

## RESUMO

Valores de evapotranspiração potencial (ETp) mensal, calculados através de nove fórmulas empíricas (Thornthwaite, Blaney Criddle, Blaney-Morin, Makkink, Turc, Garcia-López, Hargreaves, Jensen-Haise e Perman) foram calculados para a localidade de Areia e comparados com dados de evapotranspiração potencial (ETp) de culturas, estimados a partir de valores de evaporação de tanque classe A-USWB, multiplicado pelo fator 0,8 ( $Et \times 0,8$ ).

Os resultados deste estudo revelaram que a fórmula de Makkink fornece a melhor estimativa de ETp de culturas em Areia. Em continuação, vêm as de Perman e Garcia-Lopez e, finalmente, a de Thornthwaite. Sérias limitações apresentam as fórmulas de Jensen-Haise, Hargreaves, Blaney-Morin e Turc. Seu uso estaria condicionado à introdução de profundas modificações tendentes a corrigir os seus marcantes desvios do método padrão. Não se recomenda o uso, em Areia, da equação de Blaney-Criddle, já que, além de superestimar excessivamente os valores de  $Et \times 0,8$ , é a que apresenta os menores coeficientes de correlação e determinação e valores das constantes a e b, da equação da reta, muito afastados de 0 e 1, respectivamente.

**Palavras chaves:** Evapotranspiração, evapotranspiração potencial, evaporação de tanque.

## ABSTRACT

## EVAPOTRANSPIRATION CALCULATED IN AREIA - PARAÍBA

Monthly potential evapotranspiration (ETp) values were calculated for Areia by using nine empirical formulas (Thornthwaite, Blaney-Criddle, Blaney-Morin, Makkink, Turc, Garcia-López, Hargreaves, Jensen-Haise and Perman) relating evapotranspiration to standard climatological data. Values obtained were compared to evaporation from U.S. Weather Bureau class A pan times 0.8 ( $Et \times 0.8$ ) which was assumed to represent potential evapotranspiration from growing crops in Areia - PB.

The results of this study indicated that Makkink method provides the most reliable indication of ETp from growing crops.

- (1) Colaboração do Departamento de Solos e Engenharia Rural CCA/UFPb - Areia-Pb
- (2) Professor Visitante do CCA/UFPb
- (3) Professor Colaborador do CCA/UFPb - Centro de Ciências Agropecuárias e Universidade Federal da Paraíba.

Others, as Penman, Garcia-López and Thornthwaite ones, gave good approaches of  $E_t \times 0.8$ , which means they can be successfully applied in the area. Severe limitations presented the Jensen-Haise, Hargreaves, Blaney-Morin and Turc equations, either because overestimated (Jensen-Haise and Hargreaves) or underestimated (Blaney-Morin and Turc) too much  $ET_p$  from crops. Their applications in Areia should be conditioned to drastic modifications in order to correct their pronounced deviation from the check.

Finally, the use of the Blaney-Criddle formula by no means is recommended for Areia since, besides of yielding too much larger values than the check ( $E_t \times 0.8$ ) gave the lowest correlation and determination coefficients as well as values of the constants *a* and *b* of its linear regression equation quite far from 0 and 1, respectively.

**Key words:** Evapotranspiration, potential evapotranspiration, pan evaporation.

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) das culturas é um processo bastante complexo, que envolve muitas variáveis, tanto climáticas quanto do solo e das culturas. Devido à evapotranspiração constituir a maior perda de água no ciclo hidrológico, em muitas regiões da terra, tem-se conduzido uma quantidade de pesquisa e proposto uma ampla variedade de métodos para estimá-la.

THORNTHWAITTE et alii (1944) definiram evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) como "a perda de água que ocorrerá se nunca houver uma deficiência de água no solo para uso da vegetação." Segundo STANHILL (1973) esta definição é clara, independente da teoria, susceptível de medição direta e útil naquelas inúmeras situações em que a chuva ou a irrigação assegura que a água do solo não é um fator limitante para a perda de água. PENMAN (1948) sugeriu que a taxa de evapotranspiração potencial deverá ser calculada a partir de uma superfície hipotética, definida como "uma extensa superfície de cultura verde, curta, que cobre completamente a superfície do solo, de altura uniforme e nunca carente de água." Infelizmente, segundo STANHILL (1973) essa definição faz o conceito de evapotranspiração potencial inaplicável na maioria das culturas e locais e, ademais, resulta quase impossível a verificação experimental de qualquer método para estimá-la.

No presente, existem numerosos métodos para se estimar  $ET_p$ . A grande dependência da  $ET_p$  do termo de radiação tem dado lugar a uma série de fórmulas empíricas baseadas em medições de radiação solar (MAKKINK, 1957). JENSEN e HAISÉ (1963) e Turc, citado por MILLAR (1973) derivaram equações que expressam o poder evaporante do ar como uma função dos parâmetros climáticos da radiação solar e temperatura média. Outros, como BLANEY e CRIDDLE (1950) e THORNTHWAITTE (1948) usam a temperatura média do ar para computar evapotranspiração potencial e real. HARGREAVES (1948) e Blaney e Morin, citados por MILLAR (1973) têm proposto fórmulas que combinam a temperatura e a umidade relativa. Segundo FUCHS (1973) não há uma relação direta entre evaporação e temperatura do ar, e a sua correlação positiva deve-se exclusivamente a que ambas dependem dos mesmos fatores climáti

cos. Porém, os métodos baseados na temperatura são amplamente usados, visto que este parâmetro meteorológico é o mais prontamente disponível. Uma outra série de fórmulas usa um termo aerodinâmico e coeficientes determinados empiricamente. Um exemplo de fórmulas baseadas num termo aerodinâmico é a tão conhecida e difundida fórmula de Penman (PENMAN, 1948). Para ser mais preciso, a equação de Penman combina os mecanismos aerodinâmicos de transferência de vapor com o balanço de energia. PRUIT (1960) e STANHILL (1961) afirmam que dentre todas as fórmulas conhecidas como empíricas, a equação de Penman é a mais precisa para a determinação da evaporação potencial.

