piores resultados, quase sempre subestimando a ETp, no segundo semestre, em relação a Penman-Monteith - entre 10% e 36% nos meses de pico. No segundo semestre Hargreaves sempre subestima a ETp, chegando a valores de até 23%.

UNITERMOS: Evapotranspiração: Penman-Monteith

**SOUZA, F. - Hydroclimatological studies of Hydric resources of Ceara State Project:
I - Evapotranspiration.**

2 ABSTRACT

This paper is an application of Penman-Monteith equation to estimate potential evapotranspiration (ETp) to seven counties of Ceará State. Results were compared to temperature - based methods - Hargreaves and Thornthwaite. This presented the worst results always underestimating ETp in relation to Penman-Monteith - between 10% and 36% - in the "peak" month. Hargreaves always underestimates ETp in approximately 23%.

KEYWORDS: Evapotranspiration: Penman-Monteith

3 INTRODUÇÃO

De acordo com a Secretaria Estadual dos Recursos Hídricos (SRH), o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) é um instrumento de fundamental importância para viabilizar a política de recursos hídricos do Estado, tendo sido realizado com o objetivo de determinar, com apropriado grau de confiabilidade as efetivas potencialidades e disponibilidades de águas do Ceará. A partir das informações e dos conhecimentos existentes, foi possível realizar um diagnóstico e vários estudos de base sobre os aspectos jurídicos e institucionais, sobre a hidroclimatologia e a hidrogeologia das diversas bacias que compõem o Estado, e a partir daí foi também possível identificar, conceber e planejar todas as ações associadas à infraestrutura hídrica, ao modelo institucional e à legislação das águas.

Como instrumento de planejamento o PERH está sujeito a análise científica e técnica, mormente no que concerne às metodologias utilizadas, que evoluem com o tempo, bem como no que diz respeito a atualização de sua base de dados. Principalmente, em virtude da relevância que os recursos hídricos representam para o desenvolvimento sustentável do Estado.

O estudo da evapotranspiração tem evoluído bastante nos últimos anos, tanto no que diz respeito a sua medição em tempo real, como nas equações para a estimativa deste parâmetro. Vale salientar o papel fundamental da evapotranspiração no dimensionamento das obras hídricas e dos sistemas de irrigação, no manejo da irrigação, no cálculo do balanço hídrico de uma região, na classificação climática e nos estudos dos ecossistemas.

A análise dos ESTUDOS DE BASE do PERH, no seu aspecto de hidroclimatologia, demonstra a utilização da metodologia de Thornthwaite e Mather para a estimativa da evapotranspiração, no cálculo do balanço hídrico e, para a classificação do clima. No entanto, sabe-se que o método de Thornthwaite para estimar a ETp, somente deve ser utilizado em áreas úmidas - como está referenciado na fundamentação teórica do presente trabalho - e, portanto, sua aplicação em regiões áridas e semi-áridas compromete a confiabilidade dos resultados. Além do mais, trata-se de um método empírico, sem nenhum fundamento científico ou físico, baseado apenas em um parâmetro climático, no caso a temperatura.

É necessário, então, que o PERH, seja submetido a um rigoroso trabalho de revisão, com o uso de métodos mais adequados de estimativa da evapotranspiração. Na realidade, um dos princípios da política de recursos hídricos do PERH, é que o mesmo "deve ser revisto e atualizado com uma periodicidade mínima de quatro anos", com o objetivo de incluir correções e adaptações para melhorar a qualidade nos futuros planejamentos.

No presente trabalho, apresenta-se uma demonstração da aplicação da equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração potencial de sete municípios do Vale do Jaguaribe e um do vale do Parnaíba, utilizando-se dados

climáticos disponíveis no PERH. Ressalte-se que o método de Penman-Monteith é recomendado pela FAO (“Food and Agriculture Organization”) como o mais preciso, em base a estudos lisimétricos. É uma metodologia baseada no efeito combinado do transporte convectivo das massas de ar e da radiação líquida, ou seja, baseia-se na física do fenômeno, ao contrário do método de Thornthwaite.

Os resultados deste trabalho demonstram, que de um modo geral, Thornthwaite subestima a ET_p entre 10% a 30% em relação a Penman-Monteith, enquanto para Hargreaves estes valores situam-se entre 3% e 23%.

3.1. Fundamentação Teórica

O termo Evapotranspiração, ET, é utilizado para definir “o processo combinado pelo qual a água é transferida da superfície da terra para a atmosfera; evaporação da água da superfície do solo e interceptada pelas plantas, somada a transpiração pelas plantas” (Jensen, et al. 1990). Hatfield & Fuchs (1990) afirmam que é necessário entender que a perda de água na evapotranspiração está ocorrendo de uma superfície que está constantemente mudando, isto é, a parte aérea da cultura pode não cobrir completamente o solo e aumentar a medida que a planta se desenvolve, enquanto que a superfície do solo varia de totalmente úmida para completamente seca. A quantificação da evapotranspiração sob essas condições representa a Evapotranspiração Real ou Atual, ET_a. Por sua vez, a Evapotranspiração Potencial, ET_p, quantifica a demanda evaporativa da atmosfera. A ET_p foi definida pela primeira vez por Penman (1948) como “a quantidade de água transpirada na unidade de tempo, por uma cultura de baixo porte verde, cobrindo totalmente o solo, de altura uniforme e sem deficiência de água”.

