

## Considerações sobre os métodos da determinação da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real no município de Olinda, PE

José Antonio Teixeira (\*)

### RESUMO

O objetivo deste artigo é a avaliação criteriosa da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real de uma área, tomando como exemplo típico o município de Olinda.

Os valores encontrados para a evapotranspiração real do município variaram de acordo com os métodos empregados para obtenção da evapotranspiração potencial. Assim, para a seleção do método que melhor represente o processo de evapotranspiração da área, foi efetuada uma análise estatística de regressão linear simples entre os valores da evapotranspiração real calculada e os da insolação medida, uma vez que a insolação é dentre os elementos climatológicos da área, o que mais influencia no processo da evapotranspiração.

Da referida análise pôde-se concluir que os valores da evapotranspiração real calculada pelo método de Thornthwaite & Mather, mediante a utilização dos valores de evapotranspiração potencial obtidos pelo método de Penman, são os que representam melhor a evapotranspiração real da área.

### 1. INTRODUÇÃO

As dificuldades pelas quais muitos pesquisadores têm passado na tentativa da medição da evaporação e da transpiração, em separado, forçam-nos a introduzir o conceito de evapotranspiração.

Para conceituar-se a evapotranspiração, considere-se uma área coberta por vegetação e em equilíbrio hídrico de tal modo que não haja perdas por escoamento superficial nem subsuperficial. Neste caso, pode-se dizer que as perdas normais de água desta área consistem, essencialmente, na evaporação e na transpiração das plantas que a encobrem. Considere-se, também, que as recargas sejam feitas diretamente a partir das precipitações pluviométricas ou, indiretamente, a partir de irrigação.

Em condições naturais, a evapotranspiração não é um fenômeno distinto

da evaporação e da transpiração, mas, sim, a soma dos dois processos que se efetuam simultânea e independentemente. Portanto, todos os fatores que influenciam na evaporação e na transpiração influenciam, do mesmo modo, na evapotranspiração.

A evapotranspiração depende de vários fatores, como, por exemplo: a espécie e o desenvolvimento vegetal, o tipo de folhagem e a profundidade radicular das plantas e, sobretudo, o teor de umidade do solo, que são muito difíceis de serem medidos, motivo pelo qual introduziu-se o conceito de evapotranspiração potencial.

Porém, o que mais interessa ao balanço hídrico é a avaliação da evapotranspiração real.

Neste trabalho, foram aplicados os métodos convencionais utilizados para a determinação da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real, independentemente da representatividade dos fatores que caracterizam cada método, para, então, correlacionar os resultados obtidos com os valores da variável que mais influencia no processo, que é a insolação. Assim, foram selecionados os métodos mais promissores para a avaliação da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real da área.

### 2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

A evapotranspiração potencial, ETp, indica a quantidade de água que pode ser perdida pela evaporação do solo e pela transpiração das plantas que o encobrem. Ela só ocorre se houver um adequado suprimento de umidade no solo para a alimentação das plantas e se houver condições de evaporação à superfície do solo. Trata-se, portanto, da vaporização da água ocasionada pela energia solar. Assim, quando o suprimento de água for assegurado, quer por precipitação pluviométrica, quer por irrigação, quer por ambas, a evapotranspiração assume seu valor máximo, sendo, por esta razão, denominada de evapotranspiração potencial, ETp.

Para a avaliação da ETp vêm sendo empregados medidas diretas, métodos teóricos, semi-empíricos e empíricos.

As medidas diretas estão ligadas ao caráter climatológico do processo e, portanto, são as mais válidas.

As medidas diretas podem ser obtidas, com pouco dispêndio de recursos financeiros, através de dispositivos denominados evapotransporímetros, dos quais o mais conhecido é o de Thornthwaite.

A aplicação do método evapotransporimétrico tem sido ignorada em quase todo território nacional. Tem-se notícia de que, apenas nas regiões Sul e Centro-Sul, foram instalados alguns evapotransporímetros e efetuadas algumas medições localizadas e em períodos curtos. Assim, de 1960 a 1962, foram efetuadas medições em Pelotas, no Estado do Rio Grande do Sul (Mota & Beirsdorf, 1976); de 1953 a 1955, em Pindamonhangaba, Ribeirão Preto e Campinas, no Estado de São Paulo (Camargo, 1966); de março a abril de 1972, em Jaboticabal, também no Estado de São Paulo (Marques, 1972). Portanto, os resultados obtidos são de confiabilidade relativa.

Os métodos teóricos são bastante sofisticados e de difícil aplicação (Custódio & Llamas, 1976).

Os métodos semi-empíricos são empregados com a finalidade de ser evitado o uso de dados difíceis de serem obtidos através dos métodos teóricos. Muito embora, a exatidão dos resultados possa, de certo modo, ser prejudicada, a aplicação desses métodos vem sendo amplamente adotada. De todos eles o de Penman é o mais difundido, sendo recomendado por um grupo de trabalho da FAO & laea (1966, in Villa Nova et alii, 1968).

#### 2.1 — O método semi-empírico de Penman

O método de Penman combina os efeitos do balanço energético e aerodinâmico. A fórmula geral é:

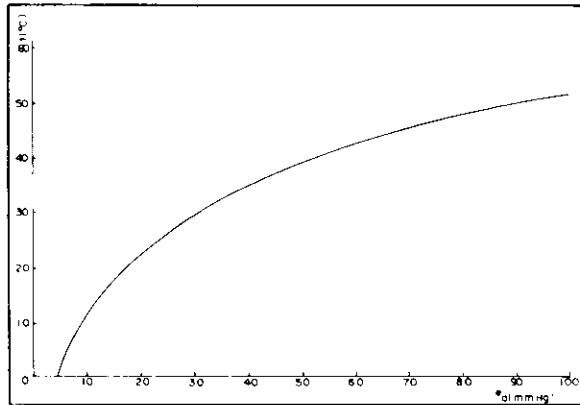
$$E = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

onde:

E = evaporação diária (mm)  
 $\Delta$  = inclinação da curva de pressão de saturação do vapor para a tem-

(\*) Professor de Mecânica dos Fluidos e Hidrogeologia da Unesp - "Campus" de Rio Claro. Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Figura 1 — Pressão de saturação do vapor em função da temperatura



Fonte: Custodio & Llamas (1976)

Tabela 1 — Calor de vaporização,  $C_1$ , necessário para evaporar 1 mm .  $cm^2$  de água segundo a temperatura,  $t$  ( $^{\circ}C$ ), do ar

t	$C_1$	t	$C_1$	t	$C_1$	t	$C_1$	t	$C_1$	t	$C_1$
0	59,6	5	59,3	10	59,0	15	58,8	20	58,5	25	58,2
1	59,6	6	59,3	11	59,0	16	58,7	21	58,5	27	58,2
2	59,5	7	59,2	12	58,9	17	58,7	22	58,4	28	58,1
3	59,5	8	59,1	13	58,9	18	58,6	23	58,3	29	58,1
4	59,4	9	59,1	14	58,8	19	58,6	24	58,3	30	58,0

Fonte: Custodio & Llamas (1976)

Tabela 2 — Intensidade da radiação solar,  $R$ , ( $cal/cm^2$  . dia), que atingiria o solo na ausência da atmosfera, no 15.º dia de cada mês, entre as latitudes de  $0^{\circ}$  (Equador) e  $30^{\circ}S$ , utilizada nos cálculos da evapotranspiração potencial (método de Turc e de Penman)

Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
$0^{\circ}$	858	888	890	862	816	790	804	833	875	880	860	842
$*8^{\circ}S$	886	889	876	828	766	737	759	810	872	893	892	881
$10^{\circ}S$	893	889	872	820	754	724	748	804	871	896	900	891
$20^{\circ}S$	986	937	845	726	616	751	597	691	808	905	971	992
$30^{\circ}S$	1009	923	783	629	495	439	473	586	734	860	987	1031

\* Latitude de Olinda (valores de  $R_A$  interpolados)

Fonte: SUDENE, 1972

Tabela 3 — Duração máxima da insolação,  $N$  (horas/dia), nos vários meses do ano, no 15.º dia de cada mês, entre as latitudes de  $6^{\circ}S$  e  $30^{\circ}S$ , utilizados nos cálculos da evapotranspiração potencial,  $ET$ , (métodos de Thornthwaite, Turc e Penman) de Olinda, PE

Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
$6^{\circ}S$	12,4	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,8	11,9	12,1	12,2	12,4	12,5
$*8^{\circ}S$	12,5	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
$10^{\circ}S$	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
$20^{\circ}S$	13,2	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,3
$30^{\circ}S$	13,9	13,1	12,3	11,4	10,3	10,2	10,4	11,0	11,9	12,6	13,6	14,1

\* Latitude de Olinda

Fonte: CAMARGO, 1964

peratura do ar ( $mm\ Hg/^{\circ}C$ ) (Figura 1)

$R$  = radiação líquida de água que pode evaporar em um dia ( $mm/dia$ )

$E$  = poder evaporante do ar à sombra ( $mm/dia$ )

$\gamma$  = constante psicrométrica ( $mm\ Hg/^{\circ}C$ ) que oscila em torno de 0,5  $mm\ Hg/^{\circ}C$  (Villela & Mattos, 1975).

No caso tomou-se  $\gamma = 0,485\ mm\ Hg/^{\circ}C$

Por sua vez:

$$R = \frac{R(1-r) - R_s}{C_1} = \frac{R}{C_1}$$

sendo:

$$R = R \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

onde:

$R$  = radiação líquida ( $cal/cm^2$  . dia).

$C_1$  = calor de vaporização necessário para evaporar 1  $mm$  de água por cada  $cm^2$  de superfície ( $cal/mm . cm^2$ ) (Tabela 1).

$R_s$  = radiação global incidente ( $cal/cm^2$  . dia)

$R$  = intensidade da radiação global que atingiria o solo, supondo-se que a atmosfera não existisse ( $cal/cm^2$  . dia).

O valor de  $R$ , que é uma grandeza astronômica, só depende da latitude do lugar e do mês considerado (Tabela 2).

