

# BRAGANTIA

Boletim Técnico do Instituto Agrônômico do Estado de São Paulo

Vol. 21

Campinas, Fevereiro de 1962

N.º 12

## CONTRIBUIÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO ESTADO DE SÃO PAULO <sup>1</sup>

A. PAES DE CAMARGO, *engenheiro-agrônomo, Seção de Climatologia Agrícola, Instituto Agrônômico*

### RESUMO

Em baterias de evapotranspirômetros, do tipo "Thornthwaite-modificado" (Mather, 1951), estimou-se a evapotranspiração potencial em base mensal, para as localidades de Pindamonhangaba, Ribeirão Preto e Campinas, tôdas situadas no planalto paulista. Foram empregadas nos evapotranspirômetros, como vasos ou lisímetros, caixas retangulares de cimento-amianto de 0,65 m<sup>2</sup>, vegetadas com grama batatais (*Paspalum notatum* Flügge). Os tanques ou lisímetros, permitem estimar a evapotranspiração potencial pela diferença entre a quantidade de água adicionada cada dois dias ao tanque, como irrigação, mais eventuais precipitações e quantidade de água que sai do tanque por percolação.

Os resultados obtidos mostram que a evapotranspiração potencial apresenta, no planalto paulista, valores aproximadamente duas vêzes mais elevados no verão em relação aos do inverno. Em média ultrapassa 130 mm em janeiro e não alcança 60 mm em julho. Tais resultados diferem bastante dos que se obtêm com os evapôrimetros comuns, de Piche, montados à sombra em abrigos meteorológicos, os quais estimam elemento muito distinto, ou seja, a capacidade evaporativa do ar. Enquanto a evapotranspiração potencial tem seus valores mais elevados nos meses mais quentes do ano, de dezembro a fevereiro, a capacidade evaporativa do ar os têm no período mais sêco, ou seja, de agosto a setembro, quando ultrapassa os 200 mm mensais.

Os valores medidos nos evapotranspirômetros, considerados reais, foram correlacionados com os calculados pelas equações de Thornthwaite (23), de Penman, simplificada por Bavel (1), de Blaney & Criddle (2) e por uma forma modificada desta última, para adaptação às condições locais. As correlações, entre valores medidos e calculados, mostraram-se de modo geral bastante elevadas. Apenas no caso da comparação com os resultados do método de Penman-Bavel verificou-se correlação um

1 Tese de doutoramento apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo. Recebido para publicação em 22 de Janeiro de 1962.

2 Agradecimentos são devidos aos engenheiros-agrônomos Roberto A. Rodrigues, A. Junqueira Reis e Reynaldo Forster, chefes das estações experimentais em que foram instalados os evapotranspirômetros, pela colaboração prestada, bem como ao Serviço do Vale do Paraíba da Secretaria da Viação, à Fundação Rockefeller e ao Instituto Brasileiro do Café pela doação de material e instrumental que permitiram a realização dos trabalhos.

pouco inferior. Nas determinações de Campinas os coeficientes de correlação ( $r$ ), com os valores medidos, obtidos para os quatro métodos de cálculo da evapotranspiração potencial, foram os seguintes: Thornthwaite e Blaney & Criddle modificado = 0,95, Blaney & Criddle original = 0,93, Penman-Bavel = 0,89.

Maior exatidão, ou concordância com os resultados da evapotranspiração potencial medida, também foi obtida com os valores estimados pelos métodos de Thornthwaite e de Blaney & Criddle modificado. O método de Blaney & Criddle original, resultou as maiores discrepâncias com os valores medidos, superestimando acentuadamente os valores durante o inverno e subestimando-os no verão. Por sua vez, o método de Penman-Bavel também apresentou discrepâncias, embora menos acentuadas, subestimando os resultados na estação estival.

Em Campinas, os resultados calculados, pelos quatro métodos, foram em geral mais elevados do que os medidos. O contrário, todavia, ocorreu nas outras duas localidades estudadas. Os totais anuais da evapotranspiração potencial ( $EP$ ) medidos e calculados, segundo Thornthwaite, foram os seguintes para as três localidades:

LOCALIDADE	<i>EP medida</i> mm	<i>EP calculada</i> mm
Campinas .....	962	1.043
Pindamonhangaba .....	1.105	1.003
Ribeirão Preto .....	1.198	1.106

A razão da obtenção em Campinas de valores mais altos da evapotranspiração potencial calculado, parece ser devida ao fato de a temperatura média utilizada no cálculo ter sido anormalmente elevada, por estar o abrigo meteorológico, que forneceu os dados, situado em área urbanizada, distante vários quilômetros da bateria de evapotranspirômetros. Por sua vez, em Pindamonhangaba e em Ribeirão Preto são os valores medidos que parecem estar sobrestimados, possivelmente pelo fato de os gramados internos dos tanques terem se apresentado, em parte do tempo, com porte mais elevado do que a do gramado do terreno circundante.

Nomogramas e tabelas especiais, preparados para o hemisfério sul e empregando unidades do sistema métrico decimal, foram apresentados para facilitar a determinação da evapotranspiração potencial pelos vários métodos de cálculo empregados.

## 1 — INTRODUÇÃO

Para se estimar meteorologicamente as disponibilidades de água no solo não se pode basear apenas em dados da precipitação pluvial, ou seja, nas quantidades de umidade que recebe da atmosfera. Torna-se necessário levar também em conta as perdas de água do solo para a atmosfera, que se verificam normalmente pela evaporação e transpiração vegetal, o processo denominado evapotranspiração. O cotejo dos dados desses dois processos meteorológicos opostos, de um lado a precipitação pluvial e de outro a evapotranspiração, é que permite

através de um sistema de balanço hídrico, estimar com aceitável exatidão os dados sobre as disponibilidades de água no solo, necessários aos trabalhos climatológicos, hidrológicos e outros ligados à economia da água na natureza.

Uma mesma precipitação pluvial poderá mostrar-se elevada e suprir inteiramente o consumo de água pela evapotransposição durante períodos frios, quando esta é baixa, mas mostrar-se, por outro lado, insuficiente e incapaz de atender ao elevado consumo de água, pela evapotransposição, quando se apresenta elevada, como acontece nos meses quentes e de dias longos da estação estival.

Thornthwaite, Wilm, e outros introduziram em 1944 (26) o conceito de evapotranspiração potencial para exprimir a evapotranspiração que normalmente se verifica em um terreno inteiramente vegetado, livremente exposto à atmosfera e onde nunca falte umidade no solo para uso das plantas. É essa forma de evapotranspiração que entra no balanço hídrico, em cotejo com a precipitação, para se estimar meteorologicamente a disponibilidade de água no solo.

A precipitação é um elemento meteorológico de fácil medição, há muito objeto de mensurações regulares em estações meteorológicas e postos pluviométricos. No Estado de São Paulo a pluviometria acha-se mesmo relativamente bem desenvolvida, havendo cartas de isoietas bastante aceitáveis. (21, 22). O contrário, todavia, acontece com a evapotranspiração potencial, que só nos últimos lustros vem recebendo atenção e sendo objeto de determinações, por parte de entidades especializadas.

Normalmente se fazem em estações meteorológicas, determinações da evaporação à sombra, com o evaporímetro de Piche. Entretanto, seus dados se referem a elemento meteorológico muito distinto do representado pela evapotranspiração potencial. Não podem ser utilizados em cotejo com os da precipitação pluvial no balanço hídrico. Na figura 1, que compara o curso anual dos valores mensais da evaporação à sombra, dada pelo Piche, com os da evapotranspiração potencial, calculada pela equação de Thornthwaite (23), para a localidade de Ribeirão Preto, no planalto paulista, pode-se observar que os valores mais altos da evaporação obtida no evaporímetro de Piche ocorrem durante o período mais sêco, de agosto a setembro, quando a umidade relativa do ar se mostra mais baixa. A evapotranspiração potencial, entretanto, segue marcha anual muito diversa. Alcança os valores mais elevados, não durante o período de baixa umidade como a eva-

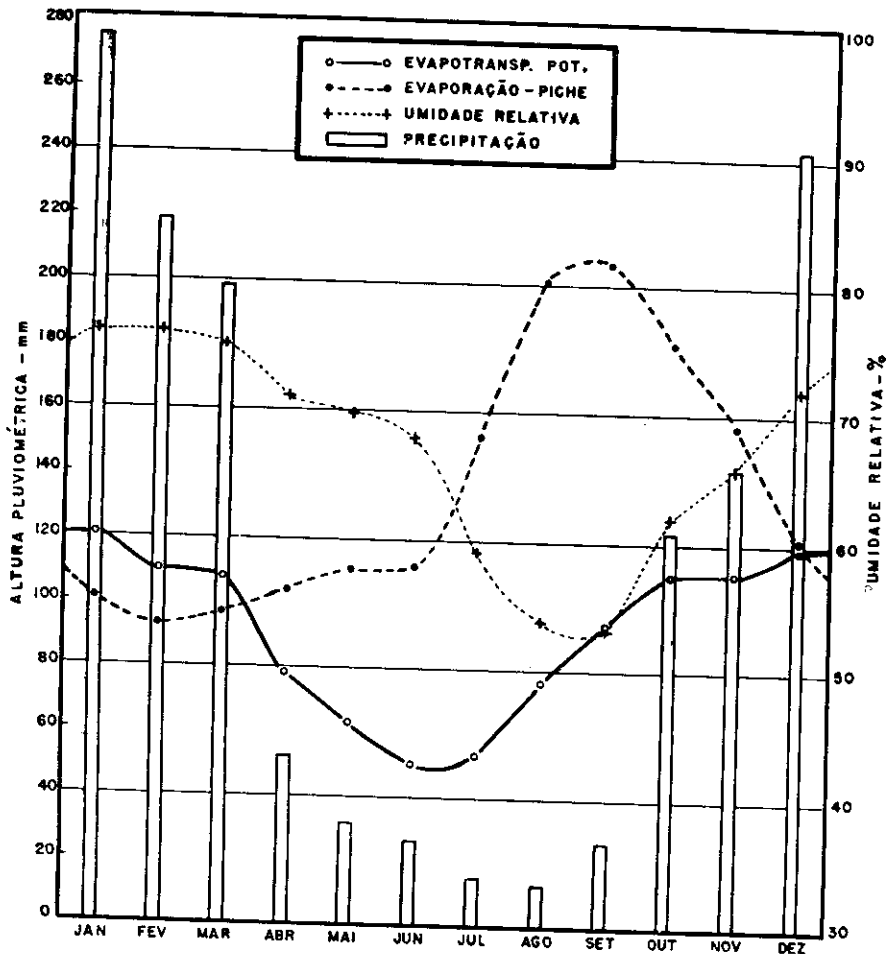


FIGURA 1. — Marcha anual da evapotranspiração potencial, calculada segundo Thorthwaite, da evaporação à sombra, obtida em evaporímetro de Piche, da umidade relativa do ar e da precipitação pluvial, para a localidade de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Valores mensais médios para o período de 1950 a 1960.

poração do Piche, mas sim no período mais quente e de dias mais longos de dezembro a fevereiro, quando mais elevado é o suprimento de energia solar para promover a evaporação. Pode-se notar, no gráfico, nítida correlação entre os dados da umidade relativa e os da evaporação à sombra, segundo o evaporímetro de Piche, cujas curvas guardam quase perfeita simetria. O mesmo não acontece com os dados da evapotranspiração potencial, que não mostram qualquer relação com os da umidade relativa. A evapotranspiração potencial compor-

tando-se de modo inteiramente diferente da evaporação à sombra, face ao fator umidade atmosférica, não poderá pois, ser estimada a partir dos evaporímetros comuns normalmente bastante influenciados por êsse fator.

Para medição da evapotranspiração potencial vêm sendo empregados em vários países, com resultados bastante satisfatórios, evaporímetros segundo Thornthwaite (11), esquematizados na figura 2. Neste trabalho são apresentados os resultados de vários anos de mensurações da evapotranspiração potencial, em três localidades

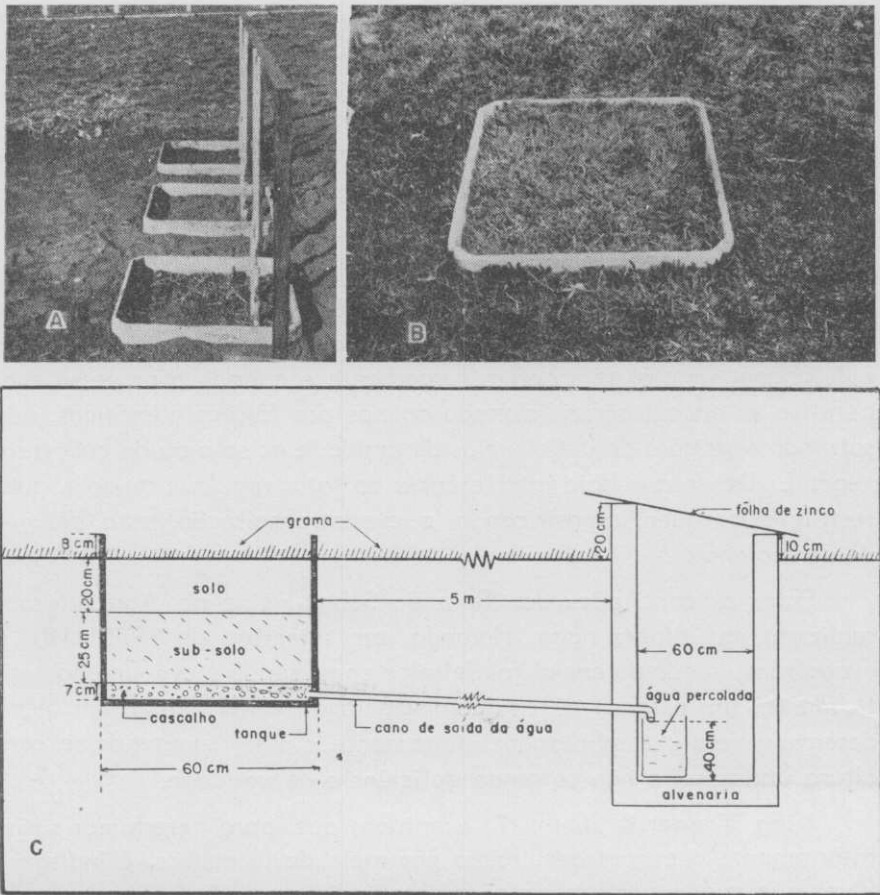


FIGURA 2. — Evapotranspirômetros do tipo "modificado" de Thornthwaite, utilizados nas baterias de Pindamonhangaba, Ribeirão Preto e Campinas: **A** e **B** — aspectos dos tanques dos evaporímetros, antes e após o plantio do gramado; **C** — esquema de um evaporímetro.

do planalto paulista, utilizando-se evapotranspirômetros desse tipo. São também apresentados os resultados da estimativa da evapotranspiração potencial, por vários métodos de cálculo, os quais foram correlacionados com dados dos evapotranspirômetros, visando estabelecer meios práticos e eficientes para a determinação do elemento, nas condições do planalto paulista.

## 2 — REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Reexaminando em 1954 o conceito de evapotranspiração potencial, Thornthwaite (24) discute as várias formas de evaporação e demonstra que as perdas de água observadas ordinariamente nos evaporímetros comuns, de balança ou de Piche, não indicam a evapotranspiração potencial e mostra inexistir qualquer relação direta entre esta e expressões ligadas ao poder evaporativo do ar, como déficit de saturação.

Thornthwaite & Mather (25) acentuam que a evapotranspiração potencial é, em última análise, a evaporação normal entre a superfície natural bem suprida de umidade e a atmosfera e que ocorre quando a folhagem vegetal se mantém turgesciente e quando o processo evaporativo se encontra condicionado apenas por fatores climáticos, não sofrendo restrições de deficiências de umidade no solo ou da cobertura vegetal. Desde que haja interferência do fator umidade no solo, quer restringindo, quer intensificando a evapotranspiração, esta deixará de ser potencial.

Entre as conclusões da "Reunião Sobre Física na Agricultura", realizada em Wageningen, Holanda, em setembro de 1955 (18), a evapotranspiração potencial foi definida como sendo a evaporação verificada em um extenso terreno com vegetação verde, baixa, em pleno desenvolvimento, sombreando inteiramente o solo, mantendo-se com altura uniforme, e não sofrendo deficiência de umidade.

King, Tanner & Suomi (7) acentuam que, para determinar satisfatoriamente a evapotranspiração por meio de lisímetros, é indispensável que sua superfície se apresente indistinguível da área circundante, igualmente vegetada e que tenha as mesmas características microclimáticas. Só assim os dados obtidos poderão ser representativos da evapotranspiração potencial.

Os dados fornecidos pelo evaporímetro de Piche, normalmente montados em abrigos meteorológicos, não exprimem a evaporação de superfície natural ou a evapotranspiração potencial. Indicam, como mostram Prescott & Stirk (19), antes, a capacidade evaporativa do ar, elemento que está diretamente relacionado ao déficit de saturação do bulbo úmido ( $e_w - e_d$ ), seja a diferença entre a pressão de saturação do vapor à temperatura do termômetro de bulbo úmido ( $e_w$ ) e a pressão de saturação do vapor à temperatura do ponto de orvalho ( $e_d$ ). Como o déficit de saturação do bulbo úmido está estreitamente ligado ao déficit de saturação do ar ( $e^a - e_d$ ), onde  $e^a$  é a pressão da saturação do vapor à temperatura do ar, pode-se aceitar que a evaporação à sombra pelo evaporímetro de Piche, ou a capacidade evaporativa do ar, é um elemento meteorológico associado à expressão ( $e^a - e_d$ ).