Doorenbos & Pruitt (1977) introduziram a terminologia “Evapotranspiração de Referência”, ET_r, para denominar a perda de água por uma cultura específica que cobre a superfície do solo com suprimento ilimitado de água do solo.

De acordo com Hatfield & Fuchs (1990) a densidade do fluxo de vapor de superfícies vegetadas pode ser descrita pelo transporte convectivo ou pelo balanço de energia. Nenhum desses dois enfoques sozinhos explicam a influência dos fatores meteorológicos sobre a magnitude da densidade de fluxo de vapor. Hatfield & Fuchs explicam que Penman (1948) e, posteriormente, Monteith (1965) combinaram estes dois enfoques para mostrar que, para uma determinada superfície vegetada, a ET depende somente da energia radiante absorvida pela superfície subtraída da densidade de fluxo de calor no solo, da temperatura do ar e do correspondente déficit da pressão do vapor d’água, da velocidade do vento e da resistência da superfície. Portanto, radiação solar, radiação atmosférica, temperatura e umidade do ar e vento, são os fatores meteorológicos.

Nas últimas décadas muitas equações e métodos têm sido desenvolvidos com o objetivo de estimar a ET a partir de dados meteorológicos. Aqueles baseados nos estudos de Penman são classificados como “métodos combinados”. Há algumas metodologias baseadas na radiação, outras que estimam a ET a partir da temperatura e, ainda, métodos baseados na evaporação.

Segundo Jensen et. al. (1990) a forma geral da equação de Penman é:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6,43 W_f (e^{\circ}_z - e_z) \quad (1)$$

Onde:

λET_0 é o fluxo de calor latente da superfície da cultura; Δ é a declividade da curva da temperatura versus pressão de vapor; γ é a constante psicométrica; R_n é a radiação líquida; G é o fluxo de calor do solo; e°_z e e_z são as pressões do vapor saturado e real a uma altura z acima da superfície; $W_f = a_w + b_w U_2$, é uma função empírica da velocidade do vento, U_2 ; a_w e b_w são coeficientes determinados para cada local.

Hatfield & Fuchs (1990) afirmam que dentre os parâmetros da equação (1), a função do vento, W_f , é a que mais varia entre os diferentes pesquisadores.

Jensen et al. (1990) apresentaram uma análise em que foram avaliadas 20 equações para o cálculo da ET de referência, nove das quais eram métodos combinados. Resultados de ET medidas com lisímetros em 11 diferentes localidades, escolhidas rigorosamente, foram comparadas às estimativas mensais com todas as equações. O método que apresentou melhor acuracidade, para as 11 localidades, em relação aos resultados lisimétricos, foi o de Penman-Monteith. A FAO realizou, em 1990, um encontro com vários “experts” para fazer uma revisão no seu Manual N° 24, de Doorenbos & Pruitt (1977). A decisão unânime desse encontro é que o método de Penman-Monteith deve ser usado como padrão de comparação com outros métodos, na ausência de dados de lisímetros de precisão, por ser o método que melhor estima a evapotranspiração potencial ou de referência.

Observando que em muitas localidades somente os dados de temperatura e chuva estão disponíveis, muitos pesquisadores desenvolveram equações que têm por base este parâmetro. Dentre estes os mais conhecidos estão o de Thornthwaite (1948), de Blaney-Criddle (1950) e o de Hargreaves (1974, 1985). Doorenbos & Pruitt (1977) apresentaram uma modificação do método de Blaney-Criddle, corrigindo-o com informações de velocidade do vento, umidade relativa e brilho solar. Estes métodos têm sido muito usados no Nordeste do Brasil. Blaney-Criddle e Hargreaves são aplicados no dimensionamento de projetos, enquanto que, Thornthwaite é utilizado no cálculo do balanço hídrico, como foi o caso do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará (PERH).

A equação de Thornthwaite (1948) para estimar a evapotranspiração potencial é a seguinte:

$$ET_p = 1,6 (10 T/I)^a \quad (2)$$

Onde:

ET_p é a evapotranspiração potencial (cm), para um mês de 30 dias, considerando 12 horas de duração para cada dia; “T” é a temperatura média mensal (°C); I é um Índice térmico e, “a” é uma constante que varia de local para local.

O índice térmico anual é a soma dos doze índices térmicos mensais, isto é:

$$I = \sum_{n=1}^{12} I_n \quad (3)$$

em que,

$$I_n = (T_n/5)^{1,514} \quad (4)$$

sendo T_n a temperatura média mensal (°C), para o mês n ($n = 1, 2, \dots, 12$).

Para estimar a, usa-se a seguinte equação:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,792 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad (5)$$

A ET_p da equação (2) deve ser ajustada para a duração do dia e para o número de dias do mês.

Vianello & Alves (1994) observam que, Thornthwaite expressou a ET_p em função da temperatura média mensal. Estes autores afirmam que esta equação apresentou bons resultados no clima temperado continental da América do Norte, onde a fórmula foi derivada e onde a temperatura e a radiação são fortemente correlacionadas. Em, outras regiões os resultados não foram animadores. Em algumas regiões há uma defasagem entre temperatura e radiação, e o vento pode desempenhar um papel decisivo sobre a ET_p .