$a = 0,24$  e  $b = 0,58$  (valores obtidos para o Estado de São Paulo). Os valores de Penman aplicados à Inglaterra aparecem em sua fórmula como sendo  $a = 0,18$  e  $b = 0,55$  (apud Villela & Mattos, 1975).

Então, na inexistência de valores para os coeficientes  $a$  e  $b$  para a região que contém a área em estudo, é razoável a adoção da equação (3) da maneira pela qual ela se aplica ao Estado de São Paulo, isto é:

$$R = R \left( 0,24 + 0,58 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

onde:

$n$  = insolação real (horas/dia)

$N$  = duração máxima da insolação nos vários meses do ano (horas/dia). É a duração astronômica do dia, que, também, só depende da latitude e do mês considerado (Tabela 3).

$r$  = albedo (relação entre a radiação incidente de onda curta e a radiação refletida, também, de

onda curta. Segundo Villa Nova et alii (1968),  $r = 0,15$  para superfícies evaporantes com vegetação verde. Este foi o valor adotado para o caso do município de Olinda.

$$R_r = 1440 \sigma (T_a)^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{e_a})$$

$$\left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N}\right) \quad (5)$$

onde:

$R_r$  = radiação refletida, de onda longa (cal/cm<sup>2</sup> . dia).

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman =  $0,826 \times 10^{-10}$  cal/cm<sup>2</sup> . min. °K<sup>4</sup>

$T_a$  = temperatura do ar em graus Kelvin ou absolutos (°K)

$$e_a = e_s \cdot \frac{Hr}{100} \quad (6)$$

onde:

$e_s$  = pressão de vapor do ar (mm Hg)

$e_s$  = pressão de saturação do vapor à temperatura do ar (Tabela 4)

$Hr$  = umidade relativa (%)

$$E = (e_s - e_a) 0,35 (0,5 + 0,54 V_2) \quad (7)$$

onde:

$E$  = já definido, anteriormente

$V_2$  = velocidade do vento (m/s), a 2 m da superfície evaporante (Tabela 5).

O método de Penman é considerado semi-empírico porque usa a equação (1) multiplicada por um fator de redução, para obter-se a evapotranspiração potencial, ETp. No entanto, se em (2) usa-se o albedo,  $r$ , adequado para a superfície evaporante, não será preciso o fator de redução.

Os dados reais necessários ao emprego do método semi-empírico de Penman constam da Tabela 6.

Para aplicação da equação (1) é conveniente escrevê-la sob a forma:

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} R_n + E}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (8)$$

Tabela 4 — Pressão de saturação do vapor,  $e_s$  (mm Hg), à temperatura,  $t$  (°C), do ar

t	e <sub>a</sub>	t	e <sub>a</sub>	t	e <sub>a</sub>	t	e <sub>a</sub>	t	e <sub>a</sub>	t	e <sub>a</sub>
0,0	4,6	5,0	6,5	10,0	9,2	15,0	12,8	20,0	17,5	25,0	23,8
0,5	4,8	5,5	6,8	10,5	9,5	15,5	13,2	20,5	18,1	25,5	24,5
1,0	4,9	6,0	7,0	11,0	9,8	16,0	13,6	21,0	18,7	26,0	25,3
1,5	5,1	6,5	7,3	11,5	10,2	16,5	14,1	21,5	19,2	26,5	26,0
2,0	5,3	7,0	7,5	12,0	10,5	17,0	14,5	22,0	19,8	27,0	26,7
2,5	5,5	7,5	7,8	12,5	10,9	17,5	15,0	22,5	20,4	27,5	27,5
3,0	5,7	8,0	8,0	13,0	11,2	18,0	15,5	23,0	21,1	28,0	28,3
3,5	5,9	8,5	8,3	13,5	11,6	18,5	16,0	23,5	21,7	28,5	29,2
4,0	6,1	9,0	8,6	14,0	12,0	19,0	16,5	24,0	22,4	29,0	30,0
4,5	6,3	9,5	8,9	14,5	12,4	19,5	17,0	24,5	23,0	30,0	31,8

Fonte: Custodio & Llamas (1976)

Tabela 5 — Dados climatológicos médios mensais e anuais de Olinda, observados no período de 1943 a 1965. Estação: Olinda, PE, Latitude: 08° 01' S, Longitude: 34° 51' W, Altitude: 55 m

Ident.	PA	t	nb	n	Hr	P	E	v <sub>2</sub>
MÊS	PRESSÃO (mb)	TEMPERATURA (°C)	NEBULOSIDADE (0 a 10)	INSOLAÇÃO (h)	UMIDADE RELATIVA (%)	PRECIPITAÇÃO (mm)	EVAPORAÇÃO (mm)	VENTO (m/s)
JAN	1006,8	27,0	5,7	281,2	75,2	73,3	99,1	2,6
FEV	1005,5	27,2	5,8	250,0	75,8	61,1	87,3	2,5
MAR	1005,4	27,0	6,4	223,4	78,5	186,0	78,5	2,3
ABR	1005,6	26,2	6,7	194,3	81,3	208,4	70,5	2,4
MAI	1006,9	25,4	6,8	202,4	82,6	270,8	61,6	2,9
JUN	1008,4	24,6	6,7	184,2	82,5	261,9	59,5	2,9
JUL	1009,5	24,0	6,5	206,1	81,0	224,3	68,7	3,5
AGO	1009,7	24,0	6,5	216,1	79,5	151,1	73,1	3,3
SET	1009,0	24,9	5,6	230,0	77,4	69,6	83,2	3,2
OUT	1007,8	25,9	5,4	282,7	75,2	38,1	96,8	3,0
NOV	1006,0	26,5	5,5	284,5	75,1	39,7	94,2	2,5
DEZ	1005,6	26,8	5,6	289,1	74,5	50,6	95,0	2,5
ANO	1007,2	25,8	6,1	2844,0	78,2	1634,9	967,5	2,8

Tabela 6 — Dados reais necessários à determinação da evapotranspiração potencial, ETp, (método de Penman), de Olinda: n = insolação, t = temperatura, v<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 m de altura sobre a superfície evaporante, Hr = umidade relativa

Dados	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
n	horas/dia	9,07	8,93	7,21	6,48	6,53	6,14	6,64	6,97	7,67	9,12	9,48	9,32
t	°C	27,0	27,2	27,0	26,2	25,4	24,6	24,0	24,0	24,9	25,9	26,5	26,8
v <sub>2</sub>	m/s	2,6	2,5	2,3	2,4	2,9	2,9	3,5	3,3	3,2	3,0	2,5	2,5
Hr	%	75,2	75,8	78,5	81,3	82,6	82,5	81,0	79,5	77,4	75,2	75,1	74,5

onde:

$\frac{\Delta}{\gamma}$  é encontrado em função da temperatura (Tabela 7).

Então, como foi considerado o albedo  $r = 0,15$ , por tratar-se de região de vegetação verde, não foi levado em conta o fator de redução. Assim, a evapotranspiração potencial, ETp (mm), mensal [método semi-empírico de Penman] será:

$$ETp = d \times E \quad (9)$$

onde:

$d$  = número de dias de cada mês.

O cálculo da evapotranspiração potencial, ETp, por este método, para o município de Olinda, seguiu o roteiro apresentado na Tabela 8.

## 2.2 — Os métodos empíricos

Os métodos empíricos têm a vantagem de serem econômicos, pois, de um modo geral, baseiam-se em dados obtidos através de observações registradas em estações climatológicas.

As fórmulas empíricas mais usuais

são as de Blaney & Criddle, Thornthwaite, Turc e Hargreaves.

A fórmula de Blaney & Criddle tem o inconveniente de levar em conta o tipo de cultivo. Sua aplicação deve ser baseada em experiência de irrigação. Analiticamente, sua expressão é a seguinte:

$$ETp = kp \frac{45.7t + 813}{100} \quad (10)$$

onde:

ETp = evapotranspiração potencial mensal (mm)

k = coeficiente empírico mensal, que varia segundo o tipo de cultura

p = porcentagem de horas diurnas do mês, sobre o total de horas diurnas do ano

t = temperatura média mensal (°C)

Tabela 7 — Relação  $\Delta/\gamma$  (adimensional) em função da temperatura, t (°C), do ar, onde:  $\Delta$  = inclinação da curva de pressão de saturação do vapor para a temperatura t (°C) do ar e  $\gamma$  = constante psicometria (mm Hg/°C).

t	$\Delta/\gamma$	t	$\Delta/\gamma$	t	$\Delta/\gamma$	t	$\Delta/\gamma$	t	$\Delta/\gamma$	t	$\Delta/\gamma$
0,0	0,67	5,0	0,92	10,0	1,23	15,0	1,64	20,0	2,14	25,0	2,78
0,5	0,69	5,5	0,94	10,5	1,27	15,5	1,68	20,5	2,20	25,5	2,85
1,0	0,72	6,0	0,97	11,0	1,30	16,0	1,73	21,0	2,26	26,0	2,92
1,5	0,74	6,5	1,00	11,5	1,34	16,5	1,78	21,5	2,32	26,5	3,00
2,0	0,76	7,0	1,03	12,0	1,38	17,0	1,82	22,0	2,38	27,0	3,08
2,5	0,79	7,5	1,06	12,5	1,42	17,5	1,88	22,5	2,45	27,5	3,15
3,0	0,81	8,0	1,10	13,0	1,46	18,0	1,93	23,0	2,51	28,0	3,23
3,5	0,84	8,5	1,13	13,5	1,50	18,5	1,98	23,5	2,58	28,5	3,31
4,0	0,86	9,0	1,16	14,0	1,55	19,0	2,03	24,0	2,64	29,0	3,40
4,5	0,89	9,5	1,20	14,5	1,59	19,5	2,09	24,5	2,71	30,0	3,57

Fonte: CUSTODIO & LLAMAS (1976)

Tabela 8 — Determinação da evapotranspiração potencial (ETp mensal de Olinda (método de Penman), no período de 1943 a 1965. Variáveis: n = insolação, t = temperatura, v<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 m de altura sobre a superfície evaporante, Hr = umidade relativa, R<sub>g</sub> = intensidade da radiação global que atingiria o solo, supondo-se que a atmosfera não existisse, N = duração máxima da insolação nos vários meses do ano, R<sub>i</sub> = radiação global incidente, r = albedo (relação entre a radiação incidente de onda curta e a radiação refletida, também, de onda curta, e, = pressão de saturação do vapor à temperatura do ar, e<sub>a</sub> = pressão de vapor do ar, R<sub>l</sub> = radiação refletida, de onda longa, T<sub>a</sub> = 273 + t = temperatura do ar em graus Kelvin,  $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman = 0,826 x 10<sup>-8</sup> cal/cm<sup>2</sup>.min. °K<sup>4</sup>, R<sub>n</sub> = radiação líquida, c<sub>1</sub> = calor de vaporização necessário para evaporar 1 mm de água por cada cm<sup>2</sup> de superfície, R<sub>nl</sub> = radiação líquida traduzida em mm de água que pode evaporar por dia, E<sub>a</sub> = poder evaporante do ar à sombra, E = evaporação, d = número de dias de cada mês.

