ESTUDO SOBRE MODIFICAÇÕES INTRODUZIDAS NO TANQUE “CLASSE A” E NO MÉTODO DE PENMAN

ITALO AUGUSTO DE SOUZA ALBERIO

**Engenheiro-Agrônomo
Auxiliar de Ensino da FCAP**

Orientador: Nilson Augusto Villa Nova

**Dissertação apresentada à Escola Superior
de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Agrometeorologia.**

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Maio, 1979

Aos meus queridos pais,
pela educação que me con
cederam e a quem devo o
que sou como HOMEM,

a minha GRATIDÃO

A minha filha MELISSA,
meu "tesouro", à com -
preensão de minha es-
posa VIRGILIA e ao in-
centivo do meu mano
CARLITO,
ofereço

A G R A D E C I M E N T O S

No ensejo da conclusão do presente trabalho ,
quero agradecer às seguintes pessoas e entidades:

Primeiramente a DEUS, por ter-me concedido
força e paz para a realização deste trabalho;

Ao Professor Dr. Nilson Augusto Villa Nova, pe
la orientação precisa e estímulo às idéias aqui apresentadas;

Ao Professor Dr. Jesus Marden dos Santos, Co-
ordenador do Curso de Pós-Graduação em Agrometeorologia, pe-
los esclarecimentos;

Ao Professor Dr. Hermano Vaz de Arruda; da Sec
ção de Climatologia do Instituto Agrônomo de Campinas, pela
orientação na análise estatística dos resultados;

Aos demais professores do Departamento de Fí -
sica e Meteorologia e de outros Departamentos, que de alguma
forma contribuíram para a minha formação;

Ao Departamento de Física e Meteorologia, pela
cessão de seus instrumentos e da área experimental;

À Faculdade de Ciências Agrárias do Pará-FCAP-
à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-ESALQ- e
ao Programa de Ensino Agrícola Superior-PEAS-, pela oportuni-
dade oferecida;

Aos Engenheiros Agrônomos Genário José da Mata,
Carlos Ramires Franco da Encarnação e José da Silva Lemos, pe
la colaboração e ao Engenheiro Florestal José Altino Scardua,
pelas sugestões;

À funcionária Áurea Benedita Michelotto, pela
colaboração durante o Curso;

Aos demais colegas, pela convivência amiga.

Í N D I C E

Página

1. RESUMO	1
2. INTRODUÇÃO	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
4. MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1. Material	19
4.1.1. Medida da Evaporação	19
4.1.1.1. Tanque "Classe A" (ECA)	19
Tanque "Classe A" sifonado (ECAs)	21
4.1.2. Medida da Evaporação à sombra	21
4.1.3. Medida da Evapotranspiração	25
Evapotranspirômetros	25
4.1.4. Elementos de Clima	25
4.2. Métodos	27
4.2.1. Medida da Evaporação	27
Tanque "Classe A" (ECA)	27
Tanque "Classe A" sifonado (ECAs)	28
4.2.2. Medida da Evaporação à sombra	29
4.2.3. Efeito da temperatura da água de recarga	29
4.2.4. Medida da Evapotranspiração	29
4.2.5. Estimativa da Evaporação	30
4.2.6. Estimativa da Evapotranspiração	32
4.2.7. Elementos de Clima	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO : :	34
5.1. Relativos às medidas de Evaporação pelo tanque "Classe A" tradicional (ECA) e com a modificação proposta (ECAs)	34
5.2. Relativos à utilização do evaporímetro Piche na estimativa do componente aerodinâmico da fórmula de Penman	45
5.3. Relativos ao confronto entre a Evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman simplificado e a Evapotranspiração potencial medida	63

5.3. Relativos ao confronto entre a Evapotranspi - ração potencial estimada pelo método de Pen- man simplificado e a Evapotranspiração poten- cial medida	63
5.4. Relativos ao teste da equação do termo aero - dinâmico proposta por Penman para a estimati- va da Evaporação da água e sua aplicabilidade às condições locais	67
5.5. Relativos aos coeficientes determinados para a relação Evaporação estimada/Evaporação me - dida	71
5.6. Relativos à marcha da Evapotranspiração po - tencial diária para o período Fevereiro/Março em Piracicaba	72
5.7. Relativos à utilização do tanque "Classe A" si - fonado na determinação da Evapotranspira ção potencial	75
6. CONCLUSÕES	77
7. SUMMARY	79
8. LITERATURA CITADA	81
9. APÊNDICE	86

1. RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo o estudo sobre simplificação de métodos de medida e de estimativa, tanto da evaporação da água como da evapotranspiração, baseados em tanque "Classe A", no método de Penman e em evapotranspirômetros.

Desenvolveu-se um sistema de medidas para o tanque "Classe A", em que sifões em paralelo mantem o mesmo nível da água a cada recarga diária, minimizando erros pela simplificação da leitura sem perda da precisão, reduzindo o custo do equipamento.

Apresentou-se, também, uma simplificação da equação de Penman para a estimativa da evaporação da água e da evapotranspiração potencial, de modo a permitir o emprego do método em regiões carentes de equipamento, servindo-se do evaporímetro Piche para a determinação do componente aerodinâmico, resultando nas seguintes equações para a região de Piracicaba:

$$(p/evaporação) \quad \frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,115 + 0,101 E_{piche} \quad r^2=0,943$$

$$(p/evapotransp.) \quad \frac{EaT}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,224 + 0,129 E_{piche} \quad r^2=0,958$$

Os coeficientes entre a evaporação estimada pelo método de Penman, tanto na sua forma original como na simplificada e os tanques "Classe A" tradicional e simplificado, mostraram-se coerentes com os resultados encontrados por OLIVEIRA (1971).