De acordo com Hatfield & Fuchs (1990) a equação de Thornthwaite é aplicável somente para regiões úmidas devido às limitações impostas à mesma por Thornthwaite e Mather (1955), que são: albedo padrão, condições sem advecção e divisão constante da radiação líquida em calor latente e calor sensível. Nos estudos realizados por Jensen et al. (1990) comparando 20 equações para a estimativa da ET, os dois métodos baseados na temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle) apresentaram os piores resultados em relação aos lisímetros de 11 localidades. Na realidade, a pior performance foi do método de Thornthwaite que subestimou, em média, a ET em 21%. Quando são tomados os dados das localidades áridas, observa-se que este método estima a ET como 63% do valor medido em lisímetros.

Apesar das grandes limitações do método de Thornthwaite, o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará (1992) (PERH) um Estado localizado na região semi-árida do país, foi elaborado em base a este método. Saliente-se que o próprio PERH reconhece que “é preciso esclarecer que o método (de Thornthwaite) não é necessariamente capaz de fornecer resultados absolutos quando aplicados fora da área para o qual foi desenvolvido”. Além do mais, o PERH afirma que “o método é largamente utilizado quando não se dispõe de dados para possibilitar estudos mais refinados”. Ressalte-se que o PERH apresenta, nos seu “Estudos de Base I - Hidroclimatologia” os dados necessários a aplicação de metodologias mais refinadas, como os métodos combinados e da radiação, além de ser um fato que estes métodos já estavam disponíveis há várias décadas.

Hargreaves (1974) apresenta uma equação para estimar a ET_p no Nordeste do Brasil que tem a seguinte forma:

$$ET_p = F \cdot TF \cdot CH \quad (6)$$

F = Fator para latitude

TF = Temperatura média em ° F

TF = 32 + 1,8 T

T = $\frac{T_{12:00} + 2 T_{24:00} + T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{5}$

CH = $0,158 \sqrt{(100 - UR)} < 1$

A equação (2) foi usada para calcular a ET_p para várias localidades no Nordeste, sendo usada indiscriminadamente no dimensionamento de projetos de irrigação, apesar de seus resultados não terem sido comparados a dados lisimétricos. Alguns estudos esporádicos têm comparado a equação (2) com formulações da equação de Penman (Souza & Yoder, 1994).

Souza & Yoder (1994) fizeram um estudo comparativo de duas formulações de Hargreaves (1974; 1985) considerando Penman-Monteith como padrão. Os resultados mostraram que a versão de 1974 de Hargreaves superestima ET_p para todos os meses, em Fortaleza, de 5% a 32%.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia constou da análise de 3 aspectos dos “Estudos de Base-Hidroclimatologia” do PERH (Plano Estadual de Recursos Hídricos).

(a) a evapotranspiração potencial (ET_p) que foi comparada utilizando-se 3 diferentes métodos de estimativa: Penman-Monteith, Thornthwaite e Hargreaves;

(b) o balanço hídrico, para cada localidade, pela metodologia de Thornthwaite-Mather (1955), usando a Evapotranspiração Potencial computada pela equação de Penman-Monteith;

(c) a classificação do clima, em base ao novo balanço hídrico de cada localidade.

Para o cálculo de ET_p pelo método de Penman-Monteith foi utilizado o “software” CROPWAT, que é um programa de computador desenvolvido pela FAO (1993), versão 5.6, para calcular as necessidades de água dos cultivos a partir de informações do solo, clima e cultivos. O CROPWAT inclui um método revisado para estimar a evapotranspiração de referência baseada nos estudos de Penman e Monteith, que foi recomendada na reunião de especialistas da FAO (1990), referida anteriormente. Os dados necessários para o programa são latitude, longitude e altitude do lugar, as temperaturas máximas e mínimas, a umidade relativa, a velocidade média do vento e um parâmetro de energia, que pode ser a radiação líquida, a radiação solar ou a insolação. No presente caso, foram usados dados médios mensais de séries históricas obtidas no documento do PERH - ESTUDO DE BASE I (ver Anexo). A análise foi realizada para sete municípios da bacia do Jaguaribe, Aracati, Barbalha, Campos Sales, Jaguaruana, Juazeiro do Norte, Morada Nova e Tauá e um da bacia do Parnaíba - Crateús.

Os dados relativos a ET_p pelo método de Thornthwaite foram obtidos do PERH - ESTUDO DE BASE I. Os valores de ET_p calculados pela metodologia de Hargreaves foram compilados do manual elaborado por aquele autor. (Hargreaves, 1974).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Evapotranspiração Potencial Anual e no Mês de Máxima Demanda

No Quadro 1 são apresentados os valores da evapotranspiração potencial anual (ET_p -ano) e para o mês de máxima demanda hídrica (ET_p -pico), para sete municípios da bacia do Jaguaribe, Aracati, Barbalha, Campos Sales, Jaguaruana, Juazeiro do Norte, Morada Nova e Tauá e um da bacia do Parnaíba - Crateús. Esses valores foram estimados pelas equações de Penman-Monteith, Thornthwaite e Hargreaves. São, também, apresentados os percentuais de estimativa dos dois métodos empíricos baseados na temperatura em relação ao método científico de Penman-Monteith, que é recomendado pela FAO como o padrão de comparação em relação aos demais.