Variáveis	Maneira de obtê-las	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
n	Dados (Tab. 6)	horas/dia	9,07	8,93	7,21	6,48	6,53	6,14	6,64	6,97	7,67	9,12	9,46	9,32
t	Dados (Tab. 6)	°C	27,00	27,20	27,00	26,20	25,40	24,60	24,00	24,00	24,90	25,90	26,50	26,80
v <sub>2</sub>	Dados (Tab. 6)	m/s	2,60	2,50	2,30	2,40	2,90	2,90	3,50	3,30	3,20	3,00	2,50	2,50
Hr	Dados (Tab. 6)	%	75,20	75,80	78,50	81,30	82,60	82,50	81,00	79,50	77,40	75,20	75,10	74,50
R <sub>g</sub>	Tabela 2	cal/cm <sup>2</sup> .dia	886,00	889,00	876,00	828,00	766,00	737,00	759,00	810,00	872,00	893,00	892,00	881,00
N	Tabela 3	horas/dia	12,50	12,40	12,10	11,90	11,70	11,60	11,70	11,90	12,10	12,30	12,50	12,60
R <sub>i</sub>	R <sub>i</sub> = R <sub>g</sub> (0,24 + 0,58 n/N)	cal/cm <sup>2</sup> .dia	585,55	584,63	512,84	460,09	431,76	403,14	432,31	469,61	529,73	598,33	606,58	589,64
r	apud VILLA NOVA et al (1968)	adimensional	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
R <sub>i</sub> (1-r)	R <sub>i</sub> (1-r)	cal/cm <sup>2</sup> .dia	497,72	496,94	435,91	391,08	367,00	342,67	367,46	399,17	450,27	508,58	515,59	501,19
e <sub>a</sub>	Tabela 4	mm Hg	26,70	27,02	26,70	25,58	24,36	23,16	22,40	22,40	23,64	25,14	26,00	26,42
e <sub>d</sub>	e <sub>d</sub> = e <sub>a</sub> . Hr/100	mm Hg	20,08	20,48	20,96	20,80	20,12	19,11	18,14	17,81	18,30	18,91	19,53	19,68
R <sub>e</sub>	R <sub>e</sub> = 1440 $\sigma$ (Ta) <sup>4</sup> (0,56 - 0,092 $\sqrt{e_d}$ ) (0,1 + 0,9 n/N)	cal/cm <sup>2</sup> .dia	106,94	103,53	85,06	78,91	83,60	84,93	96,29	99,67	104,40	116,39	114,94	138,12
R <sub>N</sub>	R <sub>N</sub> = R <sub>i</sub> (1-r) - R <sub>e</sub>	cal/cm <sup>2</sup> .dia	390,78	393,41	350,85	312,17	283,40	257,74	271,17	299,50	345,90	392,19	400,65	363,07
c <sub>1</sub>	Tabela 1	cal/mm.cm <sup>2</sup>	58,20	58,20	58,20	58,20	58,20	58,20	58,30	58,30	58,20	58,20	58,20	58,20
R <sub>nl</sub>	R <sub>nl</sub> = R <sub>N</sub> /c <sub>1</sub>	mm	6,71	6,76	6,03	5,36	4,87	4,43	4,65	5,14	5,94	6,74	6,88	6,24
E <sub>a</sub>	E <sub>a</sub> = (e <sub>a</sub> - e <sub>d</sub> ) 0,35(0,5 + 0,54 v <sub>2</sub> )	mm	4,41	4,23	3,50	3,00	3,07	2,93	3,56	3,67	4,16	4,62	4,29	4,36
$\Delta/\gamma$	Tabela 7	adimensional	3,08	3,11	3,08	2,95	2,84	2,72	2,64	2,64	2,77	2,91	3,00	3,05
E	[( $\Delta/\gamma$ )R <sub>nl</sub> + E <sub>a</sub> ]/[( $\Delta/\gamma$ ) + 1]	mm/dia	6,15	6,14	5,41	4,76	4,40	4,02	4,35	4,73	5,47	6,20	6,21	5,77
ETp	ETp = d x E	mm	190,65	171,92	167,71	142,80	136,40	120,60	134,85	146,63	164,10	192,20	186,30	178,67

Quando a superfície está coberta por diferentes culturas deve ser realizado um inventário a fim de que seja determinada a porcentagem da área coberta por cultura individual e usada para cada uma delas o coeficiente, k, correspondente.

### 2.2.1 — O método de Blaney & Criddle modificado por Camargo

Camargo (1966) adaptou a fórmula de Blaney & Criddle às condições do

planalto paulista, e propôs a equação seguinte (fórmula de Blaney & Criddle, 1945, modificada por Camargo, 1966):

$$ETp = (t - 0,5 T) p \quad (11)$$

onde:

ETp = evapotranspiração potencial mensal (mm)

t = temperatura média mensal (°C) (Tabela 5)

p = porcentagem de horas diurnas do mês em relação ao total de horas diurnas do ano (Tabela 9)

T = temperatura média anual (°C) - (Tabela 5).

O valor do coeficiente, k, da fórmula original de Blaney & Criddle foi, na fórmula de Blaney & Criddle, modificada, considerado igual à unidade.

Tabela 9 — Porcentagem, p, de horas diurnas do mês em relação ao total de horas diurnas do ano, entre as latitudes de 0° (Equador) e 30°S, utilizada nos cálculos da evapotranspiração potencial (método de Blaney & Criddle modificado por Camargo).

Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0°	8,50	7,66	8,48	8,23	8,50	8,22	8,49	8,51	8,22	8,48	8,12	8,49
8°S	8,77	7,83	8,52	8,09	8,27	7,89	8,20	8,33	8,19	8,60	8,49	8,82
10°S	8,82	7,88	8,59	8,06	8,20	7,82	8,14	8,28	8,18	8,63	8,56	8,90
20°S	9,26	8,08	8,58	7,89	7,88	7,43	7,71	8,02	8,12	8,79	8,91	9,33
30°S	9,75	8,32	8,64	7,73	7,44	6,93	7,28	7,70	8,07	8,99	9,26	9,88

\* Latitude de Olinda.

Fonte: Camargo, 1966

Tabela 10 — Determinação da evapotranspiração potencial, ETP, mensal de Olinda (método de Blaney & Criddle modificado por Camargo), no período de 1943 a 1965. Variáveis: p = porcentagem de horas diurnas do mês em relação ao total de horas diurnas do ano, T = temperatura média anual, t = temperatura média do mês considerado.

Variáveis	Maneira de Obtê-las	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
p	Tabela 9	%	8,77	7,83	8,52	8,09	8,27	7,89	8,20	8,33	8,19	8,60	8,49	8,82
T	Tabela 5	°C	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
t	Tabela 5	°C	27,0	27,2	27,0	26,2	25,4	24,6	24,0	24,0	24,9	25,9	26,5	26,8
ETp	ETp = (t - 0,37)p	mm	123,7	112,0	120,1	107,6	103,4	92,3	91,0	92,5	98,3	111,8	115,5	122,6

Tabela 11 — Evapotranspiração potencial, E (mm/dia), para meses de 30 dias com 12 horas de luz solar, em função da temperatura média diária do mês, t (°C), e do índice térmico anual, I (°C)<sup>1.8</sup>.

t \ I	110	115	120	125	130	135	140
22,0	3,0	2,9	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5
22,5	3,1	3,1	2,9	2,8	2,8	2,8	2,7
23,0	3,3	3,3	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9
23,5	3,4	3,4	3,3	3,2	3,2	3,2	3,1
24,0	3,5	3,5	3,4	3,3	3,3	3,3	3,2
24,5	3,7	3,7	3,6	3,5	3,5	3,5	3,4
25,0	3,9	3,9	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7
25,5	4,1	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9
26,0	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,2

Valor de E quando t ≥ 26,5 °C, para qualquer valor de I:

t	E	t	E	t	E	t	E	t	E	t	E	t	E
26,5	4,5	28,0	4,9	29,5	5,3	31,0	5,6	32,5	5,8	34,0	6,0	35,5	6,1
27,0	4,6	28,5	5,1	30,0	5,4	31,5	5,7	33,0	5,9	34,5	6,1	36,0	6,1
27,5	4,8	29,0	5,2	30,5	5,5	32,0	5,8	33,5	6,0	35,0	6,1	36,5	6,2

Fonte: CUSTODIO & LLAMAS (1976)

O cálculo da evapotranspiração potencial, ETP, por este método, para a área em estudo, acha-se apresentado na Tabela 10.

### 2.2.2 — O método de Thornthwaite

A fórmula de Thornthwaite para o cálculo da evapotranspiração potencial, ETP, mensal (mm) é a seguinte:

$$ETp = K \times E \quad (12)$$

onde:

$$K = \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30} \cdot d \quad (13)$$

N = duração máxima da insolação (horas/dia), segundo a latitude (Tabela 3)

d = número de dias do mês

$$E = 16 \left( \frac{10t}{I} \right) a \quad (14)$$

onde:

E = evapotranspiração potencial diária (mm) (Tabela 11)

O cálculo da evapotranspiração potencial ETP, pelo método de Thornthwaite, para o caso em estudo, seguiu a sistemática apresentada na Tabela 12.