Visto que a evapotranspiração potencial (ETp) e a evaporação (E) a partir de uma superfície de água livre, são governadas pelos mesmos fatores meteorológicos, é comum estimar a primeira a partir de dados de evaporação de tanques (Et) com correções empíricas, para levar em conta as características das culturas e o "status" de água do solo. A relação entre ETp e Et depende também do tamanho, forma e exposição do tanque (FUCHS, 1973). Numerosos estudos têm sido realizados para determinar a relação entre ETp e Et, conhecida também como coeficiente  $K_c$  (FRITSCHEN e SHAW, 1961; STANHILL, 1961). PENMAN (1948) encontrou, para pastagens, valores de  $K_c$  que variavam com a estação entre 0,6 e 0,8. STANHILL (1961) determinou, para alfafa,  $K_c$  mensais de 0,7 e  $K_c$  semanais de 0,75. Dados coletados por PRUIT (1964) indicam que o  $K_c$ , obtido através de 5 anos de estudos com pradaria, oscila em torno de 0,8. No caso de culturas anuais, e com fins de programação de regas, precisa-se conhecer o valor de  $K_c$  para cada período fenológico da cultura. CHANG (1968) fornece informação de  $K_c$  para várias culturas em diferentes períodos fenológicos. O valor de  $K_c$  é baixo durante os primeiros estágios de crescimento; logo, aumenta até floração e diminui, posteriormente, com a maturação da cultura. Com finalidades práticas, HANSEN (em 1963) tem proposto uma curva que relaciona o coeficiente de evaporação ( $ETp/Et = K_c$ ) com o crescimento e maturação relativa percentual da cultura.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Características Gerais da Área

Areia, localidade onde foi desenvolvido este trabalho, fica a  $6^{\circ}58'12''$  de latitude sul e a  $35^{\circ}42'15''$  de longitude oeste, com uma altitude de 534,86 m acima do nível do mar.

Segundo THORNTHWAITTE (1948) a classificação climática é B<sub>1r</sub> A'a' que corresponde a clima úmido com pouca deficiência de umidade, megatérmico, com pequena variação de temperatura. Na classificação de KOPPEN (1936) por outro lado, o clima de Areia enquadra-se na classe AS', isto é, tropical, semi-úmido, com estação chuvosa no período de outono-inverno.

A precipitação média anual é de 1.470,3 mm, da qual mais de 50% caem nos meses de março a agosto. O mês mais seco é novembro (23,4 mm) e o mais úmido é julho (253 mm). A temperatura média anual é de 23,24°C. Em geral, as variações nas temperaturas médias mensais são mínimas. O valor mais alto corresponde a fevereiro (24,68°C) e o mais baixo a julho (21,63°C). A umidade relativa do ar é alta ao longo de todo o ano, variando entre 75% no mês de novembro a 87% nos meses de junho e julho. A média é da ordem de 80%.

Os solos mais representativos da área correspondem à associação Podzólíco Vermelho Amarelo, equivalente eutrófico com A proeminente, textura argilosa, relevo fortemente ondulado e solos Latólicos eutróficos com A proeminente, textura média, fase pedregosa, floresta perenifólia e subperenifólia, relevo ondulado e montanhoso e substrato de granito e "gnaisse."

### Metodologia

Estimou-se evaporação potencial (ET<sub>p</sub>) mensal mediante o emprego das seguintes equações empíricas: Thornthwaite<sup>P</sup> (THORNTHWAITE, 1948); Blaney-Criddle (BLANEY e CRIDDLE, 1950); Blaney-Morin (MILLAR, 1973); Makkink (MAKKINK, 1957) Turc (MILLAR, 1973); Garcia-López (GARCIA e LOPEZ, 1970); Hargreaves (HARGREAVES, 1973); Jensen-Haise (JENSEN-HAISE, 1963) e Penman (PENMAN, 1948). A evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) de culturas em Areia foi estimada a partir de valores mensais de evaporação<sup>P</sup> de tanque classe A-USWB, multiplicados x 0,8 (E<sub>t</sub> x 0,8).

### Equações Testadas

#### THORTHWAITE

$$ET_p = 1,6 \left( \frac{10 T}{I} \right)^a \times f \quad (1)$$

ET<sub>p</sub> = Evapotranspiração potencial (cm/mês)

T = Temperatura média mensal do ar (°C)

I = Índice de calor anual = Σi, onde i (Índice de calor mensal) =  $\left( \frac{T}{5} \right) 1,514$

a = Função cúbica do índice de calor anual, dado por:

$$a = 0,675 \cdot 10^{-6} I^3 - 77,1 \cdot 10^{-6} I^2 + 0,01792 I + 0,43239$$

$$f = \frac{h}{12} \times \frac{n}{30}$$

h = Número de horas de luz na latitude considerada

n = Número de dias do mês.

#### BLANEY-CRIDDLE

$$ET_p = p (0,457 T + 8,13) \quad (2)$$

p = Percentagem de horas de luz do dia

T = Temperatura média mensal (°C)

## BLANEY-MORIN

$$ET_p = p (0,457 + 8,13) (1,14 - 0,01 UR) \quad (3)$$

$ET_p$ ,  $p$  e  $T$  têm idênticos significados aos da fórmula de Blaney-Criddle.