O primeiro aspecto objeto de análise é a variação da ET_p anual para os vários municípios. Comparando-se as 3 metodologias observa-se que a ET_p estimada por Penman-Monteith varia de um mínimo de 1821mm/ano, em Barbalha, a um máximo de 2095 mm/ano em Crateús. Este valor é muito aproximado da ET_p de Campos Sales, que é de 2092 mm/ano. Observando-se os resultados obtidos com a equação de Thornthwaite, constata-se que os mesmos foram muito inferiores ao do método padrão de comparação, variando de um mínimo de 1349 mm/ano, para Campos Sales, a um máximo de 1737 mm/ano, para Jaguaruana. Dois fatos chamam a atenção: (a) o valor máximo da ET_p anual de Thornthwaite é 1737 mm/ano, o que é inferior ao valor mínimo de Penman-Monteith (1821 mm/ano); (b) o município com um dos maiores valores de ET_p -ano pelo melhor método (Penman-Monteith; Campos Sales com 2092 mm/ano) é o mesmo que apresenta o menor valor de ET_p -ano quando a estimativa é feita com o pior método (Thornthwaite, 1349 mm/ano). Em termos percentuais, Thornthwaite subestima ET_p de um mínimo de 10,3% para Jaguaruana, a um máximo de 35,5%, em Campos Sales, com relação a Penman-Monteith. No caso da equação de Hargreaves, a variação entre municípios vai de 1611 mm/ano, em Aracati, a 1961 mm/ano em Crateús, ou seja, a performance de Hargreaves é melhor do que a de Thornthwaite.

Vale observar que os resultados aqui alcançados com a metodologia de Thornthwaite estão de acordo com Jensen et al. (1990), que compararam 20 equações para a estimativa da ET_p com medições lisimétricas, e concluíram que a pior performance foi de Thornthwaite, que

subestimou a ET_p , em média, em 21%. No caso presente, a média é de 20,8%. Além do mais, conforme Hatfield & Fuchs (1990), a equação de Thornthwaite só é aplicável para regiões úmidas o que não é o caso do Nordeste brasileiro. Com relação a Hargreaves, os valores anuais computados de ET_p estão em alguns casos abaixo, e em outros acima daqueles calculados por Penman-Monteith. Variam desde -2,3%, para Juazeiro, a 22,9%, em Aracati. É preciso enfatizar que quase a totalidade dos projetos de irrigação do Ceará são dimensionados em base a Hargreaves, o que significa dizer que tais projetos não estão adequadamente dimensionados, pois no mês de máxima demanda estes projetos não têm capacidade para servir a água necessária a máxima produção, e consequentemente, as culturas devem sofrer estresse hídrico.

Tais afirmações podem ser melhor analisadas quando se observam os resultados referentes ao mês de máxima demanda do Quadro 1. O primeiro aspecto a notar é que o mês de outubro é de demanda máxima em 7 dos 8 municípios analisados. Mesmo assim, o valor de 217 mm/ano mês, para Aracati, não difere muito de 214 mm/ano no mês de outubro. Enquanto isso, utilizando Hargreaves ou Thornthwaite, o mês de máxima demanda é dezembro em 5 municípios, dentre eles Tauá, Morada Nova, Juazeiro e Jaguaruana (observar também Quadros 2 a 9). O que chama atenção é o fato de que os parâmetros climáticos determinantes de altos valores de ET_p (temperatura, insolação e velocidades dos ventos elevados e umidade relativa baixa) são mais acentuados em outubro do que em dezembro (ver Tabelas 5-8 no anexo). Isto mostra a pouca adequabilidade dos métodos baseados em um único parâmetro climático, como é o caso de Thornthwaite e Hargreaves, para estimar a ET_p em climas semi-áridos e áridos, quando comparados com métodos combinados, baseados em Penman. O que ocorre é que no segundo semestre a umidade relativa, a insolação e a velocidade do vento aumentam. Isto faz com que aumentem também o déficit da pressão do vapor, a energia disponível para a ET e a advecção. O método de Penman-Monteith responde a estes fatores, e como consequência há o aumento da ET_p , como pode ser observado nos Quadros e Figuras para os vários municípios. Para o mês de máxima demanda hídrica, o método de Thornthwaite subestima a ET_p em um mínimo de 15,1% (Juazeiro) a um máximo de 38,6% (Campos Sales), enquanto que Hargreaves, superestima a ET_p anual em 7%, em Juazeiro,

e subestima em até 26,7%, em Aracati. Em resumo, deve-se, sempre que houver disponibilidade de dados, utilizar o método de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração potencial, como no presente caso de municípios do Vale do Jaguaribe. Isto enseja dimensionamento mais preciso dos sistemas de irrigação, o manejo eficiente destes sistemas, o cálculo correto do balanço hídrico de uma região e a classificação do clima, entre outras aplicações. Outro aspecto importante é melhorar a coleta de informações meteorológicas.