### 2.2.3 — O método de Turc

De acordo com a fórmula de Turc, numa região onde a atmosfera não é muito seca (umidade relativa > 50%) e o suprimento de água do solo é assegurado (hipótese de definição), a evapotranspiração potencial ETP mensal é dada por:

$$ETp = 0,40 \frac{t}{t + 15} (R + 50) \quad (15)$$

Para o mês de fevereiro a expressão (15) torna-se:

$$ETp = 0,37 \frac{t}{t + 15} (R + 50) \quad (16)$$

onde:

t = temperatura média mensal (°C)

R = o mesmo do método de Penman.

Segundo Losano & Bernaldez (1964) e também Ward (1970, apud Custodio & Llamas, 1975), obtém-se a radiação global média mensal que incide sobre o solo a partir de medidas da insolação, através da seguinte fórmula geral:

$$R_i = R_A \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

onde:

R<sub>A</sub> = definido anteriormente (Tabela 2)

a = 0,18 e b = 0,62. Valores usados para o método de Turc

n = definido anteriormente (Tabela 5)

N = definido anteriormente (Tabela 3)

$\frac{n}{N}$  = razão de insolação. É, por-

tanto, a insolação relativa ou duração relativa do brilho solar, mês considerado.

A evapotranspiração potencial ETP (mm), calculada pelo método de Turc,

**Tabela 12 — Determinação da evapotranspiração potencial, ETp, mensal de Olinda (método de Thornthwaite), no período de 1943 a 1965. Variáveis: t = temperatura média mensal, i = índice térmico mensal, I = índice térmico anual. E = evapotranspiração potencial diária, N = duração máxima da insolação diária, segundo a latitude, d = número de dias do mês, k = coeficiente de correção que leva em conta a duração real do mês e o número máximo de horas de sol, segundo a latitude.**

Variáveis	Maneira de Obtê-las	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
t	Dados (Tab. 5)	°C	27,0	27,2	27,0	26,2	25,4	24,6	24,0	24,0	24,9	25,9	26,5	26,8
i	$i = (t/5)^{1,5}$	$^{\circ}(C)^{1,5}$	12,5	12,7	12,5	12,0	11,4	10,9	10,5	10,5	11,1	11,8	12,2	12,4
I	$I = i(i = \text{JAN}, \dots, \text{DEZ})$	$^{\circ}(C)^{1,5}$	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5	140,5
E	Tabela 11	mm/dia	4,6	4,7	4,6	4,4	3,9	3,4	3,2	3,2	3,7	4,2	4,5	4,6
N	Tabela 3	horas/dia	12,5	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
d	Nº de dias de cada mês	dias	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
k	$(N/12) \cdot (d/30) \cdot d$	-	33,4	27,0	32,3	29,7	31,2	29,0	31,2	31,8	30,2	32,8	31,2	33,6
ETp	$ETp = K \cdot E$	mm	153,6	126,9	148,6	130,7	121,7	98,6	99,8	101,8	111,7	137,8	140,4	154,6

**Tabela 13 — Determinação da evapotranspiração potencial, ETp, mensal de Olinda, (método de Turc), no período de 1943 a 1965. Variáveis: t = temperatura média mensal, n = duração da insolação mensal, N = duração máxima da insolação nos vários meses do ano, R<sub>A</sub> = energia da radiação mensal que atingiria o solo se a atmosfera não existisse, R<sub>i</sub> = radiação global média mensal.**

Variáveis	Maneira de Obtê-las	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
T	Dados (Tab. 5)	°C	27,0	27,2	27,0	26,2	25,4	24,6	24,0	24,0	24,9	25,9	26,5	26,8
n	Dados (Tab. 5)	horas	281,2	250,0	223,4	194,3	202,4	184,2	206,1	216,1	230,0	282,7	284,5	289,1
N	Tabela 3	horas/dia	12,5	12,4	12,1	11,9	11,9	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
R <sub>A</sub>	Tabela 2	cal/cm <sup>2</sup> .dia	888,0	889,0	876,0	828,0	766,0	737,0	759,0	810,0	872,0	893,0	892,0	881,0
R <sub>i</sub>	$R_i = R_A (0,18 + 0,62 n/N)$	cal/cm <sup>2</sup> .dia	558,1	456,9	581,1	428,4	402,9	374,5	404,2	440,0	499,5	571,2	580,1	562,9
ETp	$ETp = 0,40 \frac{t}{t+15} (R_i + 50)$	mm	156,4	120,9	130,6	121,7	113,9	105,5	111,8	120,6	137,2	157,3	160,9	157,2

para o município de Olinda, seguiu o roteiro apresentado na Tabela 13.

#### 2.2.4 — O método de Hargreaves

Outro método largamente aplicado ao Nordeste é o de Hargreaves (1972).

A equação da evapotranspiração potencial, ETp, concebida por Hargreaves é a seguinte:

$$ETp = 0,35 \times RT \times CT \times CH \times CW \times CE \quad (17)$$

onde:

RT = radiação mensal extraterrestre expressa em milímetros de evaporação equivalente (Tabela 14)

$$CT = 0,40 \times 0,024 \times t$$

t = temperatura média mensal em °C (Tabela 5)

$$CH = 0,05 + 1,42 (1,00 - Hr)^{1/2}$$

Hr = umidade relativa média mensal (0,00 a 1,00) (Tabela 5)

$$CW = 0,80 + 0,0016 v_2$$

**Tabela 14 — Valores médios mensais da radiação terrestre, RT, expressa em termos de evaporação equivalente (mm) à temperatura de 20 °C, entre as latitudes de 0° (Equador) e 30°S, utilizados nos cálculos da evapotranspiração potencial (método de Hargreaves)**

Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0°	467	435	487	458	449	419	440	464	468	485	457	462
*8°S	501	453	487	437	411	376	398	434	460	499	486	500
10°S	509	457	486	431	400	364	386	426	456	500	492	508
20°S	536	465	470	391	342	300	323	376	430	500	514	541
30°S	550	461	440	339	275	230	253	316	391	486	522	561

\* Latitude de Olinda

Fonte: HARGREAVES, 1972

v<sub>2</sub> = velocidade do vento em km/dia - (Tabela 5)

$$CE = 1,00 + 0,0004 \times \text{Alt}$$

Alt = altitude acima do nível do mar em metros (Tabela 5)

Os valores encontrados para a evapotranspiração potencial ETp, pelo método de Hargreaves, estão indicados na Tabela 15.

### 3. CORRELAÇÃO ENTRE A EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E A INSOLAÇÃO

Após os cálculos da evapotranspiração potencial, ETp, pelos diversos métodos, fez-se a correlação entre ela e a insolação medida, n, confirmando-se a verificação de que a insolação é, em Olinda, o fator climatológico mais importante (Teixeira, 1982) e, por isso, o método mais adequado para se esti-

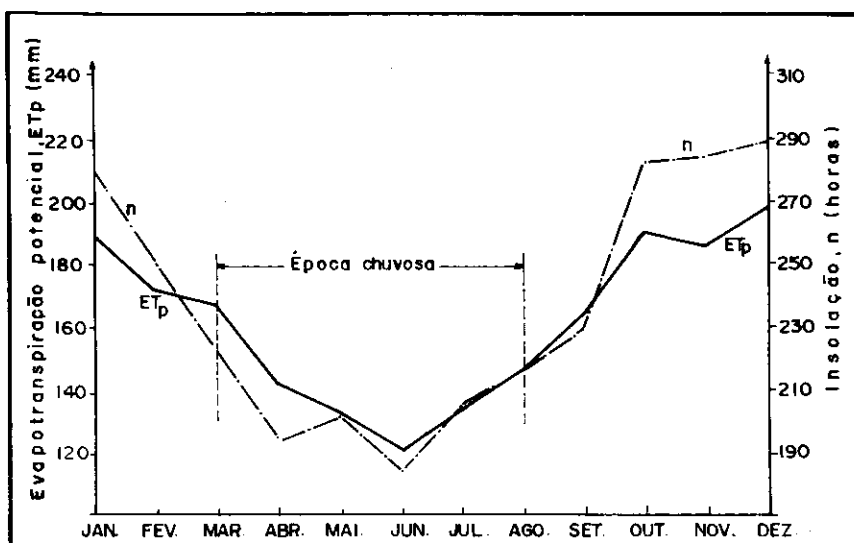
**Tabela 15 — Determinação da evapotranspiração potencial, Etp, mensal de Olinda (método de Hargreaves), no período de 1943 a 1965. Variáveis: Alt — altitude acima do nível do mar, v<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 m de altura sobre a superfície evaporante, Hr = umidade relativa, t = temperatura média mensal, RT — radiação extraterrestre.**

Variáveis	Maneira de Obtê-las	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Alt	Dados (Tab. 5)	m	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
CE	$CE = 1,00 + 0,0004 \times Alt$	-	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
v <sub>2</sub>	Dados (Tab. 5)	km/dia	224,64	216,00	198,72	207,36	250,56	250,56	302,40	285,12	276,48	259,20	216,00	216,00
CW	$CW = 0,80 + 0,0016 \times v_2$	-	1,16	1,14	1,12	1,13	1,20	1,20	1,31	1,26	1,24	1,21	1,14	1,14
Hr	Dados (Tab. 5)	0 a 1	0,75	0,76	0,78	0,81	0,83	0,82	0,81	0,79	0,77	0,75	0,75	0,74
CH	$CH = 0,05 + 1,42(1,00 - Hr)^{1/2}$	-	0,76	0,74	0,72	0,67	0,63	0,65	0,67	0,70	0,73	0,76	0,76	0,77
t	Dados (Tab. 5)	°C	27,0	27,2	27,0	26,2	25,4	24,6	24,0	24,0	24,9	25,9	26,5	26,8
CT	$CT = 0,40 + 0,024 \times t$	-	1,05	1,05	1,05	1,03	1,01	0,99	0,98	0,98	1,00	1,02	1,04	1,04
RT	Tabela 14	mm	501,0	453,0	487,0	487,0	411,0	376,0	398,0	434,0	460,0	499,0	486,0	500,0
Etp	$Etp = 0,35 \times RT \times CT \times CH \times CW \times CE$	mm	165,6	143,2	147,2	121,7	112,0	103,7	122,2	133,9	148,7	167,1	156,3	162,9