A evapotranspiração, ou evaporação de superfícies naturais, livremente expostas, está como mostra Penman (17) mais associada à expressão ( $e_s - e_a$ ), cujo termo  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor à temperatura da superfície evaporante livremente exposta. Estando a superfície evaporante ao ar livre, e assim exposta à radiação solar, sua temperatura e conseqüentemente o termo  $e_s$ , ficam em dependência muito mais acentuada do balanço das radiações térmicas, absorvidas e emitidas pela superfície, do que da energia advectiva fornecida pelo ar ambiente, como é o caso da capacidade evaporativa do ar. Quando o ar está saturado de umidade, com o valor da expressão ( $e_a - e_d$ ) igual a zero, a capacidade evaporativa do ar também se anula. O mesmo, todavia, não ocorre com a evaporação natural ou evapotranspiração, desde que haja insolação, pois a energia incidente fará elevar a temperatura da superfície evaporante e, conseqüentemente, o valor da expressão ( $e_s - e_d$ ), que condiciona a perda de água (24).

Quando um pequeno canteiro sem deficiência de umidade no solo estiver circunscrito por extenso terreno sêco, a evaporação e a transpiração vegetal naquela área úmida, espécie de oásis, poderão se elevar muito acima do nível potencial. Isso porque a energia da radiação solar incidente na área sêca circundante, sendo utilizada em maior escala para aquecer e aumentar a capacidade evaporativa do ar ambiente, afetará e fará elevar a evapotranspiração na pequena área úmida, que dispõe de água para evaporar. Essa evapotranspiração, anormalmente elevada da área úmida, ficará assim condicio-

nada, ao mesmo tempo, pela energia térmica líquida, resultante do balanço do calor na superfície evaporante e pela energia advectiva, trazida pelo ar em movimento, das áreas adjacentes mais secas e aquecidas. A esta evapotranspiração, que poderá se mostrar excepcionalmente elevada em condições de deserto, Penman (17) denominou evaporação de oásis ou de meio-deserto. Os evaporímetros com a superfície evaporante exposta ao ar livre indicam essa forma de evaporação, que é muito diferente da potencial. Para se ter a evaporação ou evapotranspiração potencial, o requisito fundamental é manter a superfície evaporante como parte integrante da área circundante e igualmente bem suprida de umidade.

Os dados de evaporação comumente obtidos em tanques de superfície livre de água (Evaporation pans), nem sempre indicam a evapotranspiração potencial, mas sim, freqüentemente, uma combinação desta com a evaporação de oásis. Köhler (8) mostra que eles variam consideravelmente, não apenas segundo o tipo, dimensão, profundidade, exposição do tanque, mas, especialmente, segundo as variações dos fatores aerodinâmicos e dos ligados às trocas energéticas entre a água do tanque e a atmosfera.

Mather (11) chama a atenção para o fato de que tendo os tanques de superfície livre de água extensão muito limitada, a evaporação torna-se, muitas vezes, função da sua área. Acentua que esse efeito varia com a aridez da região e que os tanques de água livre não são, necessariamente, maus indicadores da evapotranspiração potencial, mas que assim se tornam, quando expostos incorretamente. De modo geral, quanto mais seca for a estação do ano, ou a região, maiores serão os erros da má exposição dos tanques e o aumento da evapotranspiração medida.

Dados obtidos por Pruitt (20), no verão de 1955, em Washington, E.U.A., com evaporímetros de tanque, acusaram variações de até 68% na evaporação, devidas unicamente às diferenças de exposição e de dimensões da superfície de água livre dos instrumentos. Enquanto num tanque de 180 cm de diâmetro, enterrado ao nível do solo e situado no centro de terreno vegetado e irrigado obteve-se uma evaporação índice igual a 1, em outro tanque do tipo padrão (USWB Class A pan), de 120 cm de diâmetro, tendo o bordo a 40 cm de altura, a evaporação índice subiu a 1,36, ou seja 36% a mais. Entre dois tanques de 60 cm de diâmetro, ambos instalados ao nível do solo, um deles porém, situado no centro de terreno vegetado e irrigado, de 12 x 30 m,



onde a vegetação transpirava normalmente, e outro situado 180 m adiante, em terreno nu, sem irrigação alguma, portanto sofrendo acentuado efeito de oásis, as evaporações índices variam de 1,13, no primeiro caso, para 1,45, no segundo. Houve, assim, um aumento de cerca de 28%, devido, unicamente, à energia advectiva suplementar disponível na superfície do tanque no segundo caso.

Com os lisímetros vegetados, como se empregam nos evapotranspirômetros de Thornthwaite (9), esses efeitos de exposição são substancialmente reduzidos, podendo-se obter satisfatoriamente, a evapotranspiração potencial, desde que se exponham corretamente os vasos vegetados, cercandos-os com suficiente área tampão de idêntica cobertura vegetal.

Em períodos secos, a evapotranspiração poderá ser consideravelmente restringida por falta de umidade no solo. Nesses casos, a atmosfera, recebendo menor quantidade de água do solo [redução de termo  $e_d$  da expressão  $(e_a - e_d)$ ] e, ao mesmo tempo, aquecendo-se mais intensamente pela maior proporção da radiação solar transformada em calor sensível (aumento do termo  $e_a$ ), terá o seu déficit de saturação e a sua capacidade evaporativa consideravelmente aumentados. Assim, o déficit de saturação como acentuam Deacon, Pristly & Swinbank poderá constituir um índice reverso da evapotranspiração, pois, exatamente quando baixa a evapotranspiração, por deficiência de umidade no solo, aumenta o déficit de saturação do ar.

A evapotranspiração ou evaporação natural restringida, que ocorre em determinado período, em consequência de deficiência de umidade no solo, é chamada real ou atual. Sua determinação lisimétrica também é possível, mas tornam-se necessárias instalações dispendiosas e de grandes dimensões sobre balança; como os empregados por Harold & Dreibelbis (6), em Coshocton, E.U.A., ou os do tipo flutuante propostos por King, Tanner & Suomi (7).

Embora possa a evaporação, como elemento meteorológico, ser tomada sob diferentes acepções, é na de evapotranspiração potencial que encontra maior aplicação nos campos da agricultura e hidrologia. É nessa acepção que o elemento exprime a perda de água de um terreno vegetado para a atmosfera, podendo ser expresso em milímetros pluviométricos e serem os dados cotejados, em balanço hídrico, com os da precipitação pluvial para determinação das disponibilidades de água no solo e das limitações hídricas climáticas de uma região (3, 23).

### 3 — MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1 — MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Para a medição da evapotranspiração potencial empregou-se o evapotranspirômetro de Thornthwaite, do tipo simplificado em Idaban, Nigéria (9). Como mostram as fotografias e o esquema da figura 2, são instalações constituídas de lisímetros enterrados de forma a ficar a superfície vegetada ao mesmo nível da do terreno circundante, e com dispositivos para permitir o recolhimento da água percolada em recipientes apropriados para a sua medição.

A diferença entre a quantidade de água recebida pelo vaso, por precipitação pluvial mais irrigações suplementares, e a quantidade de água perdida, por percolação, corresponde à evapotranspiração potencial do período.

Quando as precipitações não se mostram suficientes para causar percolações, são feitas irrigações periódicas, pela superfície, em quantidades apenas suficientes para provocar pequena percolação.

Tanto os lisímetros como o terreno circundante foram vegetados com grama batatais (*Paspalum notatum* Flügge). Esta grama já vem sendo usada com sucesso em regiões sub-tropicais, inclusive na Flórida, E.U.A. (12). Em geral, ela atende aos requisitos necessários para proporcionar cobertura vegetal satisfatória nos evapotranspirômetros: cobre bem e uniformemente o terreno; mantém-se verde e turgescente o ano todo, desde que não haja deficiência de umidade no solo; não é dominada facilmente por plantas invasoras; vegeta bem quer em solos continuamente úmidos, como o dos tanques dos evapotranspirômetros, quer em solos, sujeitas a alguma deficiência de água, como aqueles dos terrenos circundantes aos vasos; sua vegetação é rústica e presta-se muito bem à prática da poda para manutenção do gramado em altura conveniente.

Em relação às instalações de Idaban, fêz-se uma pequena modificação. Em vez dos tambores de metal, de 0,25 m<sup>2</sup> de boca, considerados muito pequenos e incapazes de resistir à ação do tempo, foram utilizadas, para montagem dos lisímetros, caixas retangulares de cimento-amianto, com área de 0,54 m<sup>2</sup> de boca e 0,60 m<sup>2</sup> de profundidade, de modelo padrão encontrado no mercado. Para se ter indicação de reprodutividade, ou precisão dos dados, os evapotranspirômetros foram

instalados em baterias de três evapotranspirômetros ou lisímetros praticamente iguais.

Visando obter a evapotranspiração em forma potencial, procurou-se atender aos seguintes requisitos: a) manter o solo adjacente aos lisímetros, cêrca de dez metros de cada lado, com umidade suficiente para conservar o gramado bem turgescente, visando prover área-tampão (buffer area); b) conservar a vegetação cobrindo uniformemente tôda a superfície interna e externamente aos lisímetros, para que êstes constituam amostra bem representativa e com as mesmas características microclimáticas do terreno circundante.

As baterias de evapotranspirômetros foram montadas em três das estações experimentais do Instituto Agronômico, situadas tôdas no planalto paulista, em região com a classificação climática *Cwa* de Koepen (22), caracterizada por apresentar inverno sêco e verão úmido. A primeira bateria foi instalada em Pindamonhangaba, no Vale do Paraíba, em 1953, e as outras duas em Ribeirão Prêto e Campinas, em 1954 e 1955, respectivamente. Tôdas ficaram ao lado dos respectivos observatórios meteorológicos.

O quadro 1 indica as características geográficas e climáticas das localidades em que se instalaram as baterias de evapotranspirômetros.

QUADRO 1. — Dados geográficos e climáticos das localidades do planalto paulista em que foram instalados os evapotranspirômetros.

Localidades	Latitu- de S	Longitu- de W	Alti- tude	Precipi- tação anual normal	Temperatura média anual (max+min)/2	
					Normal	Para o perío- do de obser- vações
Pindamonhangaba	22°-58'	45°-25'	570	1 300*	21,4*	21,1
Ribeirão Prêto . . . .	21°-11'	47°-48'	620	1 370	22,5	22,3
Campinas . . . . .	22°-54'	47°-04'	670	1 280	21,4	21,6

\* Dados para Taubaté, localidade situada 15 km distante e com semelhante configuração topográfica.

### 3.1.1. — MONTAGEM E OPERAÇÃO DOS EVAPOTRANSPIRÔMETROS

Encheram-se os tanques dos evapotranspirômetros com a mesma terra retirada das covas em que foram enterrados, dispendo-se a camada superficial do solo, primeiros 20 cm separada da do subsolo. Antes, porém, a terra foi bem peneirada, para homogenização e retiradas de pedra, raízes e outros corpos estranhos. Assim, os três tanques de cada bateria ficaram cheios com idêntico material, não havendo diferenças entre êles, devidas ao fator solo.

Em evapotranspirômetros não é necessário usar solos de estrutura natural, desde que o elemento a ser medido é meteorológico e independente das propriedades do solo. Êste, no caso, tem apenas a função de sustentar e possibilitar o desenvolvimento normal da cobertura vegetal, cuja evapotranspiração potencial vai ser medida. Em solos de estrutura natural a presença de pedras, raízes, galerias, camadas adensadas e outras irregularidades poderão afetar a drenagem e o desenvolvimento das plantas, descontrolando e prejudicando os resultados.

No fundo de cada tanque, para facilitar a drenagem, colocou-se uma camada de pedra britada fina, de cêrca de 8 cm de espessura, cobrindo-se esta com pequena camada de areia grossa. No caso dos evapotranspirômetros de Pindamonhangaba, onde o solo, de formação terciária, é argiloso e pouco permeável (13), adicionou-se turfa na proporção de uma parte desta para seis partes de terra, visando aumentar a permeabilidade.

A análise mecânico-física da mistura de terra e turfa dos tanques de Pindamonhangaba, efetuada pela Seção de Agrogeologia do Instituto Agronômico, apresentou o seguinte resultado: argila = 28,3%; limo = 43,1%; areia grossa = 28,7%; umidade de murchamento = 12,2%; umidade equivalente = 18,1%; capacidade de campo = 31,3%.

Nos casos dos evapotranspirômetros de Ribeirão Prêto e de Campinas, respectivamente em região de "terra-roxa-legítima" e de "terra-roxa-misturada", ambas com elevada permeabilidade (13), foram colocados nos tanques os mesmos solos retirados dos locais, sem acréscimo de qualquer material estranho.

As baterias de evapotranspirômetros de Pindamonhangaba, de Ribeirão Preto e de Campinas foram instaladas, respectivamente, em meados dos anos de 1953, 1954 e 1955. Os dados dos primeiros seis meses de operação ficaram, todavia, sem efeito pelo fato de o gramado não estar cobrindo ainda inteiramente a superfície interna e externa dos vasos como é necessário e por não se achar o solo do tanque bem estabilizado. Assim, só a partir do mês de janeiro dos anos seguintes, quando os evapotranspirômetros entraram em regime normal de funcionamento, os dados foram aproveitados.

Os tanques foram irrigados pela superfície. Nos primeiros meses em grande quantidade e diariamente, o que provocou excessiva umidade e demasiada lixiviação. Esse fato prejudicou o desenvolvimento da grama nos tanques pela deficiência de aeração e arrastamento do nitrogênio do solo. Para contornar a dificuldade foram feitas aplicações parceladas de adubo nitrogenado ao mesmo tempo em que espaçaram-se mais as irrigações, fazendo-as somente no dia seguinte ao da última percolação e em quantidade mínima, apenas suficiente para provocar pequena drenagem.

Regando-se com quantidades mínimas, em dias alternados, e apenas quando não havia água percolada a recolher, a umidade no solo foi mantida próxima à capacidade de campo, em condições de manter a turgescência e proporcionar vegetação normal do gramado. Tensiómetros instalados a diferentes profundidades no solo dos vasos, indicavam tensões constantemente baixas, variáveis entre 30 e 50 milímetros de mercúrio.

Para operação e manuseio dos evapotranspirômetros, foram adotadas as seguintes normas:

1. Manter a grama interna e externa dos vasos com a mesma densidade e porte, por meio de ceifas, replantas, acréscimo de terriço, de adubação etc.. Sempre que a vegetação do tanque der sinal de amarelecimento, pela deficiência de nitrogênio, aplicar, em cobertura, cerca de 30 gramas de sulfato de amônio, ou outro adubo nitrogenado solúvel, em cada tanque.
2. Efetuar as coletas e mensurações de água percolada, bem como as regas dos tanques, pela manhã, logo depois da observação meteorológica das 7 horas.
3. Adotar uma "base de rega" uniforme, para os três tanques da bateria. Essa base não será alterada enquanto proporcionar, em todos os tanques, pequeno percolado, de menos de um litro, no dia seguinte à rega.

4. Quando necessário, alterar a "base de rega", a intervalos invariáveis de um litro, aumentando-a quando insuficiente e reduzindo-a quando excessiva.
5. Havendo percolação durante dois ou mais dias seguidos, em período sem chuvas, é sinal de que a "base de rega" está muito elevada. Deve então ser reduzida de um litro em cada irrigação subsequente, até que se obtenha apenas uma pequena percolação, inferior a um litro por tanque. Por outro lado, se não houver percolado algum, em um ou mais tanques, no dia posterior ao da rega, é sinal de que a "base de rega" está baixa, devendo ser aumentada de um litro, de cada vez, até a obtenção da percolação desejada. Normalmente, os regas e os recolhimentos dos percolados são feitos em dias alternados, a não ser por ocasião de chuvas abundantes, quando o percolado poderá ser recolhido e medido diariamente e até mesmo várias vezes por dia.
6. Durante os períodos secos, irrigar o gramado da área circundante aos vasos dos evapotranspirômetros, na maior extensão possível e a intervalos aproximados de uma semana, com água suficiente para manter a vegetação verde, turgescente, visando prover a necessária área-tampão.

### 3.1.2. — PROCESSAMENTO DOS DADOS

As quantidades de água aplicadas como irrigação e as correspondentes às percolações recolhidas em cada tanque da bateria, bem como as precipitações pluviais, são lançadas em quadros especiais, para dez dias. Com os totais de cada decênio, expressos originalmente em litros por tanque, e depois transformados em milímetros, é determinada a evapotranspiração potencial para dez dias, segundo a expressão:

$$e = I + P - D$$

onde  $e$  é a evapotranspiração potencial,  $I$  a irrigação,  $P$  a precipitação e  $D$  a drenagem, ou o percolado recolhido.