Quadro 1 - Etp total anual e no mês de máxima demanda para 8 municípios do Ceará

MUNICÍPIO	METODOLOGIA									
	Penman - Monteith		Thornthwaite		Hargreaves		Perc. Relativo a Penman-Monteith			
	Anual (mm)	máx. dem. (mm/mês)	Anual (mm)	máx. dem. (mm/mês)	Anual (mm)	máx dem. (mm/mês)	Thornthwaite (mm) (mm/mês)		Hargreaves (mm) (mm/mês)	
Aracati	2090,00	217,00	1549,00	144,00	1611,00	159,00	25,89	33,64	22,92	26,73
Barbalha	1821,00	191,00	1434,00	149,00	1884,00	199,00	21,25	21,99	-3,46	-4,19
Campos Sales	2092,00	236,00	1349,00	145,00	1737,00	195,00	35,52	38,56	16,97	17,37
Crateús	2095,00	239,00	1646,00	164,00	1961,00	203,00	21,43	31,38	6,40	15,06
Jaguaruana	1936,00	211,00	1737,00	157,00	1846,00	189,00	10,28	25,59	4,65	10,43
Juazeiro do Norte	1841,00	186,00	1525,00	158,00	1884,00	199,00	17,16	15,05	-2,34	-6,99
Morada Nova	2047,00	219,00	1714,00	161,00	1938,00	202,00	16,27	26,48	5,32	7,76
Tauá	1930,00	208,00	1567,00	158,00	1928,00	198,00	18,81	24,04	0,10	4,81

5.2 Evapotranspiração Potencial Média Mensal

Nos Quadros 2 a 9 e nas Figuras 1 a 16 são apresentadas as estimativas e as variações da evapotranspiração potencial média mensal e da média diária, para cada mês, para sete municípios do Vale do Jaguaribe e um do vale do Parnaíba, respectivamente, Aracati, Barbalha, Campos Sales, Jaguaruana, Juazeiro do Norte, Morada Nova, Tauá e Crateús.

No caso de Aracati (Quadro 2), os valores mensais da ET_p calculados por Thornthwaite, são inferiores aos de Penman-Monteith, variando de 7,4% (maio) a 46,1% (agosto). O uso dos valores de ET_p de Penman-Monteith, que segundo a FAO são os mais precisos, devem alterar os cálculos do balanço hídrico do PERH, já que este plano utilizou a ET_p de Thornthwaite. A classificação climática deve também ser modificada. Ainda para Aracati, mas com relação a aplicação da equação de Hargreaves, verifica-se que a tendência é semelhante ao método de Thornthwaite, comparativamente a Penman-Monteith. Hargreaves subestima a ET_p em relação a Penman-Monteith, de 8,1% (dezembro) a 35,9% (agosto). Como os resultados de Hargreaves são comumente usados para o dimensionamento de projetos de irrigação no Nordeste e, particularmente no Ceará deve se concluir que os mesmos não são dimensionados adequadamente.

Para o município de Barbalha (Quadro 3), Thornthwaite subestima ET_p entre 9,9%, em dezembro, e 36,6%, em julho. Os valores calculados por Hargreaves apresentam aqui um comportamento diferente ao longo do ano. Durante vários meses (de abril a setembro) os valores de ET_p de Hargreaves são menores do que os de Penman-Monteith, apresentando percentuais positivos variando de 4,4% a 4,3%, para abril e setembro, respectivamente. No entanto, de outubro a março os valores percentuais são negativos, ou seja, a ET_p dada por Hargreaves superestima em relação a Penman-Monteith, que é o padrão comparativo. Este mesmo padrão de comportamento se repete para a maioria dos municípios (ver Figuras 3,4 e 7-16), a exceção de Aracati e Campos Sales. Vale salientar que Aracati é uma cidade costeira. Souza & Yoder (1994) encontraram que, considerando o Penman-Monteith como padrão, a equação de Hargreaves 1985 superestimou ET_p de janeiro a julho e subestimou de julho a dezembro para Fortaleza. No caso de Pentecoste, a 50 Km da costa, estes autores encontraram que, tanto Hargreaves 1974 como 1985, superestimavam ET_p .

Em Campos Sales (Quadro 4) as variações mensais em ET_p situam-se entre 22,1% (em fevereiro) e 49,6% (em agosto), para o caso de Thornthwaite relativo a Penman-Monteith, e entre - 1,5, em janeiro, e 31,3%, em junho, no caso de Hargreaves.

Para os municípios de Jaguaruana (Quadro 6 e Figuras 9 e 10) e Morada Nova (Quadro 8 e Figuras 13 e 14) ocorreu uma superestimativa de Thornthwaite em relação a Penman-Monteith, de março a maio. Na realidade, pode-se observar que é neste período do ano que o método de Thornthwaite apresenta menores valores de subestimativas ou até mesmo superestimativa. Isto se deve, certamente, as condições mais amenas para a demanda evaporativa atmosférica: menores valores de temperatura médias, com menor amplitude entre as máximas e mínimas; menor umidade relativa de ar e, portanto, menor déficit de pressão do vapor; e menor quantidade de horas de luz solar, consequentemente, menor radiação líquida; e

finalmente, ventos mais calmos. No período de agosto a novembro estas condições ficam mais adversas, portanto, Thornthwaite não estima bem porque não considera advecção e baseia-se somente na temperatura.

No caso dos municípios de Crateús (Quadro 5 e Figuras 7 e 8), Juazeiro (Quadro 7 e Figuras 11 e 12) e Tauá (Quadro 9 e Figuras 15 e 16) o comportamento da ETp mensal ao longo do ano é semelhante ao que foi discutido para Barbalha.