**Tabela 16 — Correlação entre a insolação medida, n (horas), e a evapotranspiração potencial, Etp (mm), de Olinda, calculada pelos métodos de Penman, Blaney & Criddle modificado por Camargo, Thornthwaite, Turc e Hargreaves.**

Mês	Insolação Medida n	Evapotranspiração potencial, Etp, calculada				
		PENMAN	*B & C mod.	THORNTHWAITE	TURC	HARGREAVES
JAN	281,2	190,7	123,7	153,6	156,4	165,6
FEV	250,0	171,9	112,0	126,9	120,9	143,2
MAR	223,4	167,7	120,1	148,6	136,6	147,2
ABR	194,3	142,8	107,6	130,7	121,7	121,7
MAI	202,4	136,4	103,4	121,7	113,9	112,0
JUN	184,2	120,6	92,3	98,6	105,5	103,7
JUL	206,1	134,9	91,0	99,8	111,8	122,2
AGO	216,1	146,6	92,5	101,8	120,6	133,9
SET	230,0	164,1	98,3	111,7	137,2	148,7
OUT	282,7	192,2	111,8	137,8	157,3	167,1
NOV	284,5	186,3	115,5	140,4	160,9	156,3
DEZ	289,1	178,9	122,6	154,6	157,2	162,9
Equação de regressão		$Etp = 0,59n + 21,73$	$Etp = 0,23n + 53,45$	$Etp = 0,39n + 35,21$	$Etp = 0,48n + 19,16$	$Etp = 0,52n + 18,21$
Coef. de correlação		r = 0,94	r = 0,74	r = 0,73	r = 0,92	r = 0,93

\* Blaney & Criddle modificado por Camargo.



**Fig. 2 — Comportamento da evapotranspiração potencial, Etp (método de Penman), com a insolação medida, n, de Olinda-Paulista, no período de 1943 a 1965.**

mar a evapotranspiração potencial é, no caso, o de Penman, que apresentou um coeficiente de correlação  $r = 0,94$  (Tabela 16).

A evapotranspiração potencial, Etp, calculada pelo método de Penman e a insolação medida, n, referentes ao período de 1943 a 1965, comportam-se do mesmo modo, isto é, apresentam-se com valores baixos na época chuvosa e altos na época das estiagens (Figura 2).

#### 4. EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL

A água retida no solo é que alimenta a evapotranspiração em época de déficit pluviométrico, sendo renovada nos períodos em que há excesso. Assim, é muito importante o conhecimento da umidade do solo e o da distribuição da precipitação no período.

A capacidade de retenção de água do solo ou capacidade de campo varia com a profundidade da camada considerada e do tipo de estrutura do solo.

O sistema radicular das plantas compensa essa variação do solo, pois, em solos arenosos, atinge camadas mais profundas do que em solos argilosos de maior capacidade de retenção. Assim, a profundidade da água disponível para as plantas não é tão difícil de avaliar, uma vez que elas estenderão suas raízes a diferentes profundidades e conseguirão diferentes quantidades de umidade. Sistemas radiculares moderados ou profundos crescendo em áreas úmidas utilizam somente cerca de 100 mm de umidade do solo entre épocas de chuva (Thornthwaite & Mather, 1955). Daí tomar-se esse valor para a capacidade de armazenamento do solo.

Quando o solo seca torna-se muito difícil a perda por evapotranspiração. Desse modo, se o conteúdo de umidade do solo decresce, o mesmo acontece com a taxa de evapotranspiração. Estudos têm indicado que a taxa de evapotranspiração é proporcional à quantidade de água remanescente no solo (Thornthwaite & Mather, 1955).

A evapotranspiração potencial ETp, representando a quantidade de água necessária para que nunca falte água para a vegetação, corresponde ao limite superior da quantidade de água que volta à atmosfera. Mas, o que interessa de fato ao balanço hídrico é a evapotranspiração real ETr, que representa a quantidade de água que efetivamente é retirada do solo através da evapotranspiração, a qual só é repostada por precipitação pluviométrica, irrigação ou ambas.

Assim, se o conteúdo de umidade do solo aproxima-se da capacidade de campo, a taxa de evapotranspiração aproxima-se da taxa de evapotranspiração potencial ETp.

Quando a capacidade de campo é de 100 mm a ETr = ETp. Depois de consumidos estes 100 mm a taxa de evapotranspiração real ETr cai até zero (Thornthwaite & Mather, 1955). Portanto, a evapotranspiração real varia desde ETr = 0 até ETr = ETp.

#### 4.1 — O método de Thornthwaite & Mather

Medidas diretas de evapotranspiração real ETr são raras. Por isso, utilizam-se métodos empíricos dentre os quais o de Thornthwaite & Mather (1955) é o mais usado. É um método bastante simples, através do qual pode-se efetuar o balanço hídrico mensal a partir de dados de precipitação e de evapotranspiração potencial. Para tal, deve ser levada em conta a limitação de saída da água do solo, pelo aumento da sua tensão. Existem tabelas que dão diferentes valores para a evapo-

Tabela 17 — Água retida no solo (mm) após valores de evapotranspiração potencial, ETp, ocorrida entre zero e 350 mm (P - ETp) negativo acumulado. Capacidade de campo = 100 mm.

P-ET <sub>p</sub> (NEG. ACUM.)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
10	90	89	88	88	87	86	86	84	83	82
20	81	81	80	79	78	77	77	76	75	74
30	74	73	72	71	70	70	69	68	68	67
40	66	66	65	64	64	63	62	62	61	60
50	60	59	59	58	58	57	56	56	55	54
60	54	53	53	52	52	51	51	50	50	49
70	49	48	48	47	47	46	46	45	45	44
80	44	44	43	43	42	42	41	41	40	40
90	40	39	39	38	38	38	37	37	36	36
100	36	35	35	35	34	34	34	33	33	33
110	32	32	32	31	31	31	30	30	30	30
120	29	29	29	28	28	28	27	27	27	27
130	26	26	26	26	26	25	25	24	24	24
140	24	24	23	23	23	23	22	22	22	22
150	22	21	21	21	21	20	20	20	20	20
160	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
170	18	17	17	17	17	17	16	16	16	16
180	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14
190	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13
200	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12
210	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
220	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
230	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
240	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
250	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7
260	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6
270	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
280	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
290	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
310	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
320	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
330	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
340	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
350	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2

Fonte: Villa Nova et alii (1968)

transpiração potencial quando o teor de umidade do solo varia, considerando um determinado valor da capacidade de campo. Escolheu-se para a capacidade de campo da área o valor de 100 mm (Tabela 17).

O cálculo da evapotranspiração real ETr, por meio do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather aplicado ao caso em estudo foi efetuado levando em conta a evapotranspiração potencial ETp, avaliada pelos métodos de Penman, Blaney & Criddle modificado por Camargo, Thornthwaite, Turc e Hargrea-

ves, como está mostrado nas Tabelas 18, 19, 20, 21 e 22, onde:

Linha 1 = P = precipitação pluviométrica (Tabela 5).

Linha 2 = ETp = evapotranspiração potencial (Tabelas 8, 10, 12, 13 e 15).

Linha 3 = P - ETp = saldo positivo ou negativo obtido pela subtração entre a linha 2 e a linha 1.

Linha 4 = Neg. acum. = soma dos valores negativos de P - ETp. Finda a época chuvosa o primeiro mês que aparecer P - ETp < 0,



**Tabela 18 — Determinação da evapotranspiração real, ETr, de Olinda, através do método de Thornthwaite & Mather, no período de 1943 a 1965. Variáveis: P = precipitação pluviométrica, ETp = evapotranspiração potencial (método de Penman), ARM = armazenamento útil à vegetação (máximo = 100 mm), ALT = variação do armazenamento de água no solo, DEF = deficiência de umidade do solo, EXC = excedente de água.**

*Variáveis	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
(1) P	mm	73,3	61,1	186,0	208,4	270,8	261,9	224,3	151,1	69,6	38,1	39,7	50,6	1634,9
(2) ETp	mm	190,7	171,9	167,7	142,8	136,4	120,6	134,9	146,6	164,1	192,2	186,3	178,9	1933,1
(3) P - ETp	mm	-117,4	-110,8	18,3	65,6	134,4	141,3	89,4	4,5	-94,5	-154,1	-146,6	-128,3	-298,2
(4) NEG. ACUM.	mm	-640,9	-751,7	165,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-248,6	-395,2	-523,5	
(5) ARM	mm	0,0	0,0	18,3	83,9	100,0	100,0	100,0	100,0	38,0	8,0	0,0	0,0	
(6) ALT	mm	0,0	0,0	18,3	65,6	16,1	0,0	0,0	0,0	-62,0	-30,0	-8,0	0,0	0,0
(7) ETr	mm	73,3	61,1	167,7	142,8	136,4	120,6	134,9	146,6	131,6	68,1	47,7	50,6	1281,4
(8) DEF	mm	117,4	110,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,5	124,1	138,6	128,3	651,7
(9) EXC	mm	0,0	0,0	0,0	0,0	118,3	141,3	89,4	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	353,5

\*Maneira de Obtê-las:

- (1) Dados (Tab. 5)
- (2) Calculado (Tab. 8)
- (3) (1) - (2)
- (4) \*\*a) Parte de (3) < 0 até últ. (3) < 0; b) Qdo (3) > 0 (Tab. 17 com 5b)
- (5) a) Se (3) < 0 (Tab. 17 com 4a); b) Se (3) > 0, (3) mês + (5) mês ant.
- (6) (5) do mês em curso - (5) do mês anterior
- (7) Se (5) = 100 ou (3) > 0, (7) = (2). Se (3) < 0, (7) = (1) + |(6)|
- (8) (2) - (7)
- (9) Se (5) < 100, (9) = 0. Se (5) = 100, (9) = (3) - (6)

Aferição:

$$EP = \sum ETp + \sum (P - ETp) = \sum (2) + \sum (3) = 1933,1 - 298,2 = 1634,9 \text{ mm}$$

$$EALT = 0 = \sum (6) = 0,0 \text{ mm}$$

$$EETp = EETr + EDEF = \sum (7) + \sum (8) = 1933,1 \text{ mm}$$

$$EP = EETr + EEXC = \sum (7) + \sum (9) = 1281,4 + 353,5 \text{ mm} = 1634,9 \text{ mm}$$

\*\* Inicia-se a contagem a partir do início do período das estiagens, ou seja, em setembro, no caso de Olinda.