Com os dados decendiais da evapotranspiração potencial assim obtidos, determinaram-se os valores mensais, individualmente, para cada tanque das baterias, os quais estão apresentados graficamente na fig. 3. Os valores médios mensais da precipitação, irrigação, percolação e evapotranspiração, para cada bateria, são dados no quadro 2

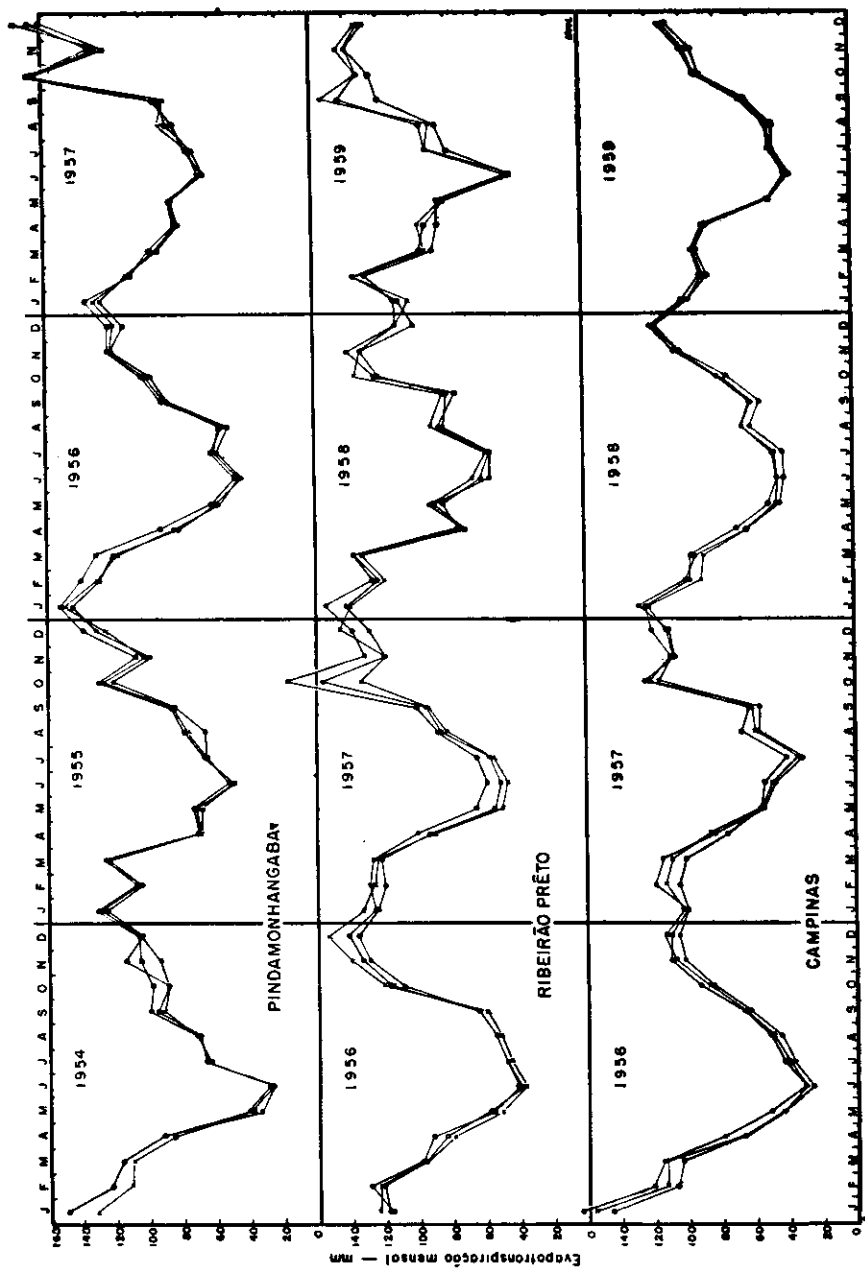


FIGURA 3. — Valores mensais da evapotranspiração potencial medidos individualmente em cada evapotranspirômetro nas baterias das localidades de Pindamonhangaba, Ribeirão Preto e de Campinas, durante períodos de cinco anos de observações.

QUADRO 2. — Dados mensais médios de precipitação, irrigação, percolação e evapotranspiração potencial, das baterias de evapotranspirômetros de Pindamonhangaba, Ribeirão Preto e de Campinas, durante o período de 1954 a 1959. Valores em milímetros

Meses	Pindamonhangaba				Ribeirão Preto				Campinas			
	Precipitação	Irrigação	Percolação	Evap. potencial	Precipitação	Irrigação	Percolação	Evap. potencial	Precipitação	Irrigação	Percolação	Evap. potencial
<b>1954</b>												
Janeiro ...	66	364	290	140	—	—	—	—	—	—	—	—
Fevereiro ...	205	177	265	117	—	—	—	—	—	—	—	—
Março ...	170	128	185	113	—	—	—	—	—	—	—	—
Abril ...	72	117	101	88	—	—	—	—	—	—	—	—
Maio ...	121	75	158	38	—	—	—	—	—	—	—	—
Junho ...	17	37	26	28	—	—	—	—	—	—	—	—
Julho ...	13	80	28	65	—	—	—	—	—	—	—	—
Agosto ...	0	105	33	72	—	—	—	—	—	—	—	—
Setembro ...	35	105	45	95	—	—	—	—	—	—	—	—
Outubro ...	125	60	94	91	—	—	—	—	—	—	—	—
Novembro ...	91	98	85	104	—	—	—	—	—	—	—	—
Dezembro ...	129	72	96	105	—	—	—	—	—	—	—	—
Ano ...	1.044	1.418	1.406	1.056	—	—	—	—	—	—	—	—
<b>1955</b>												
Janeiro ...	236	49	159	126	209	92	149	152	—	—	—	—
Fevereiro ...	29	93	17	105	151	82	95	138	—	—	—	—
Março ...	154	85	115	124	262	39	188	113	—	—	—	—
Abril ...	75	58	63	70	110	45	64	91	—	—	—	—
Maio ...	42	72	44	70	20	75	12	83	—	—	—	—
Junho ...	13	58	21	50	14	51	21	44	—	—	—	—
Julho ...	3	79	16	66	0	66	7	59	—	—	—	—
Agosto ...	46	72	44	74	33	74	30	77	—	—	—	—
Setembro ...	2	96	13	85	0	107	8	99	—	—	—	—
Outubro ...	76	84	35	125	127	71	86	112	—	—	—	—
Novembro ...	108	59	65	102	100	53	58	95	—	—	—	—
Dezembro ...	233	66	168	131	333	34	242	125	—	—	—	—
Ano ...	1.017	871	760	1.128	1.359	789	960	1.188	—	—	—	—
<b>1956</b>												
Janeiro ...	41	134	28	147	88	66	35	119	100	136	81	155
Fevereiro ...	290	70	228	132	163	59	97	125	189	40	115	114
Março ...	187	51	115	123	33	81	17	97	166	90	145	111
Abril ...	140	68	123	85	81	48	44	85	102	80	111	71
Maio ...	75	51	67	59	76	33	54	55	126	24	104	46
Junho ...	52	42	49	45	58	15	34	39	56	23	50	29
Julho ...	30	53	24	59	40	28	20	48	54	30	43	41
Agosto ...	65	65	76	54	63	44	54	53	77	46	74	49
Setembro ...	60	65	36	89	71	50	57	64	83	61	78	66
Outubro ...	125	48	74	99	257	79	220	116	92	79	83	88
Novembro ...	33	96	9	120	23	107	1	129	21	112	26	107
Dezembro ...	199	39	120	118	237	59	152	144	148	72	111	109
Ano ...	1.297	782	949	1.130	1.190	669	785	1.074	1.214	793	1.021	986



QUADRO 2. — (continuação)

Meses	Pindamonhangaba				Ribeirão Preto				Campinas			
	Precipitação	Irrigação	Percolação	Evap. potencial	Precipitação	Irrigação	Percolação	Evap. potencial	Precipitação	Irrigação	Percolação	Evap. potencial
<b>1957</b>												
Janeiro ...	229	74	173	130	235	19	127	127	363	38	300	101
Fevereiro ...	192	34	117	109	304	23	202	125	188	42	118	112
Março ...	185	41	132	94	198	44	118	124	214	98	204	108
Abril ...	45	69	33	81	96	51	53	94	55	91	64	82
Maió ...	35	78	29	84	122	46	111	57	2	84	30	56
Junho ...	22	72	29	65	16	50	14	52	48	61	59	50
Julho ...	32	62	21	73	100	45	86	59	112	31	107	36
Agosto ...	31	71	16	86	66	66	46	86	68	54	61	61
Setembro ...	124	46	81	89	115	51	70	96	139	30	109	60
Outubro ...	116	156	105	167	114	104	63	155	96	106	81	121
Novembro ...	108	61	42	127	129	75	81	123	94	102	88	108
Dezembro ...	83	107	23	167	155	54	72	137	168	68	121	115
Ano ...	1.202	871	801	1.272	1.650	628	1.043	1.235	1.547	805	1.342	1.010
<b>1958</b>												
Janeiro ...	—	—	—	—	217	95	167	145	318	80	273	125
Fevereiro ...	—	—	—	—	178	66	122	122	157	79	140	96
Março ...	—	—	—	—	193	60	118	135	118	68	92	94
Abril ...	—	—	—	—	119	51	97	73	100	68	102	66
Maió ...	—	—	—	—	140	33	85	88	173	34	161	46
Junho ...	—	—	—	—	40	56	35	61	89	64	109	44
Julho ...	—	—	—	—	21	46	10	57	18	50	22	46
Agosto ...	—	—	—	—	11	82	8	85	1	90	27	64
Setembro ...	—	—	—	—	66	74	60	80	97	44	82	59
Outubro ...	—	—	—	—	184	47	105	126	110	66	97	79
Novembro ...	—	—	—	—	66	88	19	135	135	88	119	104
Dezembro ...	—	—	—	—	143	60	96	107	96	93	70	119
Ano ...	—	—	—	—	1.378	758	922	1.214	1.412	824	1.294	942
<b>1959</b>												
Janeiro ...	—	—	—	—	495	17	404	108	219	36	155	100
Fevereiro ...	—	—	—	—	69	101	37	133	90	57	59	88
Março ...	—	—	—	—	200	22	127	95	127	45	79	93
Abril ...	—	—	—	—	42	67	15	94	75	69	57	87
Maió ...	—	—	—	—	52	46	34	84	30	60	40	50
Junho ...	—	—	—	—	9	48	14	43	8	51	22	37
Julho ...	—	—	—	—	0	89	1	88	0	61	14	47
Agosto ...	—	—	—	—	50	57	17	90	91	34	76	49
Setembro ...	—	—	—	—	22	123	6	139	18	76	30	64
Outubro ...	—	—	—	—	106	100	76	130	125	62	96	91
Novembro ...	—	—	—	—	176	47	82	141	227	28	158	97
Dezembro ...	—	—	—	—	184	43	97	130	214	41	144	111
Ano ...	—	—	—	—	1.405	780	910	1.275	1.224	620	930	914

## 3.2 — CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Apesar de bastante viável, a determinação da evapotranspiração potencial por meio dos evapotranspirômetros se mostra aplicável apenas em observatórios meteorológicos especializados ou estações experimentais aparelhadas para o trabalho. Por essa razão procura-se determinar esse valor a partir de elementos meteorológicos padrões, de mais fácil medição e regulamento observados em estações meteorológicas comuns. Estimando-se a evapotranspiração a partir desses elementos, torna-se possível a reconstituição do balanço hídrico e o levantamento das disponibilidades de água no solo correspondentes a períodos anteriores os quais, muitas vezes, se tornam necessários à interpretação de ensaios experimentais de campo conduzidos nesses períodos.

São conhecidos, hoje, vários métodos baseados em diferentes princípios para cálculo da evapotranspiração potencial partindo de elementos meteorológicos comuns. Neste trabalho são empregados e estudados os métodos de Thornthwaite (23), de Penman (15) segundo nomograma de Bavel (1), de Blaney & Criddle (2) e uma modificação deste último adaptada às condições locais.

**Método de Thornthwaite** — É baseado em equação empírica, derivada da correlação de dados da evapotranspiração, medida em evapotranspirômetros e em bacias hidrográficas, com dados da temperatura média diária e da duração do dia Thornthwaite (23). A equação básica para um mês de 30 dias é:

$$e = 1,6 (10 t/I)^a$$

onde  $e$  é a evapotranspiração não ajustada, em  $cm$ ;  $t$ , a temperatura média do mês, em  $^{\circ}C$ ;  $I$ , um índice de calor correspondente à soma de 12 índices mensais  $i$ , dados pela expressão,  $i = (t/5)^{1,514}$ ; e  $a$ , uma função cúbica de  $I$ . Para se obter a evapotranspiração potencial mensal, o valor  $e$  é ajustado tendo em conta a duração do dia e o número do mês.

A equação de Thornthwaite é complexa, mas pode ser facilmente aplicada com auxílio de nomogramas (figura 4) e tabelas especiais (quadro 3), que tornam as determinações bastante simples e rápidas.

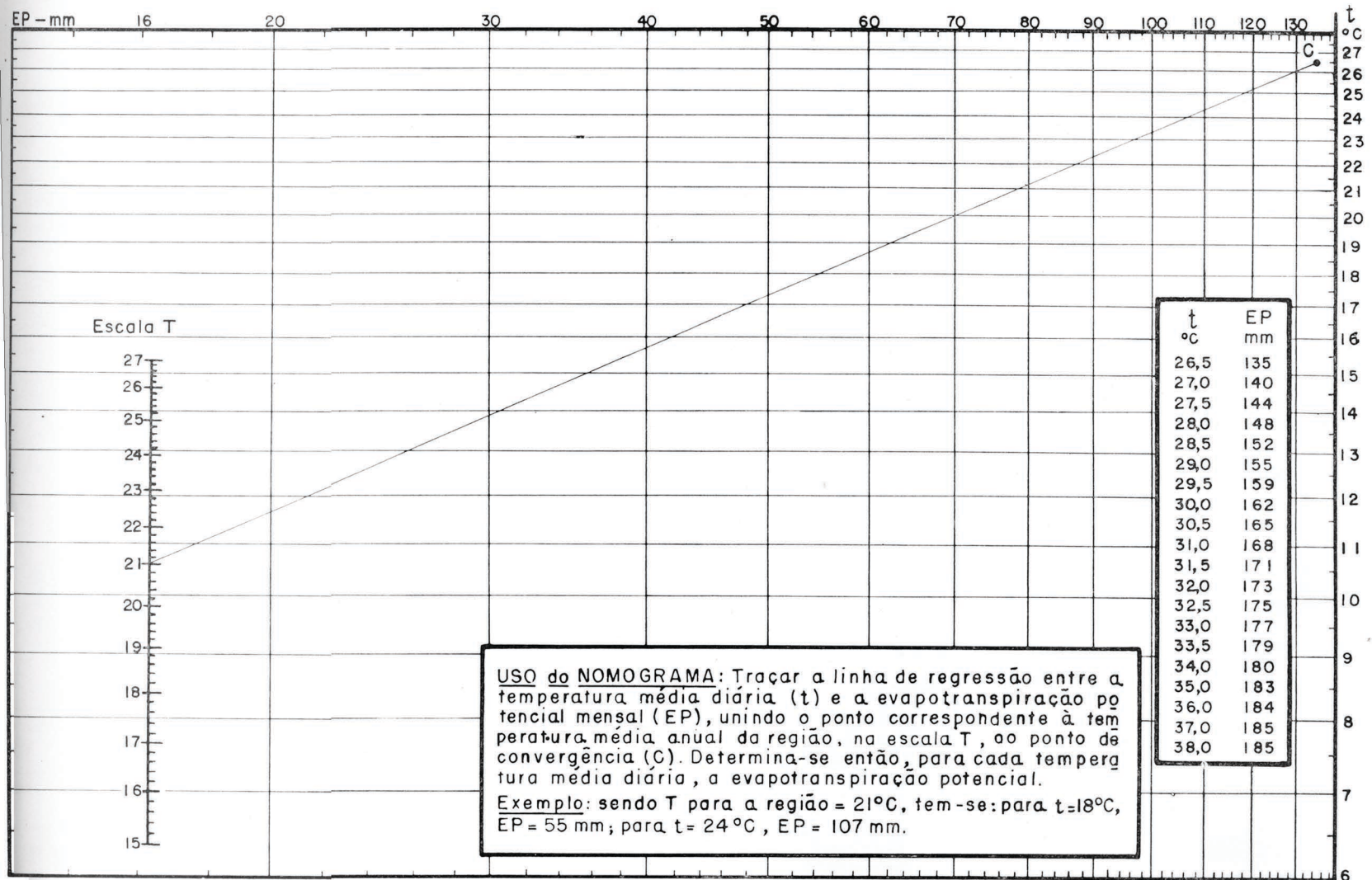


FIGURA 4. — Nomograma para cálculo da evapotranspiração potencial mensal em função da temperatura média anual normal e da temperatura média do mês considerado, segundo método de Thornthwaite. No caso de temperaturas mensais superiores a 26,5°C, usar a tabela inclusa. Para ajuste dos valores ao número de dias do mês e à duração do brilho solar, usar os fatores de correção apresentados no quadro 3.

QUADRO 3. — Fatores de correção da evapotranspiração potencial mensal, dado pelo nomograma de Thornthwaite (figura 4) para ajustá-la ao número de dias do mês e à duração do brilho solar diário, nos vários meses do ano e latitudes entre 15 graus norte e 37 graus sul.

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agô	Set	Out	Nov	Dez
15° N .....	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
10° N .....	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5° N .....	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
Equador .....	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5° S .....	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10° S .....	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15° S .....	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20° S .....	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22° S .....	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23° S .....	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24° S .....	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25° S .....	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26° S .....	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27° S .....	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28° S .....	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29° S .....	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30° S .....	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31° S .....	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32° S .....	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33° S .....	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34° S .....	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,16	1,24
35° S .....	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
36° S .....	1,24	1,04	1,06	0,94	0,88	0,81	0,86	0,94	1,00	1,13	1,17	1,26
37° S .....	1,25	1,05	1,06	0,94	0,88	0,80	0,86	0,93	1,00	1,14	1,18	1,27

Fonte: Burgos, J. J. & Vidal, A. L. Los climas de la República Argentina segun la nueva clasificacion de Thornthwaite. Buenos Aires. Servicio Meteorológico Nacional. 1951, 32 p (Publication N.º 3, Série Agrometeorológica).

Para facilitar ainda mais o cômputo da evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite, Camargo (4), baseado em sugestão de Palmer & Havens (14), substitui, no nomograma, o índice  $I$  por um índice  $T$  correspondente diretamente à temperatura média anual da região, em graus centígrados. Os citados autores verificaram haver em grande número de casos estreita correlação entre os índices  $I$  e a temperatura média. Thornthwaite, aliás, introduziu o índice  $I$ , apenas porque um índice  $T$ , baseado diretamente na temperatura anual média, não se mostra satisfatório em regiões onde essa média é afetada por temperaturas inferiores ao ponto de congelamento (23).