Algumas conclusões podem ser apresentadas a partir desta análise. Em primeiro lugar, os métodos baseados na temperatura não estimam com precisão a ETp para muitos municípios do Ceará, quando comparados ao método mais científico, recomendado mundialmente pela FAO - o método de Penman-Monteith. Provavelmente, isto seja verdade para todo o semi-árido cearense. São necessárias pesquisas com bases científicas. O método de Hargreaves, que é ampla e cegamente usado por técnicos no Estado para dimensionar projetos de irrigação, é o menos ruim. Mas, os seus cálculos podem variar de superestimativas de 3,0% a subestimativas de 23%, quando se considera apenas o mês de máxima demanda. Estes valores podem ser de até 30% para alguns municípios, com fins de manejo e calendários de irrigação. Projetos subdimensionados com esta equação podem não entregar a vazão máxima necessária à máxima produção, quando a planta mais necessita. Pode ser a causa do fracasso de muitos projetos. Pode, inclusive, impedir que sejam adotadas práticas adequadas de manejo de água.

Por outro lado, o uso de Thornthwaite para cálculo da ETp e sua posterior aplicação em dimensionamento de obras hidráulicas - incluindo aí os projetos de irrigação - no cálculo do balanço hídrico e na classificação do clima é um equívoco, porque este é um método desenvolvido para ser utilizado em áreas úmidas. Há evidências na literatura, e os resultados aqui apresentados demonstram os erros nas estimativas. Nos meses de máxima demanda hídrica este método subestima a ETp entre 10% e 36%, podendo alcançar maiores valores em outros meses.

Em vista do exposto, é necessário uma revisão do PERH nos seus vários aspectos metodológicos e de atualização das bases de dados. Além do mais, é preciso que haja uma mudança nos cálculos na estimativa das necessidades de água substituindo Hargreaves por Penman-Monteith nos estudos de viabilidade e projetos executivos de irrigação. Também, recomenda-se um esforço da pesquisa científica e tecnológica nos métodos de medição lisimétrica e micrometeorológicas da evapotranspiração, assim como a calibração local das equações empíricas existentes. É importante que se enfatize a necessidade de atualização do corpo técnico do Estado com os novos avanços tecnológicos no campo da agricultura irrigada, recursos hídricos e outras áreas afins. Não apenas nos aspectos de engenharia e de novos sistemas de aplicação de água, mas também, nos aspectos relativos ao manejo da água e agrometeorológicos do uso da água pelas plantas.

Quadro 2 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária para o município de Aracati

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	192,20	6,20	143,00	4,61	146,00	4,71	25,60	24,04
Fevereiro	162,40	5,80	129,00	4,61	125,00	4,46	20,57	23,03
Março	161,20	5,20	138,00	4,45	128,00	4,13	14,39	20,60
Abril	147,00	4,90	125,00	4,17	116,00	3,87	14,97	21,09
Mai	142,60	4,60	132,00	4,26	117,00	3,77	7,43	17,95
Junho	135,00	4,50	120,00	4,00	111,00	3,70	11,11	17,78
Julho	186,00	6,00	116,00	3,74	124,00	4,00	37,63	33,33
Agosto	217,00	7,00	117,00	3,77	139,00	4,48	46,08	35,94
Setembro	204,00	6,80	118,00	3,93	145,00	4,83	42,16	28,92
Outubro	213,90	6,90	133,00	4,29	159,00	5,13	37,82	25,67
Novembro	165,00	5,50	134,00	4,47	150,00	5,00	18,79	9,09
Dezembro	164,30	5,30	144,00	4,65	151,00	4,87	12,36	8,09
Totais	2090,60		1549,00		1611,00		25,91	22,94

Quadro 3 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	144,77	4,67	129,00	4,16	186,00	6,00	10,89	-28,48
Fevereiro	127,12	4,54	109,00	3,89	138,00	4,93	14,25	-8,56
Março	128,65	4,15	108,00	3,48	134,00	4,32	16,05	-4,16
Abril	120,30	4,01	104,00	3,47	115,00	3,83	13,55	4,41
Mai	127,10	4,10	104,00	3,35	123,00	3,97	18,17	3,23
Junho	127,20	4,24	94,00	3,13	121,00	4,03	26,10	4,87
Julho	154,69	4,99	98,00	3,16	143,00	4,61	36,65	7,56
Agosto	174,84	5,64	116,00	3,74	160,00	5,16	33,65	8,49
Setembro	186,00	6,20	134,00	4,47	178,00	5,93	27,96	4,30
Outubro	190,65	6,15	149,00	4,81	194,00	6,26	21,85	-1,76
Novembro	177,60	5,92	143,00	4,77	193,00	6,43	19,48	-8,67
Dezembro	162,13	5,23	146,00	4,71	199,00	6,42	9,95	-22,74
TOTAL S	1821,05		1434,00		1884,00		21,25	-3,46

Quadro 4 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária para o município de Campos Sales

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	159,70	4,67	119,00	3,84	162,00	5,23	25,49	-1,44
Fevereiro	129,60	4,54	101,00	3,61	118,00	4,21	22,07	8,95
Março	125,20	4,15	94,00	3,03	115,00	3,71	24,92	8,15
Abril	132,30	4,01	96,00	3,20	106,00	3,53	27,44	19,88
Mai	149,10	4,10	95,00	3,06	107,00	3,45	36,28	28,24
Junho	157,20	4,24	84,00	2,80	108,00	3,60	46,56	31,30
Julho	169,90	4,99	92,00	2,97	120,00	3,87	45,85	29,37
Agosto	216,10	5,64	109,00	3,52	151,00	4,87	49,56	30,12
Setembro	225,30	6,20	126,00	4,20	173,00	5,77	44,07	23,21
Outubro	236,50	6,15	145,00	4,68	195,00	6,29	38,69	17,55
Novembro	198,00	5,92	143,00	4,77	192,00	6,40	27,78	3,03
Dezembro	192,80	5,23	145,00	4,68	190,00	6,13	24,79	1,45
TOTAL S	2091,70		1349,00		1737,00		35,51	16,96