**Tabela 19 — Determinação da evapotranspiração real, ETr, de Olinda, através do método de Thornthwaite & Mather, no período de 1943 a 1965. Variáveis: p = precipitação pluviométrica, ETp = evapotranspiração potencial (método de Blaney & Criddle modificado por Camargo), ARM = armazenamento útil à vegetação (máximo = 100 mm), ALT = variação do armazenamento da água no solo, DEF = deficiência de umidade do solo, EXC = excedente de água**

*Variáveis	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
(1) P	mm	73,3	61,1	186,0	208,4	270,8	261,9	224,3	151,1	69,6	38,1	39,7	50,6	1634,9
(2) ETp	mm	123,7	112,0	120,1	107,6	103,4	92,3	91,0	92,5	98,3	111,8	115,5	122,6	1290,8
(3) P - ETp	mm	-50,4	-50,9	65,9	100,8	167,4	169,6	133,3	58,6	-28,7	-73,7	-75,8	-72,0	344,1
(4) NEG. ACUM	mm	-300,6	-351,5	-36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-28,7	-102,4	-178,2	-250,2	
(5) ARM	mm	4,0	3,0	68,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	74,0	35,0	16,0	8,0	
(6) ALT	mm	-4,0	-1,0	65,9	31,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-26,0	-39,0	-19,0	-8,0	0,0
(7) ETr	mm	77,3	62,1	120,1	107,6	103,4	92,3	91,0	92,5	95,6	77,1	58,7	58,6	1036,3
(8) DEF	mm	46,4	49,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	34,7	56,8	64,0	254,5
(9) EXC	mm	0,0	0,0	0,0	69,7	167,4	169,6	133,3	58,6	0,0	0,0	0,0	0,0	598,6

\*Maneira de Obtê-las:

- (1) Dados (Tab. 5)
- (2) Calculado (Tab. 10)
- (3) (1) - (2)
- (4) \*\*a) Parte de (3) < 0 até últ. (3) < 0; b) Qdo (3) > 0 (Tab. 17 com 5b)
- (5) a) Se (3) < 0 (Tab. 17 com 4a); b) Se (3) > 0, (3) mês + (5) mês ant.
- (6) (5) do mês em curso - (5) do mês anterior
- (7) Se (5) = 100 ou (3) > 0, (7) = (2). Se (3) < 0, (7) = (1) + |(6)|
- (8) (2) - (7)
- (9) Se (5) < 100, (9) = 0. Se (5) = 100, (9) = (3) - (6)

Aferição:

$$EP = \sum ETp + \sum (P - ETp) = \sum (2) + \sum (3) = 1290,8 + 344,1 = 1634,9 \text{ mm}$$

$$EALT = 0 = \sum (6) = 0,0 \text{ mm}$$

$$EETp = EETr + EDEF = \sum (7) + \sum (8) = 1036,3 + 254,5 = 1290,8 \text{ mm}$$

$$EP = EETr + EEXC = \sum (7) + \sum (9) = 1036,3 + 598,6 = 1634,9 \text{ mm}$$

\*\* Inicia-se a contagem a partir do início do período das estiagens, ou seja, em setembro, no caso de Olinda.

toma-se esse valor para o primeiro valor de Neg. acum. Daí por diante, cada mês terá o valor do P - ETp < 0 somado ao Neg. acum. do mês anterior, até o último mês que apresentar P -

Etp < 0. Com os valores do Arm correspondentes aos P - ETp > 0, entra-se na Tabela 17 onde são encontrados os demais valores do Neg. acum.

Linha 5 = Arm = armazenamento ou

reserva útil à vegetação, que corresponde à água contida na zona das raízes e que varia de zero a 100 mm. Com os valores do Neg. acum. entra-se na Tabela 17 para a obtenção do Arm. Para o valor

**Tabela 20 — Determinação da evapotranspiração real, ETr, de Olinda, através do método de Thornthwaite & Mather, no período de 1943 a 1965. Variáveis: P = precipitação pluviométrica, ETp = evapotranspiração potencial (método de Thornthwaite & Mather, no período de 1943 a 1965. Variáveis: P = precipitação pluviométrica, ETp = evapotranspiração potencial (método de Thornthwaite), ARM = armazenamento útil à vegetação (máximo = 100 mm), ALT = variação do armazenamento da água no solo, DEF = deficiência de umidade do solo, EXC = excedente de água.**

*Variáveis	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
(1) P	mm	73,3	61,1	186,0	208,4	270,8	261,9	224,3	151,1	69,6	38,1	39,7	50,6	1634,9
(2) ETp	mm	153,6	126,9	148,6	130,7	121,7	98,6	99,8	101,8	111,7	137,8	140,4	154,6	1526,2
(3) P - ETp	mm	- 80,3	- 65,8	37,4	77,7	149,1	163,3	124,5	49,3	- 42,1	- 99,7	-100,7	-104,0	108,7
(4) NEG. ACUM.	mm	-426,8	-492,6	96,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 42,1	-141,8	-242,5	-346,5	
(5) ARM	mm	0,0	0,0	37,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	65,0	23,0	8,0	3,0	
(6) ALT	mm	- 3,0	0,0	37,4	62,6	0,0	0,0	0,0	0,0	- 35,0	- 42,0	- 15,0	- 5,0	0,0
(7) ETr	mm	76,3	61,1	148,6	130,7	121,7	98,6	99,8	101,8	104,6	80,1	54,7	55,6	1133,6
(8) DEF	mm	77,3	65,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	57,7	85,7	99,0	392,6
(9) EXC	mm	0,0	0,0	0,0	15,1	149,1	163,3	124,5	49,3	0,0	0,0	0,0	0,0	501,3

\*Maneira de Obtê-las:

- (1) Dados (Tab. 5)
- (2) Calculado (Tab. 12)
- (3) (1) - (2)
- (4) \*\*a) Parte de (3) < 0 até últ. (3) < 0; b) Qdo (3) > 0 (Tab. 17 c/5b)
- (5) a) Se (3) < 0 (Tab. 17 c/4a); b) Se (3) > 0, (3) mês + (5) mês ant.
- (6) (5) do mês em curso - (5) do mês anterior
- (7) Se (5) = 100 ou (3) > 0, (7) = (2); Se (3) < 0, (7) = (1) + |(6)|
- (8) (2) - (7)
- (9) Se (5) < 100, (9) = 0; Se (5) = 100, (9) = (3) - (6)

Aferição:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= \Sigma ETp + \Sigma (P - ETp) = \Sigma (2) + \Sigma (3) = 1526,2 + 108,7 = 1634,9 \text{ mm} \\ \Sigma ALT &= 0 = \Sigma (6) = 0,0 \text{ mm} \\ \Sigma ETp &= \Sigma ETr + \Sigma DEF = \Sigma (7) + \Sigma (8) = 1133,6 + 392,6 = 1526,2 \text{ mm} \\ \Sigma P &= \Sigma ETr + \Sigma EXC = \Sigma (7) + \Sigma (9) = 1133,6 + 501,3 = 1634,9 \text{ mm} \end{aligned}$$

\*\* Inicia-se a contagem a partir do início do período das estiagens, ou seja, em setembro, no caso de Olinda.

**Tabela 21 — Determinação da evapotranspiração real, ETr, de Olinda, através do método de Thornthwaite & Mather, no período de 1943 a 1945. Variáveis: P = precipitação pluviométrica, ETp = evapotranspiração potencial (método de Turc), ARM = armazenamento útil à vegetação (máximo = 100 mm), ALT = variação do armazenamento da água no solo, DEF = deficiência de umidade do solo EXC = excedente de água.**

*Variáveis	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
(1) P	mm	73,3	61,1	186,0	208,4	270,8	261,9	224,3	151,1	69,6	38,1	39,7	50,6	1634,9
(2) ETp	mm	156,4	120,9	136,6	121,7	113,9	105,5	111,8	120,6	137,2	157,3	160,9	157,2	1600,0
(3) P - ETp	mm	- 83,1	- 59,8	49,4	86,7	156,9	156,4	112,5	30,5	- 67,6	-119,2	-121,2	-106,6	34,9
(4) NEG. ACUM.	mm	-497,7	-557,5	- 70,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 67,6	-186,8	-308,0	-414,6	
(5) ARM	mm	0,0	0,0	49,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	50,0	15,0	4,0	0,0	
(6) ALT	mm	0,0	0,0	49,4	50,6	0,0	0,0	0,0	0,0	- 50,0	- 35,0	- 11,0	- 4,0	0,0
(7) ETr	mm	73,3	61,1	136,6	121,7	113,9	105,5	111,8	120,6	119,6	73,1	50,7	54,6	1142,5
(8) DEF	mm	83,1	59,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,6	84,2	110,2	102,6	457,5
(9) EXC	mm	0,0	0,0	0,0	36,1	156,9	156,4	112,5	30,5	0,0	0,0	0,0	0,0	492,4

\*Maneira de Obtê-las:

- (1) Dados (Tab. 5)
- (2) Calculado (Tab. 15)
- (3) (1) - (2)
- (4) \*\*a) Parte de (3) < 0 até últ. (3) < 0; b) Qdo (3) > 0 (Tab. 17 c/5b)
- (5) a) Se (3) < 0 (Tab. 17 c/4a); b) Se (3) > 0, (3) mês + (5) mês ant.
- (6) (5) do mês em curso - (5) do mês anterior
- (7) Se (5) = 100 ou (3) > 0, (7) = (2); Se (3) < 0, (7) = (1) + |(6)|
- (8) (2) - (7)
- (9) Se (5) < 100, (9) = 0; Se (5) = 100, (9) = (3) - (6)

Aferição:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= \Sigma ETp + \Sigma (P - ETp) = \Sigma (2) + \Sigma (3) = 1684,5 - 49,6 = 1634,9 \text{ mm} \\ \Sigma ALT &= 0 = \Sigma (6) = 0,0 \text{ mm} \\ \Sigma ETp &= \Sigma ETr + \Sigma DEF = \Sigma (7) + \Sigma (8) = 1142,5 + 457,5 = 1600,0 \text{ mm} \\ \Sigma P &= \Sigma ETr + \Sigma EXC = \Sigma (7) + \Sigma (9) = 1142,5 + 492,4 = 1634,9 \text{ mm} \end{aligned}$$

\*\* Inicia-se a contagem a partir do início do período das estiagens, ou seja, em setembro, no caso de Olinda.

de P - ETp > 0, soma-se este valor ao Arm do mês anterior e obtém-se o valor do Arm do mês considerado.