A figura 4, traz o nomograma referido, para determinação da evapotranspiração potencial mensal para um mês indeterminado, de trinta dias, baseado na temperatura média do mês em causa e na temperatura média anual, ou seja, no índice  $T$ , da região.

No quadro 3 são encontrados os fatores de correção ( $F$ ), para ajustar a evapotranspiração mensal ao comprimento do dia e ao número de dias do mês, nos doze meses do ano para as latitudes do hemisfério sul. O produto da multiplicação do valor da evapotranspiração mensal não ajustada, obtida no nomograma, pelo fator de correção ( $F$ ), corresponde à latitude do lugar e ao mês considerado, dará a evapotranspiração potencial mensal procurada.

**Método de Penman** — É uma tentativa de colocar a estimativa da evapotranspiração potencial em bases físicas, mais racionais, utilizando-se de dados meteorológicos colhidos em estações convenientes. São duas as equações empregadas (16). A primeira, que estima o poder secativo do ar, é a seguinte:

$$E_n = 0,35 (e_n - e_a) (1 + 0,01 u) \text{ mm/dia}$$

onde  $E_n$  = uma quantidade auxiliar;  $e_n$  = pressão de saturação do vapor à temperatura média do ar, em  $\text{mm Hg}$ ;  $e_a$  = pressão de saturação do vapor à temperatura média do ponto de orvalho;  $u$  = velocidade do vento, em milhas por dia. A segunda equação é uma determinação da energia disponível para evaporação e aquecimento  $H$ , que é:

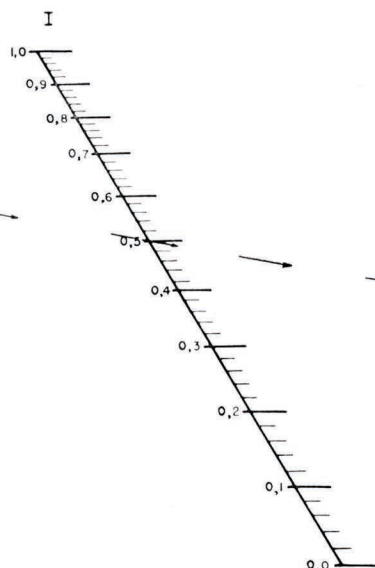
$$H = 0,95 R_A (0,18 + 0,55 u/N) - \sigma T_n^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_n}) \\ (0,10 + 0,90 u/N)$$

# NOMOGRAMA PARA CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Segundo: PENMAN - BAVEL

**PROCESSO:** a) ligue com linha reta os valores de RS e de I, nas escalas respectivas; b) ligue a interseção dessa reta e a linha central, com o valor de T na escala correspondente e prolongue essa linha reta até encontrar, na escala EP, o valor procurado da evapotranspiração potencial.

MILÍMETROS por DIA



T

RS - RADIÇÃO SOLAR — mm / dia  
 I — INSOLAÇÃO — % do possível  
 T — TEMPERATURA MÉDIA do AR — °C  
 EP — EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL — mm / dia

EP

MILÍMETROS por DIA

McvL

FIGURA 5. — Nomograma de Bavel para determinação da evapotranspiração potencial diária (EP), segundo método de Penman, em função da radiação solar recebida no topo da atmosfera (RS) dada em milímetros de evaporação equivalente, da insolação relativa (I) e da temperatura média do ar (T). Os valores de RS para o dia 15 de cada mês obtêm-se no quadro 4; os de I, correspondem à razão entre o número de horas reais de insolação e o número máximo possível para o caso, obtido no quadro 5. Para determinação de valores mensais de EP, parte-se de dados médios ou correspondentes ao dia 15 de cada mês e multiplica-se o resultado pelo número de dias do mês.

onde  $E_A$  = intensidade da radiação junto à superfície na ausência da atmosfera, em mm;  $n/N$  = duração relativa do brilho solar;  $\sigma T_a^4$  = radiação teoricamente emitida pela superfície na ausência da atmosfera;  $T_a$  = temperatura média do ar;  $\sigma$  = constante de Stefan.

A energia disponível,  $H$  é distribuída entre a evaporação e o aquecimento do ar, sendo a parte referente à primeira, determinada pela combinação das citadas equações, dando:

$$E_o = (0,27 E_a + \Delta H)/(0,27 + \Delta) \text{ mm/dia}$$

onde  $\Delta$  = inclinação da curva da pressão do vapor à temperatura média do ar ( $\text{mm Hg}/^\circ\text{F}$ ). Este valor de  $E_o$ , é para uma superfície livre de água. Para se obter a transpiração potencial ( $E_t$ ), correspondente à perda de água em uma superfície úmida vegetada, usam-se fatores de conversão apropriadas.

Sendo a fórmula de Penman bastante complexa e trabalhosa, dependendo ainda de elementos meteorológicos menos freqüentemente observados, Bavel (1) propôs uma simplificação do método, preparando um nomograma simples para a determinação direta da evapotranspiração diária  $E_t$ , partindo apenas da radiação solar recebida, no tampo da atmosfera, expressa em milímetros de evaporação equivalente, da insolação relativa, seja da relação entre o número de horas de insolação, obtida em heliógrafo "Campbell-Stokes", e o número máximo de horas de insolação possíveis, e da temperatura média do ar. Este método simplificado, que apresenta, segundo seu autor, estreita correlação e dados muito próximos dos obtidos pelas fórmulas completas de Penman, foi empregado neste trabalho para comparação com dados medidos nos evapotranspirômetros.

A figura 5 traz o nomograma de Penman-Bavel, já adaptado para utilizar as unidades do sistema métrico decimal e a escala termométrica centígrada. Para obtenção da radiação solar diária no tampo da atmosfera, expressa em milímetros de evaporação equivalente, também foi elaborada uma tabela, apresentada no quadro 4, com dados correspondentes às latitudes encontradas no território brasileiro. O número máximo de horas diárias de insolação possível para os vários meses do ano, e diferentes latitudes do território brasileiro, são encontrados no quadro 5.

QUADRO 4. — Radiação solar recebida na ausência da atmosfera, em milímetros de evaporação equivalente, no 15.º dia de cada mês, para latitudes de 10 graus norte e 40 graus sul. Os dados entram na escala RS do nomograma de Bavel (figura 5), para obtenção da evapotranspiração potencial diário

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agô	Set	Out	Nov	Dez
10° N .....	12,8	13,8	14,8	15,0	14,8	14,7	14,8	14,9	14,7	14,0	13,0	12,4
8° N .....	13,2	14,1	14,9	14,9	14,6	14,5	14,6	14,8	14,8	14,2	13,3	12,7
6° N .....	13,5	14,3	14,9	14,8	14,4	14,2	14,4	14,6	14,8	14,4	13,6	13,1
2° N .....	14,1	14,7	15,0	14,6	14,0	13,6	13,8	14,3	14,8	14,7	14,2	13,8
Equador .....	14,4	14,9	15,0	14,5	13,7	13,3	13,5	14,1	14,7	14,8	14,5	14,1
2° S .....	14,6	15,0	15,0	14,4	13,4	13,0	13,2	13,9	14,7	14,9	14,8	14,4
4° S .....	14,9	15,2	15,0	14,2	13,2	12,7	12,8	13,7	14,6	15,0	15,0	14,8
6° S .....	15,2	15,3	15,0	14,0	12,8	12,4	12,6	13,5	14,6	15,2	15,2	15,1
8° S .....	15,4	15,4	14,9	13,8	12,5	12,0	12,2	13,2	14,5	15,2	15,4	15,3
10° S .....	15,6	15,6	14,8	13,6	12,2	11,6	11,9	13,0	14,4	15,2	15,5	15,6
12° S .....	15,9	15,6	14,7	13,4	11,8	11,2	11,6	12,8	14,2	15,2	15,7	15,8
14° S .....	16,1	15,7	14,6	13,1	11,5	10,8	11,2	12,5	14,2	15,3	15,9	16,0
16° S .....	16,2	15,8	14,5	12,8	11,2	10,4	10,8	12,2	14,0	15,3	16,0	16,2
18° S .....	16,4	15,8	14,4	12,6	10,8	10,0	10,5	11,9	13,8	15,3	16,2	16,5
20° S .....	16,6	15,8	14,2	12,2	10,4	9,6	10,1	11,6	13,6	15,2	16,3	16,7
22° S .....	16,8	15,8	14,0	11,9	10,0	9,2	9,7	11,2	13,4	15,2	16,4	16,8
24° S .....	16,8	15,8	13,8	11,6	9,6	8,8	9,3	10,9	13,2	15,2	16,4	17,0
26° S .....	16,9	15,7	13,6	11,2	9,2	8,4	8,8	10,6	12,9	15,1	16,5	17,2
28° S .....	17,0	15,6	13,4	10,9	8,8	7,8	8,4	10,2	12,6	15,0	16,6	17,3
30° S .....	17,0	15,6	13,2	10,5	8,4	7,4	8,0	9,8	12,4	14,8	16,6	17,4
32° S .....	17,1	15,4	13,0	10,1	8,0	6,9	7,6	9,4	12,1	14,7	16,6	17,5
34° S .....	17,1	15,3	12,6	9,8	7,6	6,4	7,0	9,0	11,8	14,6	16,6	17,6
36° S .....	17,1	15,2	12,4	9,4	7,1	6,0	6,6	8,6	11,4	14,4	16,6	17,6
38° S .....	17,1	15,0	12,1	9,0	6,6	5,6	6,2	8,2	11,0	14,2	16,5	17,7
40° S .....	17,0	14,9	11,7	8,6	6,1	5,0	5,7	7,8	0,7	14,0	16,4	17,7

Fonte: Dados interpolados e convertidos a milímetros de: **Show, Napier**. Manual of Meteorology: volume II, Comparative Meteorology, Cambridge, University press. xlviii 472 p. Dados da pág. 4, em kwh por 100 m<sup>2</sup> de superfície horizontal, multiplicados por 0,0146 para obter milímetros de evaporação equivalente.



QUADRO 5. — Duração máxima da insolação diária em horas, nos vários meses do ano e latitudes de 10 graus norte e 40 graus sul. Os valores correspondem ao 15.º dia de cada mês e se destinam ao cálculo da insolação relativa que entra na escala *I* do nomograma de Bavel (figura 5)

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agô	Set	Out	Nov	Dez
10° N	11,6	11,8	12,1	12,4	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
8° N	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6	12,5	12,4	12,2	12,0	11,8	11,6
6° N	11,8	11,9	12,1	12,3	12,4	12,5	12,4	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7
4° N	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,9
2° N	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0
Equador	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
2° S	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,2	12,2
4° S	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4
6° 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° 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° 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
12° S	12,7	12,5	12,2	11,8	11,6	11,4	11,5	11,7	12,0	12,4	12,7	12,8
14° S	12,8	12,6	12,2	11,8	11,5	11,3	11,4	11,6	12,0	12,4	12,8	12,9
16° S	13,0	12,7	12,2	11,7	11,4	11,2	11,2	11,6	12,0	12,4	12,9	13,1
18° S	13,1	12,7	12,2	11,7	11,3	11,1	11,1	11,5	12,0	12,5	13,0	13,2
20° 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
22° S	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5
24° S	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6
26° S	13,6	12,9	12,3	11,5	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,7	13,4	13,8
28° S	13,7	13,0	12,3	11,4	10,7	10,4	10,6	11,1	11,9	12,8	13,5	13,9
30° S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
32° S	14,0	13,2	12,3	11,3	10,5	10,0	10,3	10,9	11,9	12,9	13,7	14,2
34° S	14,2	13,3	12,3	11,3	10,3	9,8	10,1	10,	11,9	12,9	13,9	14,4
36° S	14,3	13,4	12,4	11,2	10,2	9,7	10,0	10,7	11,9	13,0	14,0	14,6
38° S	14,5	13,5	12,4	11,1	10,1	9,5	9,8	10,6	11,8	13,1	14,2	14,8
40° S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,8	13,1	14,3	15,0

Fonte: Dados interpolados de Smithsonian Meteorological Tables, 6.ª ed., 1951, tabela 171.

**Método de Blaney & Criddle** — Este método, como o de Thornthwaite, utiliza a temperatura média mensal e um fator ligado ao comprimento do dia. Os dados são obtidos em base mensal pela fórmula:

$$u = \frac{t \times p}{100} k$$

sendo:

$u$  = uso consuntivo mensal, em polegadas,

$t$  = temperatura média mensal, em °F,

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

$k$  = coeficiente empírico mensal, dependendo da cultura, do mês e da região. Para gramados, em plena vegetação, esse coeficiente é de 0,75.

**Método de Blaney & Criddle modificado** — É uma adaptação da equação de Blaney & Criddle, às condições do planalto paulista e ao uso das unidades do sistema métrico decimal e escala termométrica centígrada, proposta pelo autor desta. É a seguinte a fórmula de Blaney & Criddle, modificada:

$$e = (t - 0,5T)pk$$

onde:

$e$  = evapotranspiração potencial mensal, em mm,

$t$  = temperatura média do mês considerado, em °C,

$T$  = temperatura média anual normal da região em °C,

$p$  = porcentagem de horas diurnas do mês sobre o total de horas diurnas do ano (ver quadro 6)

QUADRO 6. — Porcentagens mensais de horas diurnas sôbre o total anual. Valores de  $p$  empregados na equação de Blaney & Criddle para cálculo do uso consuntivo da água ( $u$ ), para as latitudes compreendidas entre 10 graus norte e 40 graus sul

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Agô	Set	Out	Nov	Dez
10° N ...	8,15	7,47	8,46	8,42	8,80	8,62	8,82	8,69	8,28	8,35	7,90	8,04
8° N ...	8,20	7,50	8,47	8,38	8,75	8,55	8,77	8,65	8,27	8,37	7,96	8,13
6° N ...	8,28	7,54	8,47	8,34	8,69	8,47	8,70	8,62	8,25	8,40	8,03	8,21
4° N ...	8,35	7,59	8,47	8,30	8,69	8,39	8,63	8,58	8,24	8,43	8,09	8,30
2° N ...	8,41	7,63	8,48	8,26	8,57	8,30	8,56	8,55	8,23	8,46	8,15	8,40
Equador ..	8,50	7,66	8,48	8,23	8,50	8,22	8,49	8,51	8,22	8,48	8,12	8,49
2° S .....	8,57	7,70	8,49	8,20	8,43	8,16	8,42	8,45	8,21	8,51	8,29	8,57
4° S .....	8,63	7,74	8,50	8,17	8,38	8,06	8,35	8,41	8,20	8,55	8,35	8,66
6° S .....	8,69	7,79	8,51	8,13	8,32	7,98	8,27	8,37	8,20	8,58	8,42	8,74
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	8,53	8,06	8,20	7,82	8,14	8,28	8,18	8,63	8,56	8,90
12° S .....	8,90	7,92	8,54	8,02	8,14	7,75	8,06	8,22	8,17	8,67	8,63	8,98
14° S .....	8,98	7,98	8,55	7,99	8,06	7,68	7,96	8,18	8,16	8,69	8,70	9,07
16° S .....	9,08	8,00	8,56	7,97	7,99	7,61	7,89	8,12	8,15	8,71	8,76	9,16
18° S ...	9,17	8,04	8,57	7,94	7,95	7,52	7,79	8,08	8,13	8,75	8,83	9,23
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
22° S .....	9,35	8,12	8,59	7,86	7,75	7,33	7,62	7,95	8,11	8,83	8,97	9,42
24° S .....	9,44	8,17	8,60	7,83	7,64	7,24	7,54	7,90	8,10	8,87	9,04	9,53
26° S .....	9,55	8,22	8,61	7,81	7,56	7,14	7,46	7,84	8,10	8,91	9,19	9,66
28° S .....	9,65	8,27	8,62	7,78	7,49	7,04	7,38	7,78	8,08	8,95	9,20	9,76
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
32° S .....	9,85	8,37	8,66	7,70	7,36	6,82	7,18	7,62	8,06	9,03	9,35	10,00
34° S .....	9,96	8,43	8,67	7,66	7,25	6,70	7,08	7,55	8,05	9,07	9,44	10,14
36° S .....	10,07	8,50	8,68	7,62	7,14	6,58	6,98	7,48	8,04	9,12	9,53	10,26
38° S .....	10,18	8,56	8,69	7,58	7,06	6,46	6,87	7,41	8,03	9,15	9,62	10,39
40° S .....	10,32	8,62	8,71	7,54	6,93	6,33	6,75	7,33	8,02	9,20	9,71	10,54

Fonte: Dados interpolados e calculados de Smithsonian Meteorological Tables, 6.ª ed., 1951, tabela 171.

A modificação dá mais pêsô à temperatura do mês e emprega, como o método do Thornthwaite, um fator de correção ligado à temperatura média mensal anual da região. Seus dados dão diretamente o uso consuntivo da água, para gramado bem provido de umidade no solo, sendo o coeficiente  $k$  sempre igual à unidade. Para se obter o uso consuntivo relativo a distintas culturas, em diferentes períodos do ano, será necessário, da mesma forma que no método original de Blaney & Criddle, utilizar os apropriados coeficientes  $k$ .

**Dados utilizados nas equações** — Como temperatura média diária foram adotadas as médias entre as temperaturas máximas e mínimas. Essas médias mostram-se, em geral, mais elevadas que as compensadas, baseadas nas leituras das 7h, 14h e 21h. Por essa razão, os cálculos da evapotranspiração potencial, quando feitos pela média compensada  $(7h + 14h + 2 \times 21h)/4$ , dão geralmente valores mais baixos.