Quadro 5 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	174,22	5,62	153,00	4,94	199,00	6,42	12,18	-14,22
Fevereiro	133,28	4,76	120,00	4,29	151,00	5,39	9,96	-13,30
Março	123,38	3,98	120,00	3,87	130,00	4,19	2,74	-5,37
Abril	117,00	3,90	115,00	3,83	118,00	3,93	1,71	-0,85
Mai	131,75	4,25	118,00	3,81	121,00	3,90	10,44	8,16
Junho	140,40	4,68	112,00	3,73	132,00	4,40	20,23	5,98
Julho	182,59	5,89	125,00	4,03	148,00	4,77	31,54	18,94
Agosto	203,36	6,56	145,00	4,68	171,00	5,52	28,70	15,91
Setembro	219,00	7,30	151,00	5,03	184,00	6,13	31,05	15,98
Outubro	239,01	7,71	164,00	5,29	203,00	6,55	31,38	15,07
Novembro	224,40	7,48	160,00	5,33	201,00	6,70	28,70	10,43
Dezembro	206,15	6,65	163,00	5,26	203,00	6,55	20,93	1,53
TOTALS	2094,54		1646,00		1961,00		21,41	6,38

Quadro 6 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária para o município de Jaguaruana.

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	178,87	5,77	156,00	5,03	174,00	5,61	12,79	2,72
Fevereiro	139,16	4,97	137,00	4,89	146,00	5,21	1,55	-4,92
Março	132,99	4,29	144,00	4,65	132,00	4,26	-8,28	0,74
Abril	124,80	4,16	141,00	4,70	112,00	3,73	-12,98	10,26
Mai	124,62	4,02	141,00	4,55	135,00	4,35	-13,14	-8,33
Junho	127,50	4,25	125,00	4,17	119,00	3,97	1,96	6,67
Julho	147,25	4,75	141,00	4,55	135,00	4,35	4,24	8,32
Agosto	178,25	5,75	148,00	4,77	167,00	5,39	16,97	6,31
Setembro	190,50	6,35	145,00	4,83	176,00	5,87	23,88	7,61
Outubro	210,80	6,80	151,00	4,87	184,00	5,94	28,37	12,71
Novembro	196,20	6,54	151,00	5,03	177,00	5,90	23,04	9,79
Dezembro	185,07	5,97	157,00	5,06	189,00	6,10	15,17	-2,12
TOTALS	1936,01		1737,00		1846,00		10,28	4,65

Quadro 7 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária para o município de Juazeiro do Norte

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	160,27	5,17	148,00	4,77	186,00	6,00	7,66	-16,05
Fevereiro	130,76	4,67	106,00	3,79	138,00	4,93	18,94	-5,54
Março	130,51	4,21	120,00	3,87	134,00	4,32	8,05	-2,67
Abril	114,00	3,80	113,00	3,77	115,00	3,83	0,88	-0,88
Mai	130,51	4,21	120,00	3,87	123,00	3,97	8,05	5,75
Junho	125,40	4,18	99,00	3,30	121,00	4,03	21,05	3,51
Julho	145,70	4,70	102,00	3,29	143,00	4,61	29,99	1,85
Agosto	177,01	5,71	116,00	3,74	160,00	5,16	34,47	9,61
Setembro	184,50	6,15	139,00	4,63	178,00	5,93	24,66	3,52
Outubro	184,76	5,96	149,00	4,81	194,00	6,26	19,35	-5,00
Novembro	186,30	6,21	155,00	5,17	193,00	6,43	16,80	-3,60
Dezembro	171,74	5,54	158,00	5,10	199,00	6,42	8,00	-15,87
TOTAIS	1841,46		1525,00		1884,00		17,19	-2,31

Quadro 8 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária para o município de Morada Nova

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	193,44	6,24	160,00	5,16	189,00	6,10	17,29	2,30
Fevereiro	148,12	5,29	135,00	4,82	150,00	5,36	8,86	-1,27
Março	143,22	4,62	144,00	4,65	135,00	4,35	-0,54	5,74
Abril	130,50	4,35	138,00	4,60	126,00	4,20	-5,75	3,45
Mai	133,61	4,31	141,00	4,55	120,00	3,87	-5,53	10,19
Junho	130,80	4,36	122,00	4,07	117,00	3,90	6,73	10,55
Julho	151,59	4,89	126,00	4,06	147,00	4,74	16,88	3,03
Agosto	177,63	5,73	138,00	4,45	172,00	5,55	22,31	3,17
Setembro	200,70	6,69	145,00	4,83	183,00	6,10	27,75	8,82
Outubro	218,55	7,05	152,00	4,90	201,00	6,48	30,45	8,03
Novembro	211,20	7,04	152,00	5,07	196,00	6,53	28,03	7,20
Dezembro	207,39	6,69	161,00	5,19	202,00	6,52	22,37	2,60
TOTAIS	2046,75		1714,00		1938,00		16,26	5,31