$UR$  = Umidade relativa média mensal (fracionário)

## MAKKINK

$$ET_p = 0,61 Q \frac{S}{s + \gamma} - 0,12 \quad (4)$$

$ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/dia)

$Q$  = Radiação solar (mm/dia)

$s$  = Pendente da curva pressão de vapor saturado versus temperatura (mb/°C)

$\gamma$  = Constante psicrométrica (mb/°C)

A radiação solar foi estimada mediante a seguinte relação:

$$Q = Q_A (0,18 + 0,55 \frac{n}{N})$$

$Q_A$  = Valor de Angot, ou radiação extra-terrestre

$n$  = Número atual de horas de sol

$N$  = Número de horas de luz do dia

## TURC

$$ET_p = \frac{0,013 T}{T + 15} (R_s + 50) \quad (5)$$

$ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/dia)

$R_s$  = Radiação solar (Langley/dia) expressa em mm/dia

$T$  = Temperatura média do ar (°C)

## GARCIA-LOPEZ

$$ET_p = 1,21 \cdot 10^N (1 - 0,01 UR) + 0,21 T - 2,30 \quad (6)$$

$ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/dia)

$$N = \frac{7,45 T}{284,7 + T}$$

$T$  = Temperatura média do ar (°C)

$UR$  = Umidade relativa (%)

## HARGREAVES

$$ET_p = 17,37 d T (1,0 - 0,01 hr) \quad (7)$$

- $ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/mês)  
 $d$  = Coeficiente mensal de duração do dia  
 $d$  = 0,12 p  
 $p$  = Coeficiente p de Blaney-Criddle  
 $T$  = Temperatura média mensal do ar ( $^{\circ}C$ )  
 $hr$  = Umidade relativa média mensal ao meio dia  
 $hr$  =  $0,158 (100 - UR)^{0,5}$   
 $UR$  = Umidade relativa (%)

JENSEN-HAISE

$$ET_p = (0,078 + 0,0252 T) R_s \quad (8)$$

- $ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/mês)  
 $T$  = Temperatura média mensal do ar ( $^{\circ}C$ )  
 $R_s$  = Radiação solar média mensal (mm/dia)

PENMAN

$$ET_p = \frac{\left(\frac{s}{\gamma}\right) R_s + E_a}{\left(\frac{s}{\gamma} + 1\right)} \quad (9)$$

- $ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/dia)  
 $s$  = Pendente da curva tensão de vapor saturado (mb) versus temperatura ( $^{\circ}C$ )  
 $\gamma$  = Constante psicrométrica (mb/ $^{\circ}C$ )  
 $R_n$  = Radiação líquida (mm/dia)  
 $E_a$  =  $0,35 (e_s - e_d) (0,5 + 0,0161 U_2)$   
 $e_s$  = Tensão de vapor média do ar saturado (mm Hg)  
 $e_d$  = Tensão de vapor média atual do ar (mm Hg)  
 $U_2$  = Velocidade média do vento (km/dia)

Como não se dispõe de informação direta de radiação líquida ( $R_n$ ) este parâmetro foi calculado de acordo com a seguinte relação:

$$R_n = R_r - R_e$$

$R_r$  = Radiação recebida (mm/dia)  
 $R_e$  = Radiação emitida (mm/dia)  
 $R_r = R_A (1 - r) \left(0,18 + 0,55 \frac{n}{N}\right)$

$$R_e = \gamma T^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{e_d}) (0,10 + 0,90 n/N)$$

$R_A$  = Valor de Angot (quantidade teórica de radiação que se receberia na superfície da terra, na ausência de atmosfera) (mm/dia)

$r$  = Albedo (varia de 0,05 para superfície de água livre, 0,10 para solo úmido, a 0,20 - 0,25 para vegetação verde).

$n/N$  = Relação horas de sol/horas de luz do dia (fracionário)

$T^4$  = Função do corpo preto.

Os dados de temperatura, umidade relativa, horas de luz do sol e velocidade do vento e evaporação do tanque classe AUSWB, foram obtidos na Estação Meteorológica da Escola de Agronomia da UFPb, em Areia, e correspondem a um período de 17 anos (1960-1976). A intensidade de radiação solar, duração máxima de insolação diária, percentagem de horas de luz e função do corpo preto foram tirados das tabelas de SHAW (1936), MILLAR (1973), ISRAELSEN e HANSEN (1962) e TANNER e ROBINSON (1959) respectivamente. Finalmente, os valores de Angot, tensão de vapor atual e saturado do ar, pendente da curva de tensão de vapor versus temperatura, e constante psicrométrica, obtiveram-se das tabelas de MILLAR (1973).

As relações entre as diferentes equações testadas e o método padrão ( $E_t \times 0,8$ ) foram obtidas a partir de correlações simples, coeficientes de determinação, regressões lineares e valores de qui-quadrado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 apresentam-se os valores de evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) e evaporação de tanque  $\times 0,8$  ( $Et \times 0,8$ ) para os diferentes meses do ano, obtidos a partir das equações empíricas utilizadas e do tanque classe A-USWB, respectivamente. Na Figura 1, por outro lado, mostra-se um gráfico relacionando os valores mensais de  $ET_p$  das diversas fórmulas, e de  $Et \times 0,8$ .

A análise dos dados do Quadro 1 e do gráfico da Figura 1, permite apreciar, em primeiro lugar, que existe uma grande variabilidade entre os valores de  $ET$  obtidos através das equações empíricas, tanto a nível mensal quanto anual. Logo, observa-se, também, que quando comparados com o padrão ( $Et \times 0,8$ ) eles se distribuem em três grupos bem diferenciados: a) aqueles que superestimam a  $ET$  (Hargreaves, Blaney-Criddle e Jensen-Haines); b) os que a subestimam (Blaney-Morin e Turc); e c) aqueles que estão em posição intermediária (Penman, Makkink, Thornthwaite e Garcia-López) assemelhando-se com os do método padrão.