Linha 6 = Alt = alteração ou variação da reserva de água do solo indica-

da pela variação dos valores da linha 5. Representa a subtração algébrica entre a água armazenada no mês considerado e no mês anterior.

Linha 7 = ETr = A evapotranspiração

real ETr, é igual à ETp quando o Arm é igual à capacidade de campo considerada e quando P - ETp > 0. Quando P - ETp < 0, ETr é a soma de P com o valor absoluto de Alt.

**Tabela 22 — Determinação da evapotranspiração real, ETr, de Olinda, através do método de Thornthwaite & Mather, no período de 1943 a 1965. Variáveis: P = precipitação pluviométrica, ETp = evapotranspiração potencial (método de Hargreaves), ARM = armazenamento útil à vegetação (máximo = 100 mm), ALT = variação do armazenamento da água no solo, DEF = deficiência de umidade do solo, EXC = excedente de água.**

*Variáveis	Unidades	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
(1) P	mm	73,3	61,1	186,0	208,4	270,8	261,9	224,3	151,1	69,6	38,1	39,7	50,6	1634,9
(2) ETp	mm	165,6	143,2	147,2	121,7	112,0	103,7	122,2	133,9	148,7	167,1	156,3	162,9	1684,5
(3) P - ETp	mm	- 92,3	- 82,1	38,8	86,7	158,8	158,2	102,1	17,2	- 79,1	-129,0	-116,6	-112,3	-49,6
(4) NEG. ACUM	mm	-529,3	-611,4	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 79,1	-208,1	-324,7	-437,0	
(5) ARM	mm	0,0	0,0	38,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	44,0	12,0	10,0	0,0	
(6) ALT	mm	0,0	0,0	38,8	61,2	0,0	0,0	0,0	0,0	- 56,0	- 32,0	- 2,0	- 10,0	0,0
(7) ETr	mm	73,3	61,1	147,2	121,7	112,0	103,7	122,2	133,9	125,6	70,1	41,7	60,6	1173,1
(8) DEF	mm	92,3	82,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,1	97,0	114,6	102,3	511,4
(9) EXC	mm	0,0	0,0	0,0	25,5	158,8	158,2	102,1	17,2	0,0	0,0	0,0	0,0	461,8

\*Maneira de Obtê-las:

- (1) Dados (Tab. 5)
- (2) Calculado (Tab. 15)
- (3) (1) - (2)
- (4) \*\*a) Parte de (3) < 0 até últ. (3) < 0; b) Qdo (3) > 0 (Tab. 17 c/5b)
- (5) a) Se (3) < 0 (Tab. 17 c/4a); b) Se (3) > 0, (3) mês + (5) mês ant.
- (6) (5) do mês em curso - (5) do mês anterior
- (7) Se (5) = 100 ou (3) > 0, (7) = (2); Se (3) < 0, (7) = (1) + |(6)|
- (8) (2) - (7)
- (9) Se (5) < 100, (9) = 0; Se (5) = 100, (9) = (3) - (6)

Aferição:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= \Sigma ETp + \Sigma (P - ETp) = \Sigma (2) + \Sigma (3) = 1600,0 + 34,9 = 1634,9 \text{ mm} \\ \Sigma ALT &= 0 = \Sigma (6) = 0,0 \text{ mm} \\ \Sigma ETp &= \Sigma ETr + \Sigma DEF = \Sigma (7) + \Sigma (8) = 1173,1 + 511,4 = 1684,5 \text{ mm} \\ \Sigma P &= \Sigma ETr + \Sigma EXC = \Sigma (7) + \Sigma (9) = 1173,1 + 461,8 = 1634,9 \text{ mm} \end{aligned}$$

\*\* Inicia-se a contagem a partir do início do período das estiagens, ou seja, em setembro, no caso de Olinda.

Linha 8 = Def = deficiência de água no solo = diferença entre ETp (linha 2) e ETr (linha 7).

Linha 9 = Exc = excedente de alimentação. É igual a zero quando Arm (linha 5) é menor que 100. Nos outros casos a diferença entre P - ETp (linha 3) e Alt (linha 6).

Após a realização do balanço hídrico faz-se a sua aferição substituindo-se os valores encontrados nas expressões seguintes (Tabelas 18, 19, 20, 21 e 22):

$$\Sigma P = \Sigma ETp + \Sigma (P - ETp) \quad (18)$$

$$\Sigma ALT = 0 \quad (19)$$

$$\Sigma ETp = \Sigma ETr + \Sigma DEF \quad (20)$$

$$\Sigma P = \Sigma ETr + \Sigma EXC \quad (21)$$

Os resultados encontrados para a evapotranspiração real ETr diferem conforme o método empregado para o cálculo da evapotranspiração potencial ETp. Então, resta saber o método pelo qual a evapotranspiração potencial ETp deve ser calculada, considerando a correlação entre a evapotranspiração real ETr e a insolação medida n, uma vez que esta é a mais influente no processo da evapotranspiração (Teixeira, 1982).

**Tabela 23 — Função distribuição normal  $F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$**

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990

Fonte: Miller & Freund (1965)

### 5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO ENTRE OS VALORES DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E OS DA INSOLAÇÃO

Assim, foram consideradas as duas variáveis: X = n = insolação medida e Y = ETr = evapotranspiração real calculada com a evapotranspiração potencial ETp, sendo esta última obtida pelos métodos de Penman, Blaney & Criddle modificado por Camargo, Thornthwaite, Turc e Hargreaves.

Com o tamanho N da amostra de cada conjunto, isto é, N pares de valores (X, Y), pode-se estimular o coeficien-

te de correlação  $\sigma$  pelo coeficiente de correlação amostral r, que é dado por:

$$r = \frac{N \Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{(N \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2)(N \Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2)}}$$

O valor de r pode assumir o intervalo [-1, +1]. Os valores extremos (-1 e +1) indicam uma perfeita correlação entre as duas variáveis. Se r = 0 diz-se que não há correlação entre as variáveis consideradas.

No entanto, como o valor de r é baseado em dados amostrais é conveniente fazer um teste de significância

Tabela 24 — Correlação entre a insolação medida, n (horas), e a evapotranspiração real, ETr (mm), de Olinda, determinada através do balanço hídrico (método de Thornthwaite & Mather). Os valores da evapotranspiração potencial, ETP (mm), foram obtidos pelos métodos de Penman, Blaney & Criddle modificado por Camargo, Thornthwaite, Turc e Hargreaves.

Mês	Insolação Medida n	Evapotranspiração real, ETr, calculada				
		c/ ETP PENMAN	c/ ETP *B & C mod.	c/ ETP THORNTHWAITE	c/ ETP TURC	c/ ETP HARGREAVES
JAN	281,2	73,3	77,3	76,3	73,3	73,3
FEV	250,0	61,1	62,1	61,1	61,1	61,1
MAR	223,4	167,7	120,1	148,6	136,6	147,2
ABR	194,3	142,8	107,6	130,7	121,7	121,7
MAI	202,4	136,4	103,4	121,7	113,9	112,0
JUN	184,2	120,6	92,3	98,6	105,5	103,7
JUL	206,1	134,9	91,0	99,8	111,8	122,2
AGO	216,1	146,6	92,5	101,8	120,6	133,9
SET	230,0	131,6	95,6	104,6	119,6	125,6
OUT	282,7	68,1	77,1	80,1	73,1	70,1
NOV	284,5	47,7	58,7	54,7	50,7	41,7
DEZ	289,1	50,6	58,6	55,6	54,6	60,6
Equação de regressão		$ETr = -0,94 n + 328,88$	$ETr = -0,39 n + 179,14$	$ETr = -0,58 n + 231,97$	$ETr = -0,65 n + 248,55$	$ETr = -0,70 n + 263,60$
Coef. de correlação		$r = -0,85$	$r = -0,76$	$r = -0,75$	$r = -0,83$	$r = -0,79$

\* Blaney & Criddle modificado por Camargo.

(teste de hipótese nula  $p=0$ ) para verificar se não se trata de uma falsa correlação, uma vez que pode ocorrer um alto valor de r para uma dada amostra, sem haver, todavia, uma correlação entre as duas variáveis.

Para casos em que as duas variáveis são aleatórias, tiradas de uma população normal, como é o presente, o mais recomendado (apud Miller & Freund, 1965) é o teste z, que se baseia na estatística  $1/2 \ln [(1+r)/(1-r)]$ , cuja distribuição amostral é aproximadamente normal com a média  $1/2 \ln [(1+p)/(1-p)]$  e variância  $1/(N-3)$ .

Assim, a hipótese nula  $p = 0$  é testada com a estatística z, ou seja,

$$z = \frac{\sqrt{N-3}}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} \quad (23)$$

Dependendo do nível de significância desejado ( $\alpha = 0,05$  ou  $\alpha = 0,01$ ) verifica-se se o valor absoluto de z encontrado é igual ou superior ao ( $z = 1,64$  ou  $z = 2,33$ ), tabelado (Tabela 23). Se isso ocorrer conclui-se que a amostra é significativa e que há uma probabilidade de 95% ou 99% das duas variáveis consideradas terem uma relação linear.