Quadro 9 - Evapotranspiração potencial mensal e média diária para o município de Tauá

MESES	PENMAN-MONTEITH (PM)		THORNTHWAI TE (TH)		HARGREAVES (HG)		PM/TW (%)	PM/HG (%)
	PM (mm/mês)	PM (mm/dia)	TH (mm/mês)	TH (mm/dia)	HG (mm/mês)	HG (mm/dia)		
Janeiro	160,27	5,17	151,00	4,87	197,00	6,35	5,78	-22,92
Fevereiro	128,24	4,58	119,00	4,25	151,00	5,39	7,21	-17,75
Março	132,06	4,26	128,00	4,13	147,00	4,74	3,07	-11,31
Abril	125,10	4,17	109,00	3,63	135,00	4,50	12,87	-7,91
Mai	126,79	4,09	100,00	3,23	123,00	3,97	21,13	2,99
Junho	139,50	4,65	103,00	3,43	120,00	4,00	26,16	13,98
Julho	157,79	5,09	113,00	3,65	141,00	4,55	28,39	10,64
Agosto	181,35	5,85	131,00	4,23	160,00	5,16	27,76	11,77
Setembro	194,10	6,47	145,00	4,83	175,00	5,83	25,30	9,84
Outubro	207,08	6,68	155,00	5,00	186,00	6,00	25,15	10,18
Novembro	193,80	6,46	155,00	5,17	195,00	6,50	20,02	-0,62
Dezembro	183,52	5,92	158,00	5,10	198,00	6,39	13,91	-7,89
TOTAIS	1929,60		1567,00		1928,00		18,79	0,08

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise realizada no presente trabalho permite observar as seguintes conclusões:

6.1 Com relação a Evapotranspiração:

- Os métodos de estimativa da evapotranspiração potencial - ETp - baseados na temperatura, (Thornthwaite e Hargreaves) não apresentam resultados satisfatórios para vários municípios do Ceará, quando comparados ao método científico - Penman-Monteith - recomendado pela FAO. Provavelmente, isto é verdadeiro para todo o semi-árido nordestino. Estudos devem ser realizados neste sentido nas localidades com disponibilidades de dados (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, radiação líquida, solar ou insolação).

- Dos dois métodos analisados o de Thornthwaite (1948) apresenta os piores resultados, sempre subestimando a ETp no segundo semestre (entre 10 % e 36 % , nos meses de pico) e algumas vezes superestimando-a no primeiro semestre.

- A equação de Hargreaves (1974) apresenta melhores resultados que a de Thornthwaite (1948). Ainda assim, nos períodos em que a irrigação é indispensável - segundo semestre - Hargreaves sempre subestima a ETp, chegando a valores de até 23 %, para o mes de máxima demanda. O uso desta equação conduz a projetos de irrigação sub-dimensionados, não estando aptos a aplicar a quantidade de água necessária a máxima produção das culturas.

Em base aos resultados aqui apresentados recomenda-se:

- atualizar o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH em relação às bases de dados utilizados e, principalmente, às metodologias adotadas;
- reavaliar a área potencialmente irrigável apresentada nos estudos de base do PERH, uma vez que a estimativa das mesmas foi feita com base no estoque de projetos das instituições do Estado baseados, certamente, em métodos empíricos de cálculo da ETp;
- exigir que todos os estudos a serem realizados no futuro, tais como planos diretores, estudos de pré-viabilidade e viabilidade, projetos básicos e executivos tenham suas necessidades hídricas calculadas com base ao método científico de Penman-Monteith, nas localidades com disponibilidades de informações;
- preparar um "Manual sobre as Necessidades Hídricas das Culturas", usando a equação de Penman-Monteith, para os municípios com disponibilidades de dados, a exemplo do Manual do Hargreaves elaborado pela SUDENE.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLANEY, H.F., CRIDDLE, W.D., 1950. Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Cons. Serv. SCS - TP 96.

- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O.. Guidelines for prediction of crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Pap., n. 24, 1977, 144 p.
- HARGREAVES, G.H. Potencial evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil. Logan: Utah State University, 1974. 66 p.
- HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Engreg. Agric., v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- HATFIELD, J.L. and FUCHS, M. 1990. Evapotranspiration models. In: HOFFMAN, G. J., HOWELL, T. A., SOLOMON, K.H.(eds.) Management of farm irrigation systems. St. Joseph: ASCE, Chap. 3, pp 33-59.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., ALLEN, R.G. (ed). Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1990. 442 p.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. Symp. Soc. Expl. Biol., v. 19, p. 205 – 239, 1965.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. Lond. A, v. 193, p. 120 – 146, 1948
- SOUZA, F., YODER, R.E. 1994. ET estimation in the northeast of Brazil: Hargreaves or Penman - Monteith equation ? ASAE. Meeting Paper Nº 942545, Dec. Atlanta, Georgia.
- THORNTWAITE, C.W. An Approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., v. 38, p. 55 – 94, 1948.
- THORNTWAITE, C.W., MATHER, J.R. 1955. The Water Balance. Publication in Climatology Nº 8, Laboratory of Climatology, Centerton, N.J.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R., Meteorologia básica e aplicada. Imprensa Universitária. Viçosa. UFV, 1994. 449p.