A dispersão dos valores de  $ET_p$ , como também o seu grau de afastamento ou aproximação da curva padrão (Fig. 1) deve-se ao fato de que as equações foram desenvolvidas em regiões agroclimáticas diferentes, o que determinou, em cada caso, o uso daqueles fatores, ou combinação de fatores meteorológicos, que tinham uma maior influência na evapotranspiração potencial da localidade. Aliás, os coeficientes utilizados foram adaptados às condições agroclimáticas regionais. Assim, por exemplo, a equação de BLANEY e CRIDDLE (1950) foi desenvolvida para a parte árida do Oeste dos E.U.A., onde a temperatura é o fator meteorológico que influi mais diretamente na  $ET_p$ . Blaney e Norim, citados por MILLAR (1973) na

fórmula que leva seus nomes, adicionaram à equação de Blaney-Cridle um outro parâmetro climático, a umidade relativa, para salientar a influência desse fator em zonas mais úmidas. MAKKINK (1957) por outro lado, substituiu o termo aerodinâmico pelo fator 0,12. Sua equação dá bons resultados em zonas de climas frios e úmidos, como na Holanda - onde foi derivada - mas não é satisfatória em regiões áridas. JENSEN e HAISE (1936) desenvolveram uma equação semelhante à de MAKKINK (1957) embora incluindo a temperatura do ar em °C. Indiretamente, este fator introduz a contribuição do termo aerodinâmico para estimar ET. A equação foi derivada a partir de dados coletados em regiões áridas do oeste americano, pelo que dará bons resultados em zonas semelhantes. Finalmente, a equação de PENMAN (1948) combina os mecanismos aerodinâmicos de transferência de vapor com o balanço de energia. Noutras palavras, inclui todos os parâmetros que têm a ver com o processo evaporativo. Foi derivada na Inglaterra, isto é, numa região relativamente úmida, onde a divergência horizontal do calor é desprezível e existe uma boa cobertura vegetal e abundante precipitação. Daí, que não seja aconselhável sua aplicação em zonas secas, onde o calor advectivo é responsável por uma proporção importante da evapotranspiração atual.

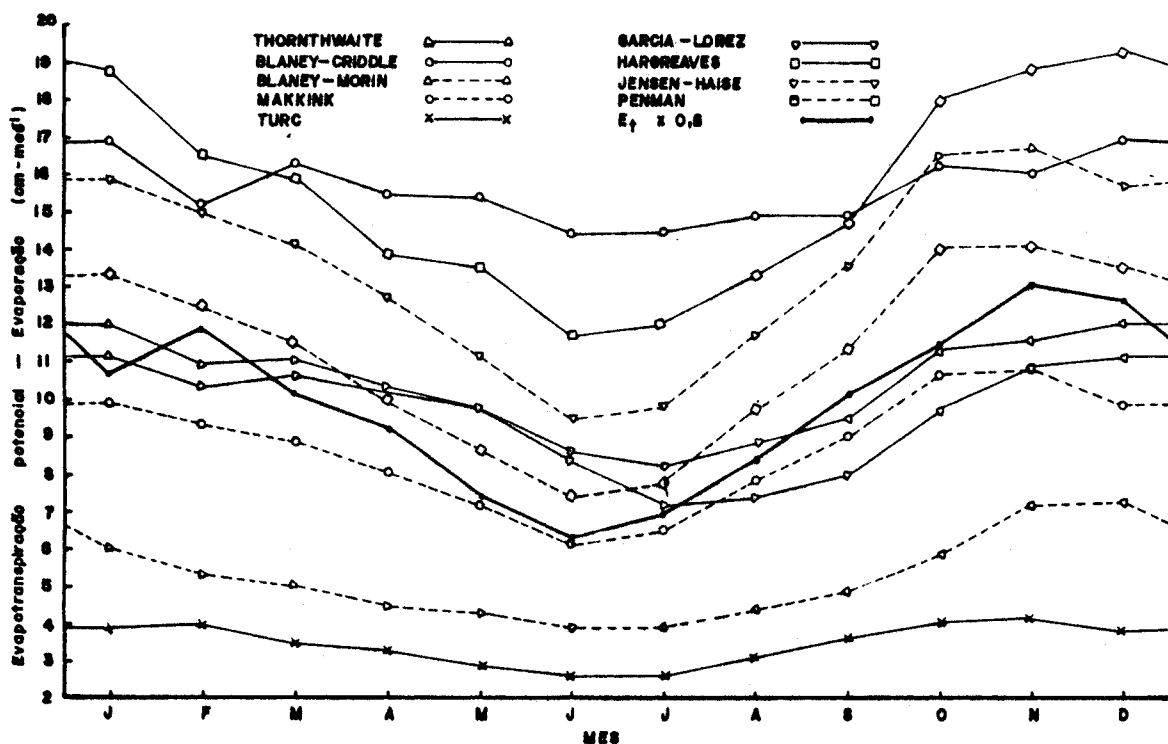


Fig. 1. Evapotranspiração potencial (ETp) calculada mediante equações empíricas e evaporação de tanque classe A - CWS x 0,8 (ET x 0,8), em mes<sup>1</sup> para os diferentes meses de ano em Arica - P.b.