Em Pindamonhangaba e em Ribeirão Preto, os dados meteorológicos utilizados nos cálculos da evapotranspiração foram todos obtidos em estação meteorológica contígua aos evapotranspirômetros. Em Campinas, porém, não puderam ser utilizados os valores termométricos da estação meteorológica adjacente, por falta de dados. Utilizaram-se, por isso, dados da estação meteorológica da sede do Instituto Agrônômico, na cidade, situado cêrca de 4 km dos evapotranspirômetros. Como os dados da temperatura média diária na cidade são, certamente, mais elevados que no campo, pelo efeito da urbanização, é de se esperar que em Campinas estejam os valores calculados da evapotranspiração potencial, sobreestimados.

**Correlação com dados medidos** — Os dados, em bases mensais, fornecidos pelos diferentes métodos de cálculo, foram correlacionados com os correspondentes, medidos nos evapotranspirômetros, por meio de diagramas de pontos e através da determinação dos coeficientes de correlação e das equações de regressão, segundo método dos quadrados mínimos.

## 4 — RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 — EVAPOTRANSPIRAÇÃO MEDIDA

Os resultados mensais da evapotranspiração medida, em cada evapotranspirômetro, das baterias de Pindamonhangaba, de Ribeirão Preto e de Campinas, estão representados gráficamente na figura 3.

Pode-se observar, assim, visualmente, a baixa dispersão ou variabilidade dos dados obtidos, indicando ser alta a reprodutividade e a concordância entre êles. Apenas em certos casos, como de outubro de 1957 e de setembro de 1959, ambos na bateria de evapotranspirômetros de Ribeirão Preto, verificaram-se discrepâncias mais acentuadas entre os resultados dos diferentes evapotranspirômetros, fato que se pode atribuir a irregularidades e diferenciações no estado da vegetação dos vasos. No caso de outubro de 1957, em que foi maior a discrepância dos dados, o desvio padrão se elevou a 22,1 mm, correspondendo a um coeficiente de variação de 14,2%. No conjunto dos meses, porém, a variabilidade dos dados foi pequena. A mediana dos desvios padrões e dos coeficientes de variação foram, respectivamente, de 2,8 mm e 3,8% para a bateria de Pindamonhangaba, de 4,2 mm e 4,1% para a de Ribeirão Preto, e 3,2 mm e 4,1% para a de Campinas.

Como as regas e as colheitas do percolado dos evapotranspirômetros foram feitas, normalmente, em dias alternados, seus dados não permitem obter a evapotranspiração potencial diária. Mesmo para os períodos de dois dias, os dados não são utilizáveis por se mostrar muito inconsistentes. Em períodos muito chuvosos, por exemplo, os dados poderão até se tornar negativos, em virtude da detenção anormalmente alta de água gravitativa no solo dos lisímetros. Após aguaceiros pesados e prolongados, grande quantidade de água gravitativa — a que se acha acima da capacidade de campo — fica temporariamente detida no vaso, sendo percolada por completo somente nos dias seguintes. Nessas condições, os dados dos evapotranspirômetros nos dias de detenção elevada podem indicar evapotranspiração maior que a verdadeira, uma vez que a umidade detida no vaso entrará no balanço como sendo água evaporada. No período seguinte, porém, a elevada percolação, resultante das chuvas anteriores, será interpretada como se fôsse umidade não evaporada e fará reduzir a evapotranspiração estimada, a qual poderá, então, se tornar negativa.

Para reduzir êsse efeito, da detenção incontrolada da umidade no solo dos lisímetros, utilizaram-se dados acumulados para períodos mais longos, de dez e de trinta dias. Os valores acumulados decendialmente, mostraram-se já bastante consistentes, como se pode verificar no diagrama da figura 6, que correlaciona valores decendiais medidos com calculados, segundo o método de Thornthwaite, para Campinas. A correlação entre êles mostrou-se bastante estreita, como indica o

coeficiente de correlação ( $r$ ) que se elevou a  $0,82 + +$ . Para períodos de acumulação mais longos os dados se mostraram ainda mais consistentes. No diagrama de pontos da figura 12-A, que compara os mesmos dados acumulados mensalmente, pode-se verificar uma correlação bem mais acentuada dos dados medidos com os calculados. O respectivo coeficiente de correlação atingiu a  $0,95 + +$ .

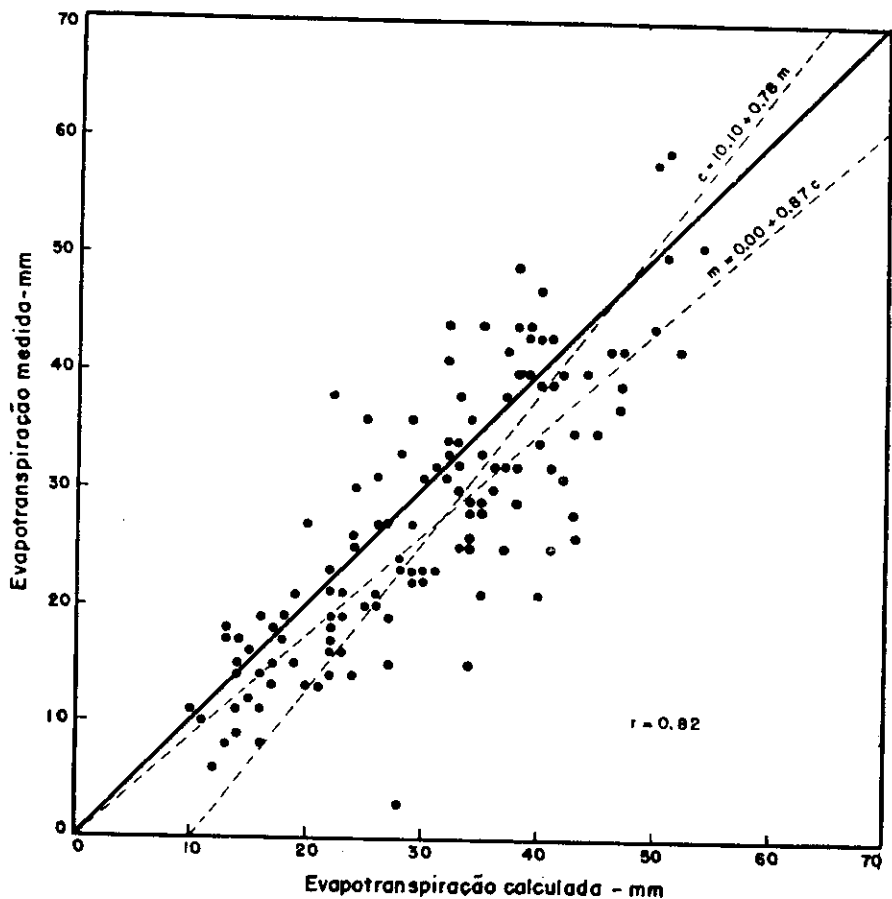


FIGURA 6. — Correlação entre valores decendiais da evapotranspiração potencial medidos em evapotranspirômetros e calculados pela equação de Thornthwaite durante o período de 1956 a 1959 em Campinas.

Sòmente depois de transcorridos vários meses, a partir da instalação, os evapotranspirômetros entraram em regime normal de funcionamento e apresentaram boa correlação com os dados calculados da evapotranspiração potencial. Esse período de adaptação mostrou-se ne-

cessário para se conseguir o completo desenvolvimento vegetativo tanto do gramado do vaso como da área circundante. Foi também necessário para completar o acamamento e acomodação do solo no tanque e obter-se a regularização da percolação. Por outro lado, depois de cinco ou seis anos de operação, o funcionamento dos evapotranspirômetros mostrou-se também prejudicado. O definhamento do gramado, causando irregularidade no revestimento vegetal dos tanques, e algumas vezes o afundamento dos vasos, foram a causa do defeito funcional. Nas figuras 7, 8 e 9 podem ser vistos certos efeitos do estado da vegetação do gramado, dos tanques, comparando-se os dados medidos com os calculados da evapotranspiração. Nessa figura estão ilustradas, gráficamente, as marchas dos valores mensais da evapotranspiração potencial, nas três localidades durante quatro anos sucessivos após os períodos de adaptação.

No quadro 2 estão reunidos os dados mensais médios, dos tanques das diferentes baterias, referentes às quantidades de água administrada aos tanques por irrigação e precipitação, às quantidades de água percolada e às quantidades de água evapotranspirada, em milímetros.

#### 4.2 — EVAPOTRANSPIRAÇÃO CALCULADA

Calculou-se a evapotranspiração potencial em bases mensais, pelos métodos de Thornthwaite, Penman-Bavel, Blaney & Criddle e de uma forma modificada dêste último. Nessas determinações foram utilizadas as tabelas e os nomogramas especiais já mencionados. Os dados obtidos e as fases principais das determinações, pelos vários métodos, estão indicados nos quadros 7, 8 e 9.

#### 4.3 — CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS MENSAIS MEDIDOS E CALCULADOS

Os diagramas de dispersão contidos nas figuras 10, 11 e 12 representam os resultados mensais medidos nos evapotranspirômetros e os estimados pelo cálculo, segundo os vários métodos descritos. Com os diagramas são apresentadas as equações, as respectivas linhas de regressão e os coeficientes de correlação ( $r$ ).

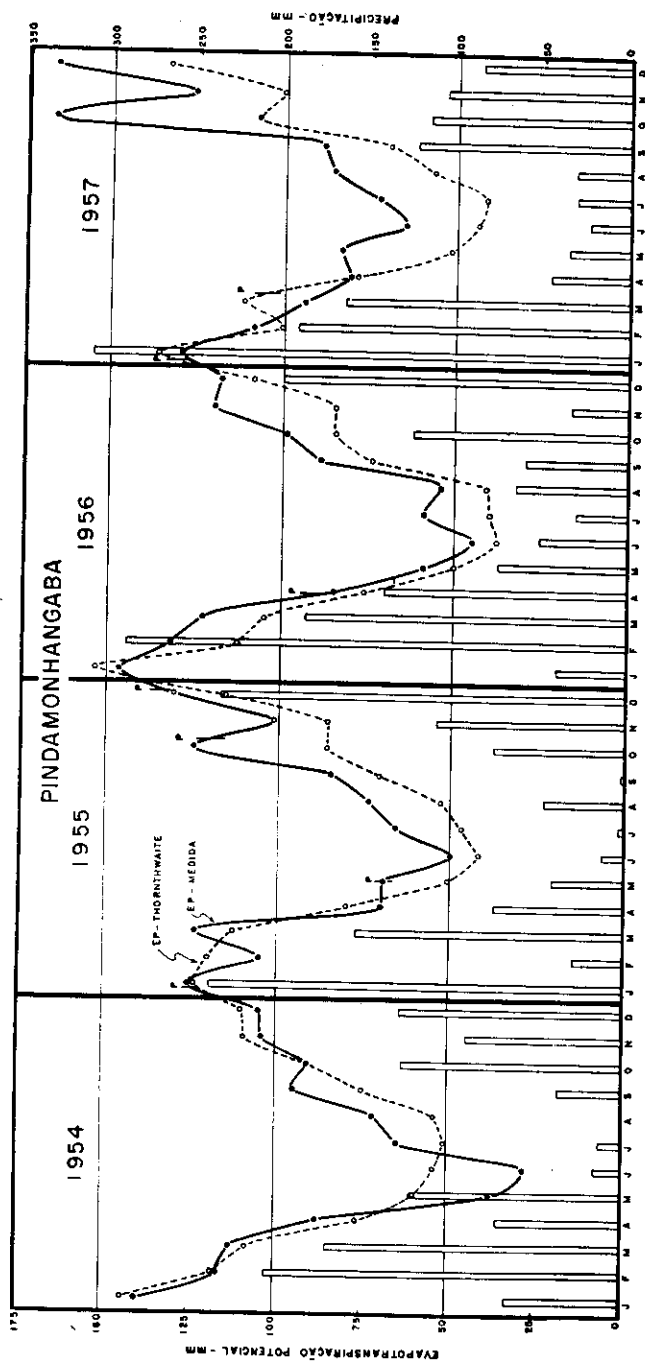


FIGURA 7. — Curso anual da evapotranspiração potencial medida e da calculada segundo Thornthwaite, bem como, da precipitação pluvial, em bases mensais, obtidas no período de 1954 a 1957 na estação experimental de Pindamonhangaba. Os pontos assinalados com a letra P, na curva da evapotranspiração medida, indicam a ceifa da grama e os com a letra S, a aplicação de adubo nitrogenado.



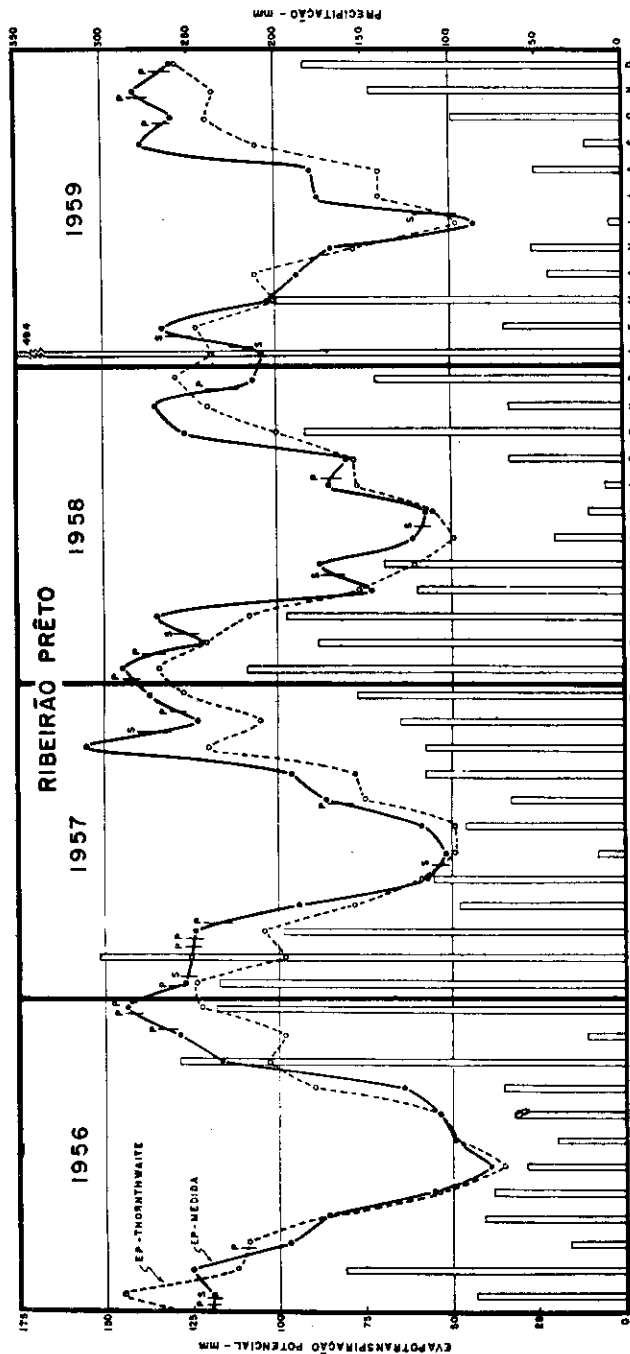


FIGURA 8. — Curso anual da evapotranspiração potencial medida e da calculada segundo Thornthwaite, bem como, da precipitação pluviál, em bases mensais, obtidas no período de 1956 a 1959 na estação experimental de Ribeirão Preto. Os pontos assinalados com a letra P, na curva da evapotranspiração medida, indicam a cefia da grama e os com a letra S, a aplicação de adubo nitrogenado.

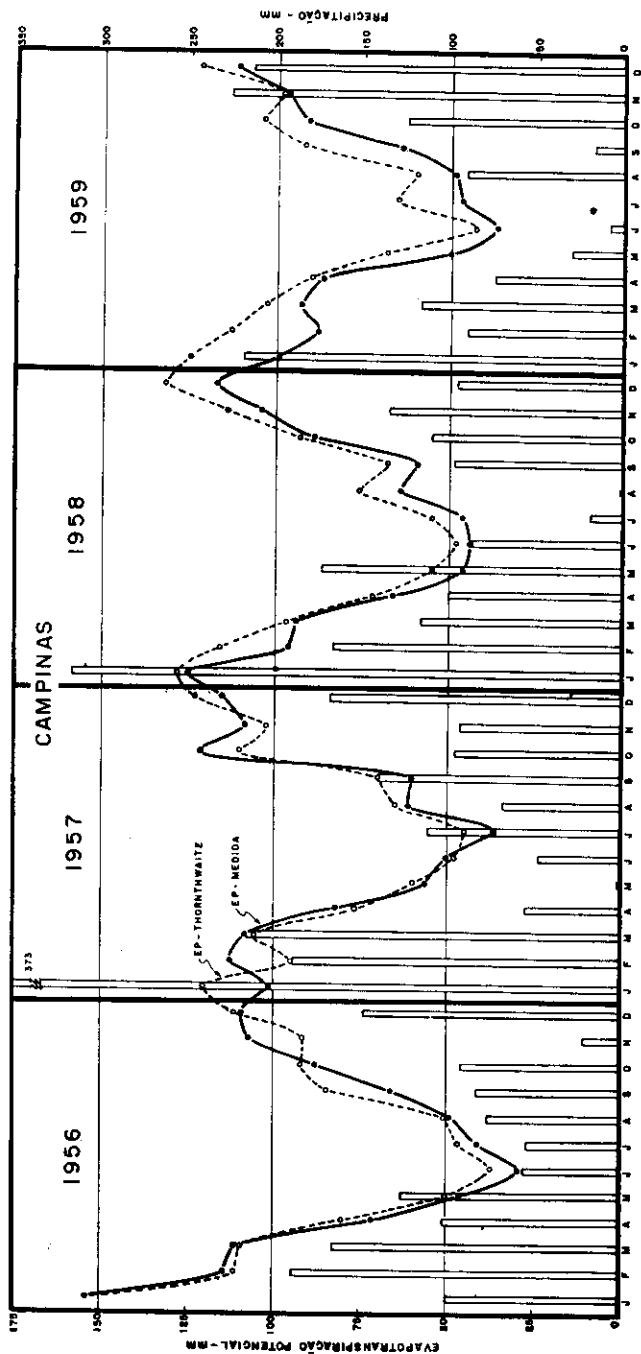


FIGURA 9. — Curso anual da evapotranspiração potencial medida e da calculada segundo Thornthwaite, bem como da precipitação pluviol, em bases mensais, obtidas no período de 1956 a 1959 na estação experimental de Campinas. Os pontos assinalados com a letra P, na curva da evapotranspiração medida, indicam a ceifa da grama e os com a letra S, a aplicação de adubo nitrogenado.