Os valores mensais da insolação medida  $n = x$  e os da evapotranspiração real  $ETr = Y$  calculada, bem como os respectivos coeficientes de correlação e equações de regressão calculados mediante o uso do programa existente para operação com a calcu-

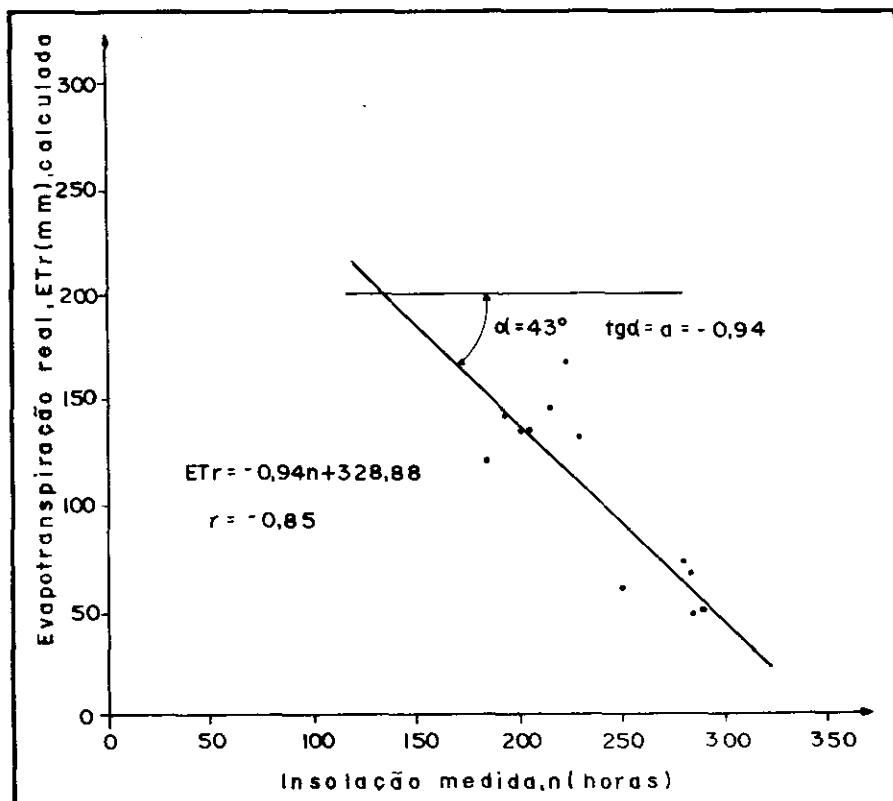


Fig. 3 — Relação linear entre os valores médios mensais da evapotranspiração real, ETr, calculada pelo método de Thornthwaite & Mather, e da insolação medida, em Olinda PE

ladora eletrônica Texas-56 estão mostrados na Tabela 24.

Pelos valores de r vê-se que a melhor correlação entre a evapotranspiração real ETr e a insolação n, é aquela que apresentou o maior coeficiente de correlação r, cujo valor é igual a -0,85. Isto significa que  $100 \times r^2 = 72\%$  da

evapotranspiração real ETr, pode ser explicada pela insolação n.

O sinal negativo de  $r = -0,85$  indica apenas que existe uma certa tendência da evapotranspiração real ETr diminuir à medida que a insolação n aumentar (Figura 3). Esta tendência é maior na época da estiagem (Figura

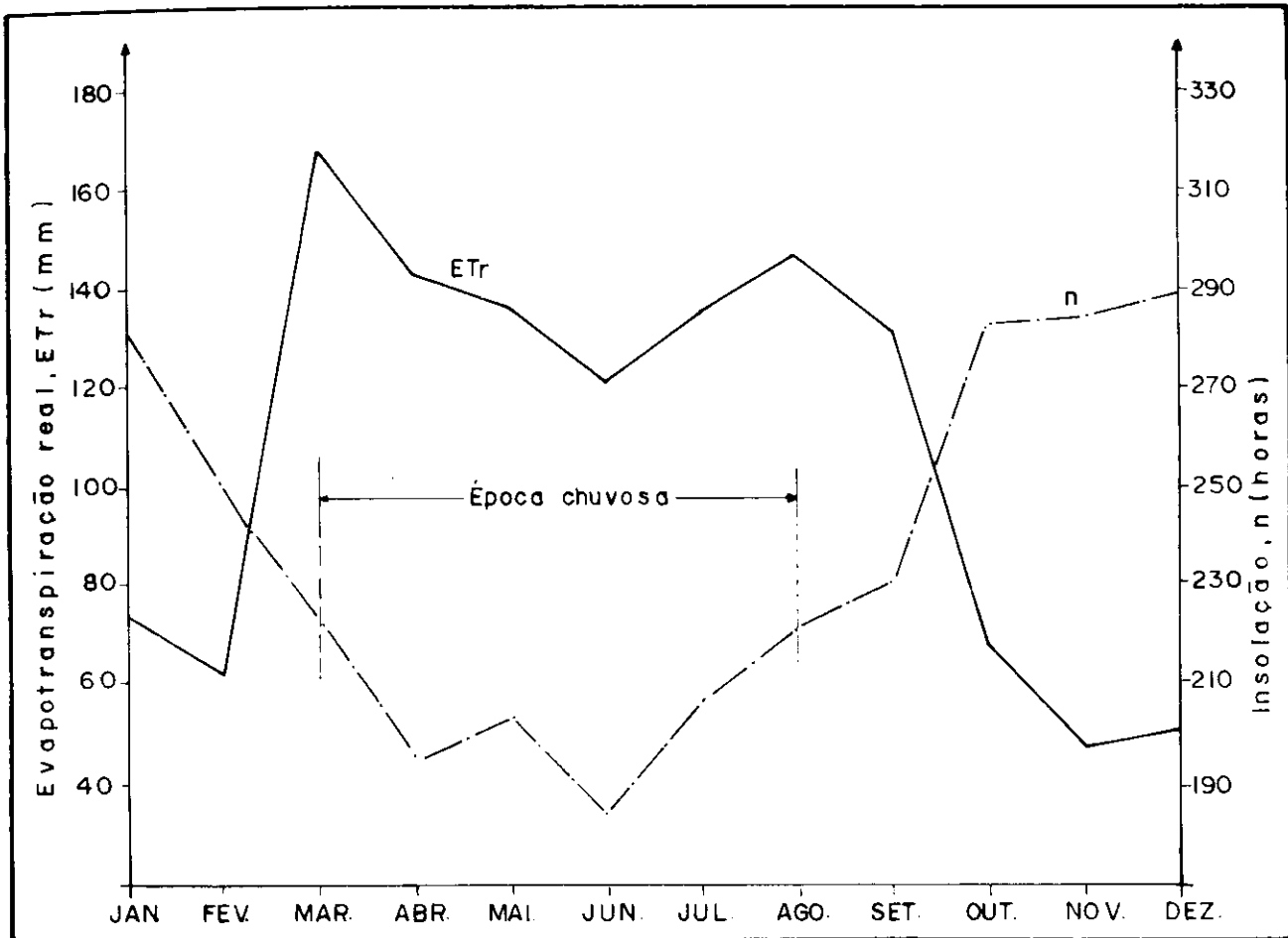


Fig. 4 — Comportamento da evapotranspiração real, ETr (método de Thornthwaite & Mather) com a insolação medida, n, de Olinda, no período de 1943 a 1965.

4), quando, pela deficiência de umidade do solo a vegetação se protege contra a insolação, reduzindo em quantidade e em tamanho suas folhagens, resultando na diminuição da transpiração e, conseqüentemente, da evapotranspiração real ETr.

Para verificar se a amostra considerada era significativa foi feito um teste de significância baseado na estatística z, a um nível de 0,01. O valor de z para o caso foi superior a 2,33 (Tabela 23), pois, substituindo-se, em (25), N e r por seus valores, obteve-se:

$$z = \frac{\sqrt{12-3}}{2} \ln \frac{1-0,85}{1+0,85} = -3,77$$

Portanto, a amostra em questão é significativa existindo uma probabilidade de 99% de haver um ajustamento linear entre a insolação medida n e a evapotranspiração real ETr, calculada pelo método de Thornthwaite & Mather, com os dados da evapotranspiração potencial ETp obtidos pelo método de Penman (Figura 3).

## 6. CONCLUSÃO

Os valores da evapotranspiração real calculados pelo método de Thornthwaite & Mather, mediante a utilização dos valores da evapotranspiração potencial obtidos pelo método de Penman, são os que representam melhor a evapotranspiração real no município de Olinda.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- BRASIL. Sudene — **Evapotranspiração potencial**. (Circulação interna para o inventário hidrogeológico básico). Recife, 1972. 48 p. (Mimeografado).
- **Normas climatológicas da área da Sudene**. Elaborado mediante convênio com o Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura. Recife, 1963. 82 p.
- CAMARGO, A. P. — Balanço hídrico no Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto Agronômico de Campinas**, (116): 24, set. 1971.
- CAMARGO, A. P. — Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto Agronômico de Campinas**, (161): 60 abr. 1966.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. R. — **Hidrologia Subterrânea**. Barcelona, Ediciones Omega, S. A., 1976. t. 1, 1157 p.
- HARGREAVES, G. H. — Necessidade da irrigação e desenvolvimento da água subterrânea. **Revista Água Subterrânea**, São Paulo, 1 (4): 5-19, jan. 1974.
- MARQUES, V. S. — **Sobre as limitações dos evapotranspirômetros**. São Carlos, 1972. 56 p. (Dissertação — Mestrado — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo).
- MILLER, I. & FREUND, J. E. — **Probability and statistics for engineers**. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 1965. 432 p.
- MOTA, F. S. & BEIRSDORF, M. I. C. — Medidas e estimativas da evapotranspiração potencial em Pelotas, Rio Grande do Sul. **Ciência e Cultura**, (s.1.), 28 (6): 666-72, jun. 1976.
- TEIXEIRA, J. A. — A importância da insolação no processo da evapotranspiração no município de Olinda, PE. **Anais do 2.º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas — Núcleo Bahia. Salvador, 1982.
- THORNTHWAITÉ, C. W. & MATHER, J. R. — The water balance. Publication in climatology. **Drexel Institute of Technology**, Centerton, New Jersey, 8 (1): 104, 1955.
- VILLA NOVA, N. A., REICHARDT, K. & ORTOLANI, A. A. — **Principais métodos climatológicos de estimativa e de medida da perda de água de superfícies naturais**. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz". Piracicaba, 1968. 57 p. (Mimeografado).
- VILLELA, S. M. & MATTOS, A. — **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1975. 245 p.