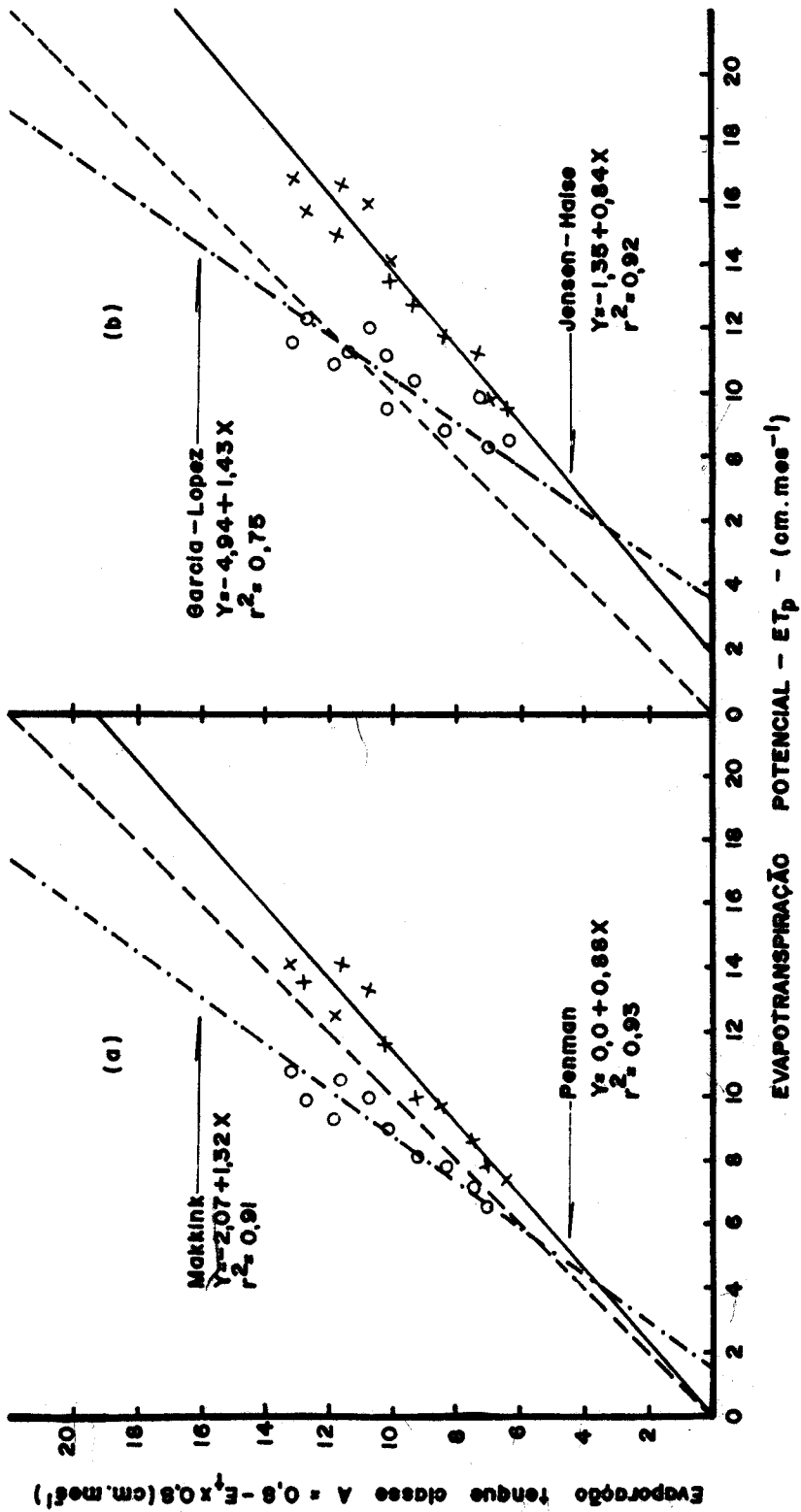


Fig. 2. Relação entre evaporação de tanque classe A x 0,8 e evapotranspiração potencial recalculada mediante equações de Makkink e Penman (a), e Garcia-López e Jensen-Haise (b).