QUADRO 7. — Dados do cálculo da evapotranspiração potencial mensal, por diferentes métodos, em Pindamonhangaba. A evapotranspiração não ajustada ( $E_t$ ) e os fatores de correção ( $F$ ), do método de Thornthwaite, são obtidos respectivamente, com o nomograma da figura 4 e no quadro 3. Os valores de  $E_t$ , de Penman-Bavel, são estimados com o nomograma da figura 5, e os de  $p$ , do método de Blaney & Criddle, encontram-se no quadro 6

Meses	Temp. média (M+m)/2 t	Método de Thornthwaite		Método de Penman-Bavel		Método de Blaney & Criddle		Mét. de Blaney & Criddle modif.	
		Evapot. não ajust. $E_t$	Evapot. potenc. ( $E_t \times F$ )	Insol. relat.	$E_t$ mensal	$100 F \times p$ (a)	Uso conjunto $k = 0,75$	t-0,5T (b) T = 21,4	Uso conjunto (hr)
	°C	mm			mm	poleg.	mm	°C	mm
<b>1954</b>									
Jan	25,6	125	144	0,56	112	7,29	139	14,9	139
Fev	25,0	118	118	0,48	81	6,26	119	14,3	116
Mar	23,8	103	108	0,58	90	6,42	122	13,1	112
Abr	21,1	78	76	0,60	72	5,50	105	10,4	82
Mai	19,4	63	60	0,43	40	5,17	98	8,7	67
Jun	19,0	60	54	0,59	45	4,78	91	8,3	60
Jul	18,2	54	51	0,77	68	4,95	94	7,5	57
Agô	18,3	55	54	0,78	80	5,16	98	7,6	60
Set	20,8	75	75	0,52	70	5,60	106	10,1	82
Out	21,9	84	91	0,41	75	6,30	120	11,2	99
Nov	23,4	99	109	0,59	105	6,62	126	12,7	114
Dez	23,0	95	110	0,46	91	6,88	131	12,3	116
Ano	21,6	—	1.050	0,56	929	—	1.349	10,9	1.104
<b>1955</b>									
Jan	24,2	108	124	0,46	93	7,10	135	13,5	126
Fev	25,2	120	120	0,59	101	6,34	121	14,5	118
Mar	24,2	108	113	0,55	87	6,50	124	13,5	116
Abr	21,8	83	80	0,52	63	6,28	119	11,1	87
Mai	18,2	54	51	0,57	53	5,01	95	7,5	54
Jun	17,1	47	42	0,58	45	4,56	87	6,4	46
Jul	17,6	50	47	0,65	56	4,87	93	6,9	52
Agô	18,2	54	53	0,68	71	5,16	98	7,5	60
Set	20,4	71	71	0,60	78	5,61	106	9,7	79
Out	21,3	79	86	0,33	56	6,21	118	10,6	94
Nov	21,1	78	86	0,45	78	6,26	119	10,4	93
Dez	23,6	101	117	0,38	78	7,00	133	12,9	122
Ano	21,1	78	990	0,53	859	—	1.348	10,4	1.047
<b>1956</b>									
Jan	26,4	134	154	0,67	140	7,48	142	15,7	147
Fev	24,6	113	113	0,47	84	6,42	122	13,9	117
Mar	23,5	100	105	0,54	84	6,40	121	12,8	110
Abr	21,2	78	76	0,51	60	5,50	105	10,5	82
Mai	18,0	53	50	0,42	40	4,94	94	7,3	56
Jun	16,4	42	38	0,47	36	4,50	85	5,7	41
Jul	16,6	43	40	0,51	43	4,71	89	5,9	45
Agô	16,4	42	41	0,55	56	4,92	94	5,7	45
Set	20,7	74	74	0,46	63	5,60	106	10,0	81
Out	21,2	78	85	0,46	74	6,20	118	10,5	93
Nov	21,0	77	85	0,49	87	6,26	119	10,3	92
Dez	22,9	94	109	0,45	87	6,88	131	12,2	115
Ano	20,7	74	970	0,50	854	—	1.326	10,0	1.024

QUADRO 8. — Dados do cálculo da evapotranspiração potencial mensal, por diferentes métodos, em Ribeirão Preto. A evapotranspiração não ajustada ( $E_i$ ) e os fatores de correção ( $F$ ), do método de Thornthwaite, são obtidos respectivamente, com o nomograma da figura 4 e no quadro 3. Os valores de  $E_p$ , Penman-Bavel, são estimados com o nomograma da figura 5, e os dados de  $p$ , do método de Blaney & Criddle, encontram-se no quadro 6

Meses	Temp. média (M+m)/2 $t$	Método de Thornthwaite		Método de Penman-Bavel		Método de Blaney & Criddle		Mét. de Blaney & Criddle modif.	
		Evapot. não ajust. $E_i$	Evapot. potenc. ( $E_i \times F$ )	Insol. relat.	$E_p$ mensal	$pF \times p$ 100 (a)	Uso con- suntivo (25,4ak) (k = 0,75)	$t=0,5T$ (b) $T = 22,5$	Uso con- suntivo (bp)
	°C		mm		mm	poleg.	mm	°C	mm
<b>1955</b>									
Jan .....	24,4	109	125	0,49	99	7,05	134	13,2	123
Fev .....	24,6	111	111	0,59	98	6,17	118	13,4	108
Mar .....	24,2	106	111	0,57	71	6,47	123	13,0	111
Abr .....	22,6	90	87	0,64	81	5,73	109	11,4	90
Mai .....	19,0	58	56	0,70	70	5,15	98	7,8	61
Jun .....	19,0	58	53	0,66	57	4,86	92	7,8	57
Jul .....	19,6	63	60	0,65	62	5,18	98	8,4	65
Agô .....	21,2	76	75	0,69	81	5,61	106	10,0	80
Set .....	24,5	110	110	0,67	102	5,37	102	13,3	108
Out .....	23,6	99	107	0,48	84	6,58	125	12,4	110
Nov .....	22,5	89	97	0,63	109	6,44	122	11,3	100
Dez .....	24,2	106	122	0,49	96	7,06	134	13,0	121
Ano .....	22,4	89	1.114	0,60	1.010	—	1.361	11,2	1.134
<b>1956</b>									
Jan .....	25,8	127	145	0,72	142	7,29	139	14,6	136
Fev .....	24,7	112	112	0,58	101	6,68	127	13,5	113
Mar .....	24,0	104	109	0,65	74	6,44	122	12,8	109
Abr .....	22,5	89	86	0,53	69	5,71	109	11,3	89
Mai .....	18,8	56	54	0,50	50	5,11	97	7,6	59
Jun .....	16,1	38	35	0,47	36	4,48	86	4,9	36
Jul .....	18,3	52	49	0,60	42	5,00	95	7,1	55
Agô .....	18,6	54	53	0,75	84	5,24	100	7,4	59
Set .....	22,6	90	90	0,49	72	5,91	112	11,4	93
Out .....	23,2	95	103	0,54	93	6,51	124	12,0	106
Nov .....	22,7	90	98	0,63	111	6,47	123	11,5	102
Dez .....	24,2	106	122	0,54	107	7,06	134	13,0	121
Ano .....	21,8	84	1.056	0,58	981	—	1.368	10,6	1.078

QUADRO 8. — (continuação)

Meses	Temp. média (M+m)/2 $t$	Método de Thornthwaite		Método de Penman-Bavel		Método de Blaney & Criddle		Mét. de Blaney & Criddle modif.	
		Evapot. não ajust. $E_i$	Evapot. potenc. ( $E_p \times F$ )	Insol. relat.	$E_t$ mensal	$100 \times p$ (a)	Uso consuntivo (25,4ak) (k = 0,75)	$t-0,5T$ (b) T = 22,5	Uso consuntivo (bp)
	°C		mm		mm	poleg.	mm	°C	mm
<b>1957</b>									
Jan	24,3	108	124	0,49	98	7,04	133	13,1	122
Fev	23,4	97	97	0,44	73	6,01	115	12,2	99
Mar	23,6	99	104	0,57	91	6,38	121	12,4	106
Abr	21,6	80	78	0,57	71	5,60	107	10,4	82
Mai	19,3	60	59	0,62	62	5,19	98	8,1	63
Jun	18,6	54	49	0,59	51	4,81	91	7,4	54
Jul	18,1	51	49	0,55	53	4,97	94	6,9	53
Agô	21,2	76	75	0,64	76	5,61	106	10,0	80
Set	21,4	78	78	0,48	69	5,73	109	11,8	96
Out	24,6	111	120	0,61	108	6,74	128	13,4	118
Nov	23,3	96	105	0,46	84	6,56	124	12,1	107
Dez	24,5	110	127	0,50	100	7,11	135	13,3	124
Ano	22,0	85	1.065	0,54	936	—	1.361	10,9	1.104
<b>1958</b>									
Jan	25,1	117	134	0,40	83	7,18	136	13,9	129
Fev	25,3	120	120	0,46	80	6,28	119	14,1	114
Mar	23,9	103	108	0,64	101	6,42	122	12,7	109
Abr	21,4	78	76	0,59	72	5,56	106	10,2	80
Mai	19,5	62	60	0,59	57	5,22	99	8,3	64
Jun	18,6	54	49	0,77	65	4,81	91	7,4	54
Jul	19,0	58	55	0,68	63	5,10	97	7,8	60
Agô	21,4	78	77	0,81	91	5,64	107	10,2	82
Set	21,4	78	78	0,60	84	5,73	109	10,2	83
Out	22,9	92	100	0,58	98	6,47	123	11,7	103
Nov	24,5	110	120	0,70	126	6,76	129	13,3	118
Dez	24,7	112	129	0,50	100	7,15	136	13,5	126
Ano	22,3	88	1.106	0,61	1.025	—	1.374	11,1	1.122
<b>1959</b>									
Jan	24,0	104	119	0,35	71	6,99	133	12,8	119
Fev	25,5	123	123	0,55	94	6,31	120	14,3	116
Mar	23,3	96	101	0,49	78	6,32	120	12,1	103
Abr	24,4	109	106	0,79	73	5,99	114	13,2	104
Mai	21,7	81	78	0,75	78	5,53	105	10,5	82
Jun	18,4	53	48	0,81	69	4,78	91	7,2	53
Jul	21,0	74	70	0,79	77	5,37	102	9,8	75
Agô	20,6	71	70	0,65	76	5,53	105	9,4	75
Set	24,2	106	106	0,60	90	6,15	117	13,0	106
Out	24,5	110	120	0,55	97	6,73	128	13,3	117
Nov	24,3	108	118	0,54	101	6,73	128	13,1	116
Dez	24,7	112	129	0,56	109	7,15	136	13,5	126
Ano	23,0	95	1.188	0,62	1.013	—	1.399	11,8	1.192

QUADRO 9. — Dados do cálculo da evapotranspiração potencial mensal, por diferentes métodos, em Campinas. A evapotranspiração não ajustada ( $E_t$ ) e os fatores de correção ( $F$ ), do método de Thornthwaite, são obtidos respectivamente, com o nomograma da figura 4 e no quadro 3. Os valores de  $E_t$  de Penman-Bavel, são estimados com o nomograma da figura 5, e os dados de  $p$ , do método de Blaney & Criddle, encontram-se no quadro 6

Meses	Temp. média (M + m)/2 $t$	Método de Thornthwaite		Método de Penman-Bavel		Método de Blaney & Criddle		Mét. de Blaney & Criddle modif.	
		Evapot. não ajust. $E_t$	Evapot. potenc. ( $E_t \times F$ )	Insol. relat.	$E_t$ mensal	$p^0 F \times p$ 100 (a)	Uso con- suntivo (25,4mk) ( $K = 0,75$ )	$t - 0,5T$ (b) $T = 21,4$	Uso con- suntivo (bp)
<b>1956</b>	<b>°C</b>		<b>mm</b>		<b>mm</b>	<b>poteg.</b>	<b>mm</b>	<b>°C</b>	<b>mm</b>
Jan .....	26,4	134	154	0,72	149	7,43	142	15,7	148
Fev .....	24,5	111	111	0,58	99	6,43	122	13,8	117
Mar .....	23,9	104	109	0,65	102	6,43	122	13,2	113
Abr .....	21,7	83	80	0,53	63	5,57	106	11,0	86
Mai .....	18,0	53	50	0,50	47	4,97	94	7,3	56
Jun .....	16,3	42	37	0,47	36	4,44	85	5,6	41
Jul .....	17,6	50	48	0,60	50	4,85	92	6,9	52
Agô .....	17,8	51	50	0,75	79	5,09	97	7,1	56
Set .....	21,8	84	84	0,49	69	5,79	110	11,1	90
Out .....	21,9	84	92	0,54	90	6,33	121	11,2	99
Nov .....	21,7	83	91	0,63	105	6,35	121	11,0	98
Dez .....	23,1	96	111	0,54	102	6,94	132	12,4	117
Ano .....	21,2	—	1.017	0,58	991	—	1.344	10,5	1.073
<b>1957</b>									
Jan .....	23,9	104	120	0,49	96	7,01	134	13,2	123
Fev .....	23,0	95	95	0,44	73	5,97	114	12,3	100
Mar .....	23,6	101	106	0,57	92	6,38	122	12,9	110
Abr .....	21,3	79	76	0,57	69	5,52	105	10,6	83
Mai .....	19,0	60	57	0,62	59	5,11	98	8,3	64
Jun .....	18,1	54	48	0,59	48	4,68	89	7,4	54
Jul .....	17,4	48	45	0,55	50	4,82	92	6,7	51
Agô .....	19,8	66	65	0,64	72	5,37	102	9,1	72
Set .....	20,2	70	70	0,48	63	5,55	106	9,5	77
Out .....	23,6	101	110	0,61	105	6,60	126	12,9	114
Nov .....	22,8	93	102	0,46	84	6,53	124	12,1	108
Dez .....	24,1	106	123	0,50	101	7,11	135	13,4	126
Ano .....	21,4	—	1.017	0,54	912	—	1.347	10,7	1.082

QUADRO 9. — (continuação)

Meses	Temp. média (M+t)/2 $t$	Método de Thornthwaite		Método de Penman-Bavel		Método de Blaney & Criddle		Mét. de Blaney & Criddle modf.	
		Evapot. não ajust. $E_t$	Evapot. potenc. ( $E_p \times F$ )	Insol. relat.	$E_t$ mensal	$10F \times p$ 100 (a)	Uso con- suntivo (25,4ak) (k=0,75)	$t-0,5T$ (b) T=21,4	Uso con- suntivo (bp)
	°C		mm		mm	poleg.	mm	°C	mm
<b>1958</b>									
Jan	24,6	112	129	0,48	98	7,13	136	13,9	130
Fev	24,9	116	116	0,47	79	6,49	124	14,2	120
Mar	22,7	92	97	0,54	81	6,25	119	12,0	103
Abr	20,9	75	72	0,56	64	5,46	104	10,2	80
Mai	18,8	58	55	0,57	55	5,08	97	8,1	62
Jun	18,1	54	48	0,75	59	4,68	89	7,4	54
Jul	18,9	59	55	0,65	56	5,03	96	8,2	62
Agô	21,1	77	76	0,76	87	5,56	106	10,4	83
Set	20,0	68	68	0,55	72	5,53	105	9,3	76
Out	22,0	85	93	0,57	94	6,35	121	11,3	100
Nov	23,8	103	114	0,61	110	6,69	127	13,1	117
Dez	24,8	114	132	0,53	105	7,23	138	14,1	133
Ano	21,7	—	1.055	0,59	956	—	1.362	11,0	1.120
<b>1959</b>									
Jan	24,3	109	125	0,51	102	7,08	135	13,6	127
Fev	24,8	113	113	0,53	90	6,31	120	14,1	115
Mar	23,3	98	103	0,52	81	6,33	121	12,6	108
Abr	22,8	93	90	0,73	91	5,73	109	12,1	95
Mai	20,7	72	68	0,73	62	5,37	102	10,0	77
Jun	17,5	47	43	0,79	61	4,63	88	6,8	49
Jul	20,1	69	65	0,76	70	5,20	99	9,4	72
Agô	19,1	61	60	0,61	66	5,28	100	8,4	67
Set	22,7	92	92	0,40	58	5,93	113	12,0	97
Out	23,1	96	104	0,51	87	6,53	124	12,4	110
Nov	22,5	90	98	0,49	87	6,49	124	11,8	106
Dez	24,2	106	122	0,55	109	7,14	136	13,5	127
Ano	22,1	—	1.083	0,59	964	—	1.371	11,4	1.150

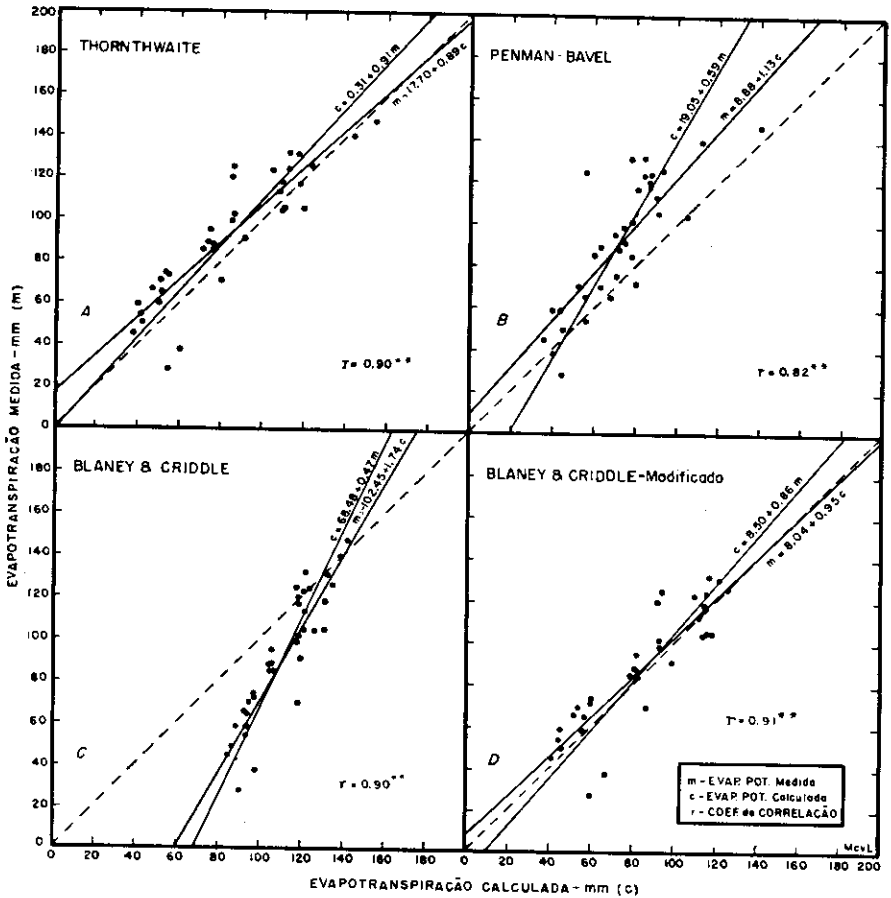


FIGURA 10. — Correlação entre os valores mensais da evapotranspiração potencial medidos nos evapotranspirômetros e os obtidos pelo cálculo segundo os métodos de Thornthwaite, de Penman, através do nomograma de Bavel, e das equações de Blaney & Criddle, original e modificada, para a localidade de Pindamonhangaba, no período de 1954 a 1956.