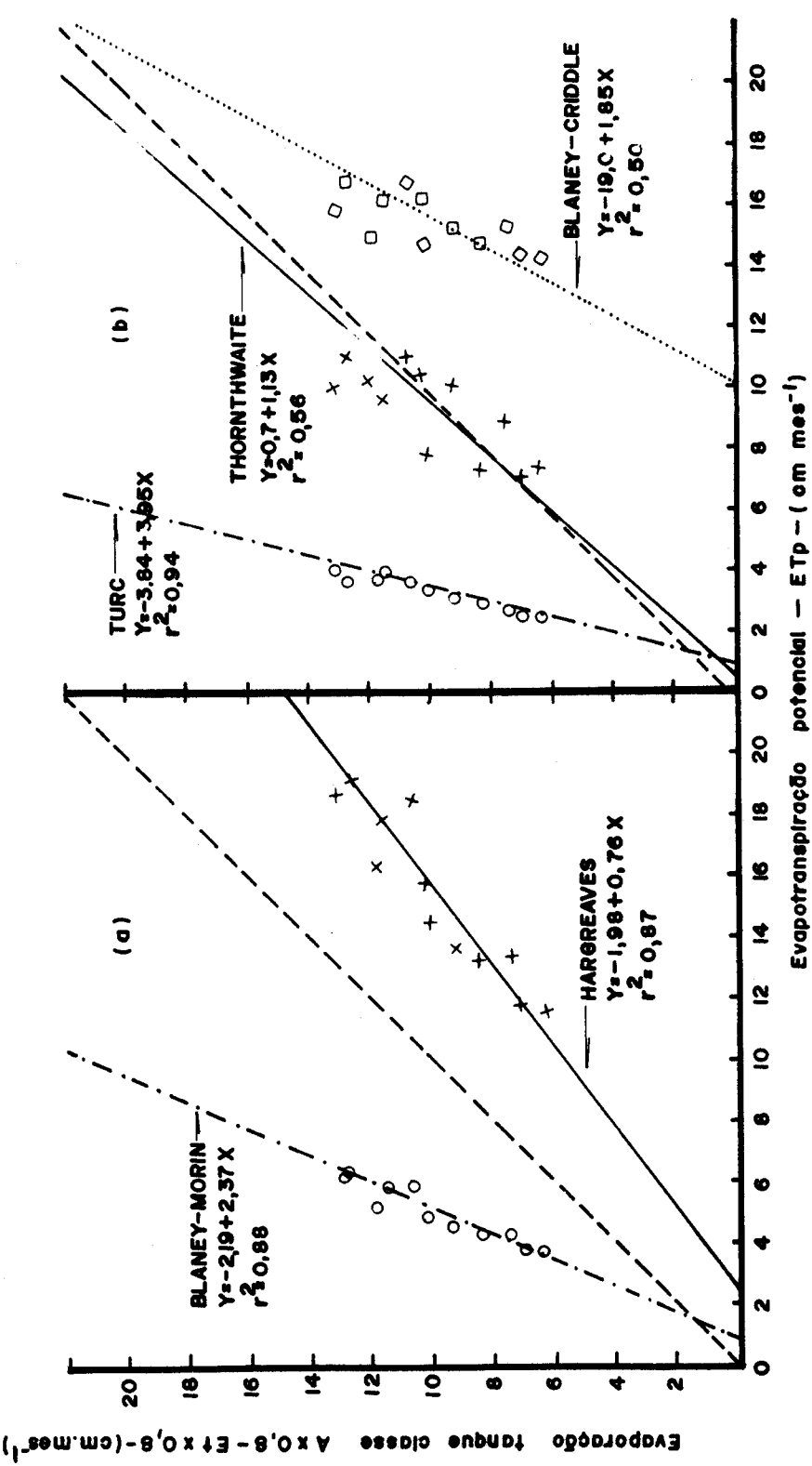


Fig. 3- Relações entre evaporação de tanque classe A x 0,8 e evapotranspiração potencial calculada mediante as equações de Blaney-Morin e Hargreaves (a) e Turc, Thornthwaite e Blaney-Criddle (b).

## QUADRO I

VALORES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E EVAPORAÇÃO x 0,8 EM  $\text{cm.MES}^{-1}$  CALCULADOS MEDIANTE EQUAÇÕES EMPÍRICAS E TANQUE CLASSE A, RESPECTIVAMENTE PARA OS DIFERENTES MESES DO ANO (MÉDIAS DO PERÍODO 1960 - 1976)

EQUAÇÕES	M E S												TOTAL $\text{cm ano}^{-1}$
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	$\text{cm mês}^{-1}$												
	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ETp)												
THORNTWHAITE .....	11,22	10,37	10,62	10,18	9,09	7,59	7,24	7,39	8,00	9,77	10,09	11,18	112,74
BLANEY-CRIDDLE ..	16,90	15,19	16,34	15,50	15,46	14,47	14,58	14,94	14,92	16,27	16,03	16,94	187,54
BLANEY-MORIN .....	6,01	5,30	5,06	4,54	4,37	3,91	3,94	4,46	4,89	5,98	6,27	6,35	61,08
MAKKINK .....	9,93	9,92	8,87	8,07	7,16	6,12	6,52	7,84	8,97	10,66	10,77	9,86	104,06
TURC .....	3,87	3,98	3,50	3,31	2,91	2,63	2,67	3,12	3,59	4,09	4,22	3,83	41,72
GARCIA-LOPEZ .....	12,01	10,93	11,07	10,29	9,80	8,55	8,24	8,78	9,45	11,32	11,55	12,09	124,08
HARGREAVES .....	18,75	16,52	15,89	13,86	13,59	11,67	12,03	13,36	14,69	18,03	18,85	19,34	186,58
JENSEN-HAISE .....	15,85	14,96	14,12	12,73	11,18	9,47	9,80	11,71	13,50	16,52	16,71	16,68	162,23
PENMAN .....	13,36	12,54	11,56	9,96	8,66	7,40	7,79	9,65	11,36	14,09	14,14	13,56	134,07
	EVAPORAÇÃO DE TANQUE (Et)												
TANQUE CLASSE A	10,71	11,87	10,17	9,26	7,44	6,36	6,99	8,38	10,13	11,53	13,10	12,72	118,66
Et x 0,8													

Com a finalidade de se conhecer a relação existente entre os parâmetros  $ET_p$  e  $E_t \times 0,8$ , calculou-se os correspondentes coeficientes de correlação ( $r$ ) de determinação ( $r^2$ ), as equações de regressão linear e os valores de qui-quadrado ( $X^2$ ) que se apresentam no Quadro 2.

No Quadro 2 observa-se que as correlações mais altas entre  $ET_p$  e  $E_t \times 0,8$  correspondem às fórmulas de Turc (0,97), Fenman e Jensen-Haise (0,96), Mäkking (0,95), Blaney-Morin (0,94) e Hargreaves (0,93). Isto está assinalando que existe um alto grau de associação entre evaporação potencial ( $ET_p$ ) calculada mediante essas fórmulas, e evaporação  $\times 0,8$ , estimada a partir de medições do tanque classe A. Porém, os coeficientes de correlação encontrados só estão indicando uma alta relação mútua entre ambas as variáveis e não o seu grau de aproximação ou de desvio da evapotranspiração potencial de culturas. Com efeito, se nos basearmos exclusivamente neste critério, teremos que escolher a equação de Turc como sendo a que faz a melhor estimativa dos valores do  $E_t \times 0,8$ , em circunstância que é, justamente, a que subestima, em maior grau, a evapotranspiração potencial em Areia. Idênticas considerações poderiam ser feitas para outras fórmulas, como as de Jensen-Haise e Hargreaves que, pelo contrário, superestimam muito os valores de  $E_t \times 0,8$ .

#### QUADRO 2

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO E DETERMINAÇÃO, EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E VALORES DE QUI-QUADRADO, CALCULADOS ENTRE EVAPORAÇÃO DE TANQUE  $\times 0,8$  E AS DIFERENTES EQUAÇÕES TESTADAS

MÉTODO	$r$	$r^2$	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	$X^2$
THORNTHAWAITE ...	0,75	0,56	$Y = - 0,70 + 1,13 X$	2,98
BLANEY-CRIDDLE ...	0,71	0,50	$Y = - 19,00 + 1,85 X$	27,88
BLANEY-MORIN ....	0,94	0,88	$Y = - 2,19 + 2,37 X$	12,00
MAKKINK .....	0,95	0,91	$Y = - 2,07 + 1,38 X$	2,46
GARCIA-LÓPEZ .....	0,87	0,75	$Y = - 4,94 + 1,43 X$	2,03
HARGREAVES .....	0,93	0,87	$Y = - 1,98 + 0,76 X$	27,32
JENSEN-HAISE .....	0,96	0,92	$Y = - 1,53 + 0,84 X$	12,07
TURC .....	0,97	0,94	$Y = - 3,84 + 3,95 X$	144,11
PENMAN .....	0,96	0,93	$Y = - 0,00 + 0,88 X$	2,68

Visto que os valores do coeficiente de correlação de per si não permitem encontrar a fórmula que forneça valores mais próximas à realidade, dever-se-á procurá-la analisando-se as equações de regressão e seus respectivos coeficientes de determinação. Devido o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) ser o quadrado do coeficiente de correlação, os maiores valores correspondem também às equações que apresentaram os mais altos coeficientes de correlação.

Uma análise das equações de regressão linear obtidas entre  $ET_p$ , das dife

rentes fórmulas empíricas, e  $E_t \times 0,8$  e seus correspondentes valores de  $r^2$ , poderá fornecer informações valiosas tendentes a determinar quais são as equações que se aproximam mais à evaporação do tanque classe A multiplicada pelo fator 0,8 ( $E_t \times 0,8$ ).

Numa equação linear ( $Y = a + b X$ ) quando  $X = 0$ ,  $Y = a$ ; assim,  $a$  é o ponto onde a linha cruza o eixo  $Y$ . Noutras palavras,  $a$  é a interseção. Quando  $a = 0$  a linha passa através da origem. Por outro lado, quando  $b$ , o coeficiente angular ou coeficiente de regressão, é igual à unidade ( $b=1$ ) e  $a=0$ , então  $Y = X$ . O exposto assinala que à medida que os valores de  $a$  e  $b$  tendem a 0 e 1, respectivamente, os valores de  $Y$  e de  $X$  tendem, conseqüentemente, a se igualar.

Nas Figuras 2 e 3 apresentam as relações entre os valores de  $ET_p$ , calculados mediante as nove equações, e  $E_t \times 0,8$ , obtidos a partir da evaporação de tanque classe A. Nelas se aprecia, tal como foi expresso, que a reta cuja equação de regressão linear se aproxima mais a  $Y = 0 + X$ , ou seja, àquela com valores dos parâmetros lineares e angulares iguais a 0 e 1, respectivamente, é a correspondente à fórmula de Penman. Logo depois vêm as de Thornthwaite > Jensen-Haise > Hargreaves > Makkink > Blaney-Morin > Garcia-López > Turc > Blaneu-Cridle.

O anterior, porém, não está assinalando uma ordem decrescente na estimação de evapotranspiração potencial de culturas. Com efeito, em virtude de que os valores de  $E_t \times 0,8$  se concentram numa faixa compreendida entre 6,36 e 13,10  $\text{cm mês}^{-1}$ , com limitadas possibilidades de variar ao longo do tempo, há fórmulas, como as de Makkink e Garcia-López, que constituem bem melhores estimativas de  $ET_p$  de culturas em Areia que as outras (Jensen-Haise e Hargreaves) que apresentam valores de  $a$  e  $b$  mais próximos a zero e um, respectivamente. (Ver Figuras 2 e 3).

A esta altura, a análise dos valores de  $X^2$  (Quadro 2) poderá fornecer maiores informações tendentes a selecionar aquelas equações que melhor representam a  $ET_p$  de culturas ( $E_t \times 0,8$ ) em Areia. Na utilização deste critério, usou-se uma probabilidade de 95%; isto é, qualquer valor calculado de  $X^2$  acima de 4,57 (valor de  $X^2$  com 95% de probabilidade) é significativo e, portanto, a sua fórmula não apresentaria condições para estimar  $E_t \times 0,8$ . Ao contrário, as equações que exibem valores de  $X^2$  iguais ou inferiores a 4,57, considerar-se-iam adequadas para essa finalidade. Desse ponto de vista, as fórmulas empíricas que estimam com maior fidelidade  $ET_p$  de culturas em Areia são: Garcia-López > Makkink > Penman > Thornthwaite.

Finalmente, uma análise global de todos os parâmetros estatísticos utilizados neste estudo, além dos aspectos práticos envolvidos na aplicação das diferentes fórmulas empíricas (simplicidade e disponibilidade de dados climáticos) permite concluir que as fórmulas que fazem melhores estimativas da  $E_t \times 0,8$  nesta localidade são Makkink > Penman e Garcia-López > Thornthwaite.