Para as diversas localidades e métodos de cálculo, os coeficientes de correlação entre os resultados mensais medidos e calculados, variaram entre 0,76 e 0,95 e se mostraram altamente significativos, indicando haver, em geral, correlação bastante estreita entre a evapotranspiração potencial medida e a calculada pelos vários métodos estudados. São os seguintes os coeficientes de correlação e respectivos limites de confiança, para 5% de probabilidade, para os vários casos:



MÉTODO DE CÁLCULO	Pindamonhan- gaba (N = 36)		Ribeirão Preto (N = 60)		Campinas (N = 48)	
Thornthwaite .....	0,90	0,81 0,95	0,89	0,82 0,93	0,95	0,91 0,97
Penman-Bavel .....	0,82	0,68 0,90	0,76	0,63 0,85	0,89	0,81 0,94
Blaney & Criddle .....	0,90	0,81 0,95	0,88	0,81 0,93	0,93	0,88 0,96
Blaney & Criddle modificado .....	0,91	0,83 0,95	0,90	0,84 0,94	0,94	0,80 0,97

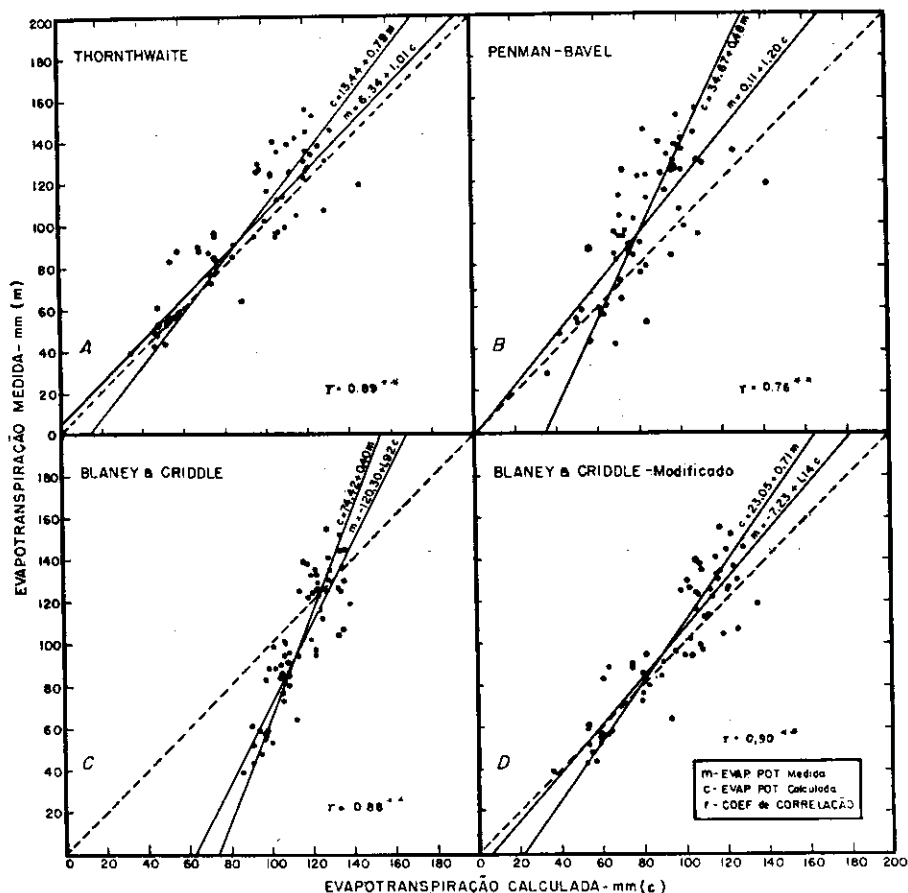


FIGURA 11. — Correlação entre os valores mensais da evapotranspiração potencial medidos nos evapotranspirômetros e os obtidos pelo cálculo segundo os métodos de Thornthwaite, de Penman, utilizando o nomograma de Bavel, e da equações de Blaney & Criddle, original e modificada, para localidade de Ribeirão Preto no período de 1955 a 1959.

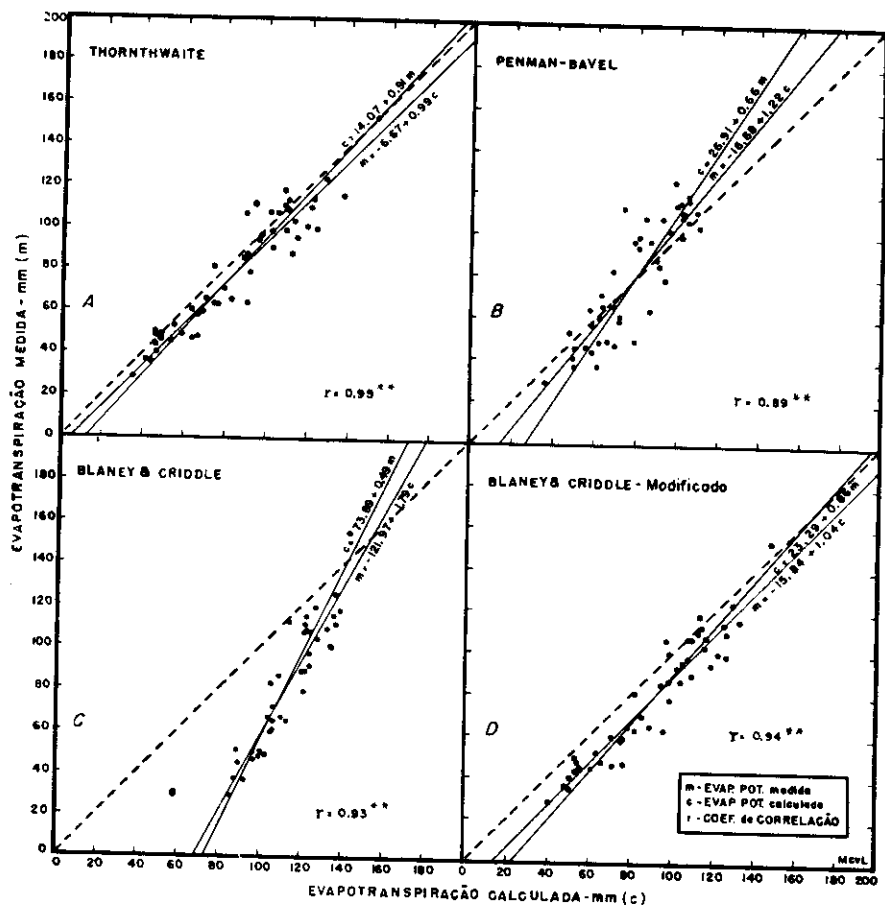


FIGURA 12. — Correlação entre os valores mensais da evapotranspiração potencial medidos nos evapotranspirômetros e os obtidos pelo cálculo segundo os métodos de Thornthwaite, de Penman com o nomograma de Bavel e das equações de Blaney & Criddle, original e modificada, para a localidade de Campinas no período de 1956 a 1959.

Os resultados da equação de Penman-Bavel foram os que apresentaram menor correlação com os medidos nos evapotranspirômetros, nas três localidades. Os respectivos coeficientes de correlação obtidos, variaram de 0,76 a 0,89, ao passo que para os outros métodos de cálculos, os referidos coeficientes nunca se mostraram inferiores a 0,89.

## 5 — DISCUSSÃO

Pode-se verificar, nas figuras 7, 8 e 9, que os dados da evapotranspiração potencial obtidos em base mensal, segundo método de Thornthwaite, acompanham bem de perto aqueles medidos nos evapotranspirômetros. Em geral, as discrepâncias nas curvas, entre dados medidos e calculados, se devem à irregularidade do estado da vegetação, quer no vaso, quer no terreno circundante.

Em Pindamonhangaba verificou-se que logo no início, nos meses de maio e junho de 1954 (ver figura 7), a evapotranspiração medida diminuiu consideravelmente. A causa foi o definhamento do gramado dos tanques provocado pela deficiência de aeração e de nitrogênio, resultante da excessiva irrigação que vinha sendo feita. Com aplicação de nitrogênio, na forma de silitre do Chile e redução da quantidade e a frequência das irrigações, que de diárias passaram a ser de cada dois ou três dias, e em quantidade mínima, apenas o suficiente para provocar pequena percolação, a vegetação do gramado se refez e a evapotranspiração aumentou consideravelmente nos meses seguintes. Esse aumento mostrou-se mesmo exagerado, a curva de dados medidos, ultrapassando de muito a dos dados calculados no período seguinte, de julho, agosto e setembro, o que pode ser explicado por dois motivos: primeiro, pelo fato do porte do gramado interno ultrapassar bastante a do extremo aos tanques, aumentando-lhe a exposição; segundo, pelo motivo de ter ocorrido um período de deficiência de chuvas e de água no solo circundante aos tanques, provocando aumento da capacidade evaporativa do ar e, conseqüentemente, também aumento da perda de água no tanque. Normalmente, esse efeito da seca deveria ser evitado com a manutenção de uma suficiente área tampão pela irrigação de extensa área do gramado circundante. Isso, todavia, não pôde ser efetuado regularmente na quantidade necessária, por falta de água para a irrigação no local.

A condição de evapotranspiração subestimada, pela falta de nitrogênio e de aeração no solo dos tanques não mais ocorreu no resto do período de observações dessa bateria de Pindamonhangaba, como também nas demais. A experiência adquirida nesse primeiro ano de trabalho, em Pindamonhangaba, pôde ser aplicada com sucesso em seguida. Todavia, o controle da sobreestimação da evapotranspiração medida tornou-se mais difícil, especialmente em Pindamonhangaba, pela falta de água para irrigação do gramado circundante nos períodos de seca. Pode-se observar bem, na figura 7, que em todos os períodos

de baixa precipitação, acentuou-se bastante a sobreestimativa da evapotranspiração potencial medida, nessa localidade. Já em Ribeirão Prêto mostrou-se muito menor, e em Campinas praticamente nulo, o efeito da falta de chuvas. Nesta última localidade, a maior abundância de água para irrigação do gramado circundante permitiu mantê-lo em estado de turgescência numa extensão de cêrca de uma dezena de metros de cada lado da bateria de evapotranspirômetros, provendo melhor efeito tampão.

No último ano de observações, em Pindamonhangaba, ou seja, em 1957, elevaram-se bastante os dados da evapotranspiração medida. Nesse caso, além da falta da área tampão, verificou-se outro efeito que contribuiu decisivamente para a sobreestimativa da evapotranspiração. Aconteceu que os tanques começaram a se afundar no solo, permitindo o transbordamento incontrolável de água da chuva de fora para dentro do tanque e vice-versa e, ainda, o que foi mais grave, o transpasse dos estolhos da grama por sôbre o bordo dos vasos, fazendo com que parte da superfície do gramado externo transpirasse umidade proveniente do solo dos tanques. Isso fêz aumentar consideravelmente a área de exposição do gramado dos tanques, e a evapotranspiração nos mesmos, tornando seus resultados demasiado elevados e inconsistentes. Por essa razão, os dados de 1957 em diante foram desprezados nos estudos de correlação entre dados medidos e calculados.

Em Ribeirão Prêto as discrepâncias foram menores. Mas também pode-se notar que as irregularidades da curva da evapotranspiração medida, em muitos pontos, está ligada ao portê mais alto da grama dos vasos, e, em certos casos, à deficiência de umidade no gramado circundante aos evapotranspirômetros, como ocorreu nos meses de julho a setembro de 1959. Ver curvas correspondentes a Ribeirão Prêto na figura 8.

A melhor concordância entre as curvas de resultados medidos e calculados verificou-se em Campinas. Isso pôde, em parte, ser atribuído ao fato de os evapotranspirômetros instalados nessa localidade terem sido operados com maior cuidado e perfeição.

Os resultados obtidos nos evapotranspirômetros mostraram a importância de se manter, o mais constante possível, a exposição correta, da superfície vegetada dos tanques dos evapotranspirômetros, para que se possam obter dados satisfatórios. Mostram ainda que, embora não seja fácil mantê-la em condições ideais, é possível obter

resultados consistentes e representativos da evapotranspiração potencial com o uso de evapotranspirômetros, desde que instalados com os requisitos necessários, dando correta exposição aos lisímetros.

Com respeito à concordância, ou regressão, entre a evapotranspiração calculada e a medida, observaram-se diferenças bem acentuadas entre os resultados dos diversos métodos de cálculo. Os diagramas de pontos mostram que, tanto para Pindamonhangaba (fig. 10), como Ribeirão Preto (fig. 11), ou Campinas (fig. 12), os valores obtidos com o método de Thornthwaite e de Blaney & Criddle modificado, apresentaram maior exatidão pela maior aproximação aos medidos nos evapotranspirômetros. As linhas de regressão, sobretudo as representativas das equações de regressão em que a variável independente foi a evapotranspiração calculada, estão praticamente paralelas e mais próximas das respectivas linhas de valores iguais. Os coeficientes do termo A, das equações de regressão, foram os mais baixos e os do termo B os que mais se aproximaram da unidade.

No caso dos valores calculados pelos métodos de Penman-Bavel e de Blaney & Criddle, houve, em geral, sobreestimativa no período hibernar e subestimativa no período estival. O método de Penman-Bavel, foi o que mais subestimou a evapotranspiração na estação quente, ao passo que o método de Blaney & Criddle, o que mais sobrestimou, e acentuadamente mesmo, nos meses do inverno. As figuras 10, 11 e 12 mostram, claramente, êsse comportamento dos métodos de Penman-Bavel e de Blaney & Criddle, com relação aos dados medidos nos evapotranspirômetros.

A acentuada discordância dos dados calculados pelo método de Blaney & Criddle com os medidos, nas condições climáticas do planalto paulista, sobreestimando exageradamente a evapotranspiração potencial, nos meses de maio, junho, julho e agosto, se justifica pelo fato de ter sido a equação de Blaney & Criddle derivada para as condições climáticas da Califórnia, onde o inverno é úmido e o verão seco, situação exatamente oposta à do planalto paulista. Com a equação de Blaney & Criddle modificada, os resultados mostram-se porém bem mais exatos, apresentando estreita concordância com os medidos pelos evapotranspirômetros.

Embora a equação de Thornthwaite seja mais universal, servindo para uso mais generalizado, pode-se utilizar, também, para as condições do planalto paulista, a forma modificada da equação de Blaney & Criddle, a qual tem a vantagem de ser mais simples e de dispensar o uso de nomogramas.

Mostraram-se muito consistentes e concordantes os resultados das determinações nas três localidades: Pindamonhangaba, no Vale do Rio Paraíba, Ribeirão Preto, no norte do Estado e Campinas, no centro-sul do Estado como se pode verificar examinando as figuras 10, 11 e 12.

É verdade que essas três localidades têm condições climáticas semelhantes, com verão chuvoso e inverno relativamente seco. O balanço hídrico mensal de Thornthwaite & Mather (25) assemelha-se muito nessas três regiões do Estado (4), acusando excedentes normais de água no solo, no período de dezembro a março, da ordem de 250 a 400 mm, e deficiências normais no período de julho a setembro, variáveis de 30 e 65 mm. Setzer (22), coloca as três localidades dentro do mesmo tipo *Cwa*, da classificação de Koeppen.

A concordância encontrada no planalto paulista entre valores medidos e calculados pelo método de Thornthwaite, mostra-se mesmo mais perfeita que a observada em Seabrook, no sul de New Jersey, onde Thornthwaite realiza seus trabalhos. Mather (11), relatando resultados obtidos em Seabrook, cita que durante o inverno a evapotranspiração potencial medida se mostrou mais de duas vezes superior à calculada, ao passo que no verão foi um pouco inferior.

McCloud & Dunavin (12), trabalhando em Gainesville, na Flórida, encontraram comportamento praticamente oposto. No inverno, os valores medidos e calculados foram equivalentes, mas, no verão, os medidos, em vez de inferiores, como em New Jersey, foram bem mais elevados que os calculados pelo método de Thornthwaite.

Os dados do método de Blaney & Criddle foram os que apresentaram, no planalto paulista, as maiores discrepâncias em relação àqueles medidos nos evapotranspirômetros, superestimando enormemente os do inverno (parte *C*, das figuras 10, 11 e 12). McCloud & Dunavin encontraram, para a Flórida, cujo clima é tipicamente marítimo, dados bem diferentes. O método, aí, superestimou um pouco a evapotranspiração calculada no inverno, mas a subestimou consideravelmente nos meses do verão, quando é maior a influência marítima no clima.

A modificação proposta aqui para a fórmula de Blaney & Criddle, fez com que apresentasse resultados muito semelhantes aos de Thornthwaite, como mostram os diagramas das partes *A* e *D*, das figuras 10, 11 e 12. Pela sua grande simplicidade poderá nas condições do planalto paulista, ter grande utilidade nos trabalhos em que se fazem necessárias determinações rápidas da evapotranspiração potencial.

O método Penman-Bavel, apresentou dados de menor concordância com os valores medidos, subestimando bastante os dados durante o verão. Foi o método, cujos dados mostraram correlação menos estreita com relação aos medidos, como indicado pelos coeficientes de correlação ( $r$ ), que foram os mais baixos.

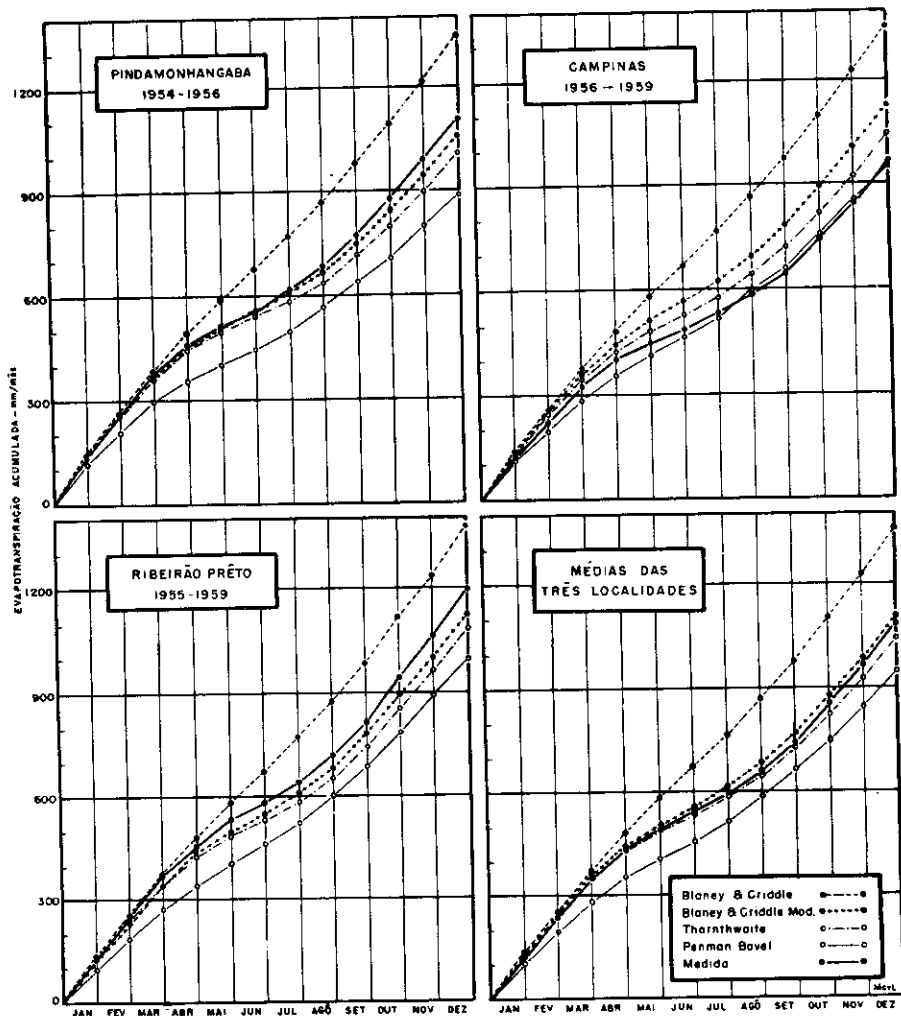


FIGURA 13. — Valores mensais acumulados, da evapotranspiração potencial, medidos nos evapotranspirômetros e calculados pelos diferentes métodos estudados. Dados médios para os períodos de observações em cada localidade e médias gerais das três localidades.

As curvas das figuras 7, 8, 9 e 13 revelam que a evapotranspiração potencial medida nos evapotranspirômetros se mostrou, em geral, mais elevada que a estimada pela equação de Thornthwaite, nas localidades de Pindamonhangaba e Ribeirão Preto e que o oposto se deu em Campinas.

Esse fato pode ser atribuído ao porte do gramado dos lisímetros, geralmente mais elevado que o do externo nas duas primeiras localidades, o que faz intensificar a perda de água por evapotranspiração. Já em Campinas, o gramado dos tanques foi mantido, por meio de podas mais freqüentes, com o mesmo porte do circundante. Além disso, os dados de temperatura aí utilizados no cálculo da evapotranspiração potencial, foram obtidos em estação meteorológica situada em área urbana, alguns quilômetros distante, onde as médias termométricas, anormalmente elevadas, fazem obter dados sobreestimados da evapotranspiração.

No quadro 1 pode-se ver que a temperatura média, para o período de observações nos evapotranspirômetros, mostrou-se, em Campinas, mais elevada que a respectiva média para um período anterior de 10 anos, quando as cercanias da estação meteorológica se achavam menos urbanizadas. Nas outras duas localidades tal não se verificou, pois as temperaturas médias, durante o período de observações, não foram superiores à normal. Com dados melhor representativos da temperatura, podem se esperar valores calculados da evapotranspiração potencial mais aproximados ainda dos valores medidos.

Analisando na figura 13 os dados mensais acumulados da evapotranspiração potencial medida e calculada pelos vários métodos experimentados nas diferentes localidades, pode-se verificar que os valores dados pelas equações de Thornthwaite e de Blaney & Criddle-modificada, foram os que mais se aproximaram dos medidos nos evapotranspirômetros. Em Pindamonhangaba e em Ribeirão Preto, ambas as equações acusaram evapotranspiração um pouco inferior à medida, ocorrendo o oposto em Campinas. Como foi mencionado anteriormente, houve, nas duas primeiras localidades, ligeira sobreestimativa dos dados medidos, por não estar a superfície vegetada dos lisímetros em condições ideais de exposição e na última localidade uma sobreestimativa dos valores calculados pelo fato dos dados de temperatura, utilizados no cálculo, estarem anormalmente elevados, não representando bem as condições do local em que se achavam os evapotranspirômetros.



Em tôdas as localidades, a equação de Blaney & Criddle original, apresentou valores demasiado elevados, mantendo-se as curvas representativas bem acima das demais. Por sua vez, os mais baixos dados acumulados foram oferecidos pelo método de Penman-Bavel.

## 6 — CONCLUSÕES

Os resultados das mesurações da evapotranspiração no planalto paulista, em sua correlação com os valores calculados, permitiram as seguintes conclusões:

1 — Os evapotranspirômetros de Thornthwaite, do tipo modificado em Ibadan, apresentam resultados bastante consistentes e preciosos, desde que instalados, vegetados e operados convenientemente.

2 — Para conseguir vegetação satisfatória com a grama bata-tais nos evapotranspirômetros, as irrigações nos tanques ou lisímetros devem ser reduzidas ao mínimo, em quantidades apenas suficientes para provocar pequena percolação.

3 — A fim de manter boa aeração no solo do tanque e reduzir as perdas de nitrogênio, por lixiviação, as irrigações nos tanques não devem ser diárias mas sim feitas em dias alternados. Num dia se faz a irrigação e no outro a coleta do percolado.

4 — Como tanque, nos evapotranspirômetros, podem ser empregadas com sucesso as caixas de cimento-amianto de tipo padrão existentes no comércio. Elas são duráveis, econômicas e muito práticas.

5 — É indispensável impedir a entrada ou saída de enxurrada nos tanques e também que os estolhos da grama transpassem o bordo dos vasos e enraizem ao mesmo tempo, dentro e fora do vaso.

6 — Para evitar deficiência de nitrogênio causada pela lavagem do solo, é necessário aplicar, periodicamente, em cobertura, um adubo nitrogenado solúvel, sempre que o gramado do tanque apresentar mostras de amarelecimento.

7 — Os dados dos primeiros seis meses de funcionamento dos evapotranspirômetros são normalmente inconsistentes. Somente depois de passar o período de acomodação do solo e da estabilização da vegetação devem os dados ser utilizados.

8 — A equação de Thornthwaite apresenta, nas condições do planalto paulista, resultados mensais muito próximos dos obtidos por medição nos evapotranspirômetros. Dentre os métodos de cálculo utilizados, foi o que apresentou dados com mais estreita correlação e de maior concordância com os medidos.

9 — A menor correlação com os dados medidos, embora ainda bastante elevada, foi obtida com os resultados da equação de Penman-Bavel. Esse método, por sua vez, subestima acentuadamente os dados da evapotranspiração durante o verão e os sobreestima levemente no inverno.

10 — Os dados da equação de Blaney & Criddle original, embora apresentem estreita correlação com os medidos, mostram-se bastante inexatos, para as condições do planalto paulista, uma vez que sobreestimam exageradamente os valores da evapotranspiração na maior parte do ano, sobretudo, durante o inverno.

A equação modificada de Blaney & Criddle apresenta dados bastante consistentes e concordantes com os medidos, aproximando-se bem dos da equação de Thornthwaite. Como é muito simples, não exigindo uso de nomogramas, torna-se útil para o cálculo da evapotranspiração potencial para as condições em que foi experimentada no planalto paulista.

#### CONTRIBUTION TO THE EVALUATION OF THE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION AT THE STATE OF SÃO PAULO

##### SUMMARY

Five-year results from three batteries of evapotranspirometers located at three different places of State of São Paulo plateau were used to verify the Thornthwaite, Fenman-Bavel and Blaney & Criddle formulas for computing the potential evapotranspiration in their latitude and climatic conditions. The tanks used in the evapotranspirometers were commercial, square-shaped asbestos-cement boxes with 0.54 m<sup>2</sup> surface area. Bahiagrass (*Paspalum notatum* Flügge) was planted inside and outside the tanks so that their surface plant cover represented a sample of the entire vegetated area. The tanks, or lisimeters, allow estimating the potential evapotranspiration by difference between the ammount of water added to them every two days as irrigation plus eventual rainfall, and the water leaving the tanks by percolation.

Under the conditions of the State of São Paulo plateau the potential evapotranspiration data in the summer months are about twice those of the winter months. Normally the monthly value amounts to 120 mm in January but does not reach 60 mm in July.

The monthly potential evapotranspiration data were correlated to those computed with Thornthwaite and Blaney & Criddle equations, the Penman-Bavel nomogram and a form of the Blaney & Criddle equation adapted to the State of São Paulo environmental conditions. Very high correlations between measured and computed results were found. The poorest correlations were found with the Penman-Bavel method data. The correlation coefficient ( $r$ ) between computed and measured monthly results at Campinas were the following: Thornthwaite,  $r=0,95$ ; Blaney & Criddle original equation,  $r=0,93$ ; Penman according to Bavel nomogram,  $r=0,89$ .

High accuracy or agreement between the calculated and the measured values was obtained with the Thornthwaite, the modified Blaney & Criddle and the Penman-Bavel methods. The original Blaney & Criddle equation gave very discrepant results with measured ones particularly during the winter months, whose values were highly overestimated. The Penman-Bavel method underestimated moderately the summer values, particularly at the Pindamonhangaba and Ribeirão Preto conditions. On the other hand, the computed potential evapotranspiration data obtained by the Thornthwaite and the modified Blaney & Criddle methods were slightly underestimated at the Pindamonhangaba and Ribeirão Preto areas but overestimated at Campinas.

Both methods, the Thornthwaite and the modified Blaney & Criddle, gave practically similar results, very close to those measured, for the three localities of the State of São Paulo plateau. As computing work with both methods may be easily and quickly made, they are useful for estimating potential evapotranspiration, when numerous determinations are needed. The Thornthwaite formula has the advantage of its universal application, being indicated in the climatologic works. The modified Blaney & Criddle equation, due to its high simplicity may be useful particularly for local studies where tests approved it, like at state of São Paulo plateau.

Special tables containing data for the south hemisphere conditions, and adapted nomograms using millimeter and centigrade scales were prepared and presented in this paper to facilitate computing potential evapotranspiration with the four methods studied.

#### LITERATURA CITADA

1. BAVEL, C. H. M. van. A nomogram to estimate maximum evapotranspiration. North Carolina State Col. 1956. (Mimeografado).
2. BLANEY, HARRY F. & CRIDDLE, WAYNE D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Washington, Soil Conservation Service (48 p) 1950.
3. CAMARGO, A. PAES DE. Possibilidades climáticas da cultura da seringueira em São Paulo. Campinas, Instituto Agrônômico, 20 p. Bol. 110, 1959.
4. ———— O balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônômico, 15 p. Bol. 116, 1960.
5. BEACON, E. L., PRIESTLY, C. H. B. & SWINBANK, W. C. Evaporation and the water balance. Climatology. Reviews of research. Paris, pp. 9-34 1958.

6. HAROLD, L. L. & DREIBELBIS, F. R. Agricultural hydrology lysimeters. U. S. Dept. of Agr., Tech. Bull. n.º 1050, 1951.
7. KING, K. M., TANNER, C. B. & SUOMI, V. E. A floating Lysimeter and its evaporation recorder. *Trans. Amer. Geophys. Union* 37: 738-742, 1956.
8. KOHLER, MAX A. Lake and pan evaporation. *In Water-Loss Investigations: Lake Hefner Studies, Technical Report. Geological Survey Professional Paper 269. Dept. of Interior, pp. 127-148, 1954.*
9. MATHER, JOHN R. Design and evaluation of a modified evapotranspirometer. *Micrometeorology on the surface layer of the atmosphere. John Hopkins University (Interin. report n.º 15) 1951. (Separata).*
10. ——— A summary of evapotranspiration at Seabrook, New Jersey, 1947-1953. *In The Measurement of Potential Evapotranspiration. Publications in Climatology. The Johns Hopkins Univ., Lab. of Climatology, vol. VII, n.º 1, pp 7-28, 1954.*
11. MATHER, JOHN R. A summary of additional evaporation and evapotranspiration measurements. *In The Measurement of Potential Evapotranspiration. Publications in Climatology. The Johns Hopkins Univ., Lab. of Climatology, vol. VII, n.º 1, pp 177-200, 1954.*
12. MCCLLOUD, D. E. & DUNAVIN, L. S. Agrohydrologic balance studies at Gainesville, Flórida. *In The Measurement of Potential Evapotranspiration. Publications in Climatology. The Johns Hopkins Univ., Lab. of Climatology, vol. VII, n.º 1, pp 55-68, 1954.*
13. PAIVA, J. E. (NETTO), CATANI, R. A., KÜPPER, A. (e outros). Observações gerais sobre os grandes tipos de solo do Estado de São Paulo. *Bragantia* 11: 227-253. 1951.
14. PALMER, WAYNE C. & HAVENS, A. VAUGHN. A graphical technique for determining evapotranspirations by the Thornthwaite method. *Monthly Weather Review* 86: 123-128. 1958.
15. PENMAN, H. L. Natural evaporation from water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.* 193: 120-145. 1948.
16. ——— Experiments on irrigation of sugar beet. *J. Agric. Sci.* 42: 286-292. 1952.
17. ——— Evaporation, an introductory survey *Neth. J. Agr. Sc.* 4: 9-29. 1956.
18. PHYSICS ON AGRICULTURE. PROC. INF. MEETING on 1956. Conclusions reached after discussions concerning evaporation. *Neth. J. Agr. Sc.* 4: 95-97. 1956.
19. PRESCOTT, J. A. & STIRK, G. B. Studies on the Piche evaporimeter. *Australian J. Applied Sci.* 2: 243-256, 1951. (Separata).
20. PRUITT, W. O. Relation of consumptive use of water to climate. *Trans. Am. Soc. Agr. Engineers* 3: 9-17. 1960. (Separata).

21. SCHROEDER, R. Distribuição e curso anual das precipitações no Estado de São Paulo. *Bragantia* 15: 194-249. 1956.
22. SETZER, J. Contribuição para o estudo do clima no Estado de São Paulo. *Escolas Profissionais Salesianas*, 239 p., 1946.
23. THORNTHWAITTE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geog. Rev.* vol. 38, pp. 55-94, 1948.
24. ——— A re-examination of the concept and measurement of potential evapotranspirometer. *In* The measurement of potential evapotranspiration. *Publications in climatology*. vol. VII, pp. 200-209, Seabrook, New Jersey, 1954.
25. ——— & MATHER, J. R. The Water Balance. *Publications in Climatology*. vol. VIII, n.º 1. Centerton N. J., 104 p. 1955.
26. ———, WILM, H. G. (e outros) Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943-44. *Trans. Amer. Geophys. Union Part V*, p. 687, 1944.