Em geral, os resultados encontrados estão de acordo com o esperado. Com efeito, três das fórmulas que melhor se comportam (Penman, Makkink e Garcia-López) foram desenvolvidas em regiões semelhantes, em certos aspectos, à zona do Brejo Paraibano. Assim, as equações de Penman e Makkink, derivadas na Inglaterra e na Holanda, respectivamente, constituem boas estimativas de evapotranspiração potencial de culturas sob condições de baixa radiação solar, alta umidade relativa e abundante precipitação. A equação de Garcia-López foi formulada na Venezuela para uma região tropical úmida. Segundo FUCHS (1973) a equação de Thorn

thwaite comumente subestima a evapotranspiração potencial medida em zonas áridas o que viria significar que é mais adequada para regiões de climas mais moderados. Infelizmente, apresentou um dos menores coeficientes de determinação ( $r^2 = 0,56$ ) que, ainda que seja significativa a 1%, limita um tanto sua aplicação.

Uma outra série de fórmulas empíricas, como as de Turc, Jensen-Haise, Blaney-Morin e Hargreaves, que mostraram altos coeficientes de correlação e de determinação, embora com valores de  $X^2$  altamente significativos, apresentam muito poucas condições para seu uso em Areia, a menos que se lhes introduzam profundas modificações para corrigir seus marcantes desvios do método padrão.

Por último, a equação de Blaney-Criddle, derivada numa região árida do oeste dos EE.UU., foi a que forneceu os menores coeficientes de correlação ( $r = 0,71$ ) e de determinação ( $r^2 = 0,50$ ) e um dos mais altos valores de  $X^2$  (27,88). Por isso, e por superestimar em alto grau  $E_t \times 0,8$ , não se recomenda sua aplicação em Areia e em nenhuma outra região de clima úmido ou temperado.

### CONCLUSÕES

Os resultados de  $ET_p$ , através das diferentes equações, e a sua comparação com  $ET_p$  de culturas, estimada a partir de medições do tanque classe A-USWB, bem como as análises estatísticas realizadas, indicaram que a equação de Makkink constituiu a melhor estimativa da evapotranspiração potencial de culturas na localidade de Areia. As equações de Penman, Garcia-López e Thornthwaite mostraram também muita semelhança com o método padrão o que faria aconselhável sua aplicação na localidade.

Outras fórmulas empíricas, como as de Turc, Jensen-Haise, Blaney-Morin e Hargreaves, apresentam muito poucas condições para seu uso em Areia, a menos que se lhes introduzam drásticas modificações tendentes a corrigir seus marcantes desvios do método padrão. Finalmente, não é recomendável o uso em Areia da equação de Blaney-Criddle, tanto em razão de seus baixos coeficientes de correlação e de determinação, quanto por que superestima muito a  $ET_p$  de culturas na região.

BLANEY, H.F. & CRIDDLE, W.D. Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conserv. Serv. TP-96, 1950 48 p.

CHANG, JEN-HU. Climate and agriculture; an ecological survey. Chicago, Aldine Publishing, 1968.

FUCHS, M. The estimation of evapotranspiration. In: Arid zone irrigation. (Ed.) YARON, B.; DANFORS, E.; VAADIA, Y. Springer-Verlag-New York - Heidelberg - Berlin. (Ecological Studies 5), 1973. p. 241-247.

GARCIA, B.J. & LOPEZ, D. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico ( $15^{\circ}N - 15^{\circ}S$ ). Agronomía Tropical, 20 (5):335-345, 1970.

HANSEN, V.E. A unique consumptive use curve related to irrigation practice. J.

Irrigation and Drainage Division Proc. of the Amer. Soc. of Civ. Eng., 89(1): 43-50, 1963.

HARGREAVES, G.H. Estimation of potencial and crops evapotranspiration. Transactions of the ASAE, 17 (4): 701-704, 1974.

ISRAELSEN, ORSON. W. & HANSEN, V.E. Irrigation principles and practices. 3 ed: New York - London, John Wiley and Sons, 1962. 447 p.

JENSEN, M.E. & HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Amer. Soc. Civ. Eng. Proc., (89): 15 - 41, 1963.

KOPPEN, W. Das geographische system der klimate. In: KOPPEN, W. & GEIGER, R. (ed.) Handbuch der klimatologie, Vol. I, parte C. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1936.

MAKKINK, G.F. Ekzameno de la fórmula de Penman. Neth. J. Agr. Sci. (5):290-305 1957.

MILLAR, A.A. Fórmula empírica para determinar evapotranspiração. Petrolina, II CA-FAO, 1973. 22p.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Roy. Soc London, Proc. Série A. 193. 120-146, 1948.

PRUIT, W.O. Relation of consumptive use of water to climate. Trans. Amer. Soc. Agr. Eng., 3(1): 9-13, 1960.

PRUIT, W.O. Evapotranspiration. A guide to irrigation. Califórnia Turfgrass Culture. 14(4): 27-32, 1964.

SHAW, N. Manual of Meteorology. Vol. II. Comparative Meteorology. 2<sup>a</sup> Ed., Cambridge University Press, 1936, pp. 4-5.

STANHILL, G.A. Evaporation, transpiration: A case for Ockham's Razor. In: HADAS, A. SWARTZENDRUBER, D. RIJTEMA, P.E. FUCHS, M. YARON, B. Physical aspects of soil water and salts in ecosystems. Springer-Verlag-Berlin-Heidelberg-New York, 1973. Cap. II, p. 207-220. (Ecological Studies 4).

STANHILL, G.A. A comparison of methods of calculating potencial evapotranspiration from climatic data. Israel J. Agric. Res., (11): 159-171, 1961.

TANNER, C.B. & ROBINSON, S.M. Blackbody function. Mad., Wis. Dept. Soils, Univ. of Wfs. Soil Bulletin, 1959, 45 p.

THORTHWAITE, C.W. An approach toward a regional classification of climate. Geog Rev., (38): 55-94, 1948.

THORTHWAITE, C.W. & WILM, H.C. Report of the committee on transpiration and evaporation, 1943-1944. J. Geophys Res. (5): 687, 1944.