Discutiu-se, ainda, a equação indicada por Penman para a estimativa do termo aerodinâmico na sua forma original, em teste que se realizou com o tanque "Classe A" sifonado, dando-lhe condições de sombreamento.

Por fim, confrontou-se valores de evapotranspiração estimada pelo método de Penman simplificado com os medidos nos evapotranspirômetros, para um melhor juízo do comportamento da modificação proposta.

2. INTRODUÇÃO

A passagem da água do seu estado líquido para o de vapor, constitui o fenômeno físico da evaporação.

Na natureza, o termo evaporação se aplica ao fenômeno que ocorre de perda de água por superfícies tais como lagos, rios, oceanos, etc e por superfícies porosas como o solo; entretanto, a perda de água pelo solo não ocorre apenas através da superfície, mas também através da epiderme vegetal, recebendo nesse caso a denominação de transpiração, muito embora, fisicamente, o processo ocorra de maneira semelhante.

A perda de água pelas plantas, incorrendo na diminuição das reservas do solo, se constituiu numa das preocupações dos fisiologistas e agrometeorologistas, uma vez que o elemento água se faz necessário em quantidades variáveis durante o ciclo de uma cultura e a reposição pela natureza, via de regra, não se faz com a devida regularidade, havendo necessidade de frequente suplementação com água através de irrigação a fim de que não haja reflexo negativo no produto final.

Grande número de estudiosos têm proposto modelos para a estimativa da evaporação da água, baseados em leis físicas, bem como têm desenvolvido instrumental numa

tentativa de obter valores que melhor representem o fenômeno em questão, apresentando todos, vantagens e desvantagens; as fórmulas desenvolvidas, trazem, quase sempre, o inconveniente de somente se aplicarem com exatidão à região cujos dados serviram de base, com características peculiares de clima e topografia, não sendo prudente generalizar para outras regiões de condições totalmente diversas daquela. Por outro lado, o instrumental preconizado é de instalação dispendiosa a nível de agricultor e até certo ponto, de difícil manutenção por pessoal não habilitado.

A viabilização de qualquer projeto de irrigação é a maior justificativa para o conhecimento da dotação correta de água.

De todas as fórmulas de estimativa da evaporação, uma das mais aceitas é a de Penman (1963), que apresenta limitações em sua aplicação para regiões onde não existem medidas de velocidade do vento, tomadas ao nível de 2,0 m acima da superfície do solo.

Os instrumentos de medida de evaporação, por sua construção simples e facilidade operacional, têm sido bastante empregados na determinação tanto da evaporação como da evapotranspiração, desde que, para este caso, se aplique um coeficiente adequado a cada cultura.

Dentre os evaporímetros destaca-se o tanque "Classe A", que se constitui em veículo de controle da água a ser aplicada por irrigação. Aos valores medidos da evaporação aplica-se um coeficiente de correção, variável conforme o estágio de desenvolvimento da cultura.

No manuseio do tanque "Classe A", verifica-se, na prática, que o sistema de medidas com micrômetro é de difícil operação no campo, quando operado por pessoas não qualificadas. Além disso, outros cuidados deverão ser levados em conta, tais como o perfeito nivelamento do poço tranquilizador, os erros devidos ao reabastecimento, os quais poderão introduzir mais incorreções nessas medidas.

Vale lembrar que o alto custo dos acessórios necessários ao uso do tanque "Classe A", tem desestimulado a aquisição e o uso deste equipamento pelo agricultor.

Assim sendo e tendo em vista as restrições relativas ao emprego da equação de Penman, as dificuldades de operação e o custo deste evaporímetro, os objetivos principais do presente trabalho foram:

a) desenvolver um novo sistema de medidas de evaporação para o tanque "Classe A", facilitando a leitura sem a perda da precisão, reduzindo o custo do conjunto;

b) contribuir para o estudo das relações entre a evaporação do tanque "Classe A" e a evapotranspiração potencial;

c) estudar a simplificação da equação de Penman para a estimativa da evaporação da água e da evapotranspiração potencial, utilizando o evaporímetro Piche na determinação do componente aerodinâmico;

d) verificar a viabilidade de aplicação da expressão clássica de Dalton para a estimativa da evaporação da água, através da adaptação dos seus parâmetros às condições locais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Os estudos sobre a evaporação da água de superfícies naturais e a transpiração vegetal tem se constituído uma das preocupações de técnicos e pesquisadores, sobretudo para fins de planejamento de época de plantio e de suplementação da água através de irrigação, principalmente em regiões assoladas por longas estiagens.

Segundo ROSENBERG (1974), do total de água retirado do solo pelas plantas, apenas 1% é utilizado nas atividades metabólicas, sendo o restante perdido para a atmosfera sob a forma de vapor pelo processo da transpiração, valor esse, segundo o pesquisador, de difícil determinação no balanço de água do solo pelo método hidrológico, dado principalmente à dificuldade de medidas nos termos de escoamento superficial e de variação do volume de água em um intervalo de tempo.

As técnicas de medida e de estimativa da perda de água, desde as primeiras tentativas, tem sofrido modificações; equações tem sido propostas, umas baseadas em leis físicas, umas empíricas e outras semi-empíricas, procurando solucionar o problema; instrumental tem sido desenvolvido, nas mais variadas formas, tamanho, material, cor e sistema de medidas com o fim precípuo de tornar mais fácil a operação e menos dispendiosa a instalação.

Sobre a evapotranspiração potencial, Penman em 1956 já modificava o conceito de Thornthwaite-1944 que a havia definido como "a perda de água de uma superfície de solo úmido, completamente vegetado e suficientemente grande para tornar desprezível o efeito de oásis", criando o conceito de transpiração potencial como "a perda de água por transpiração na unidade de tempo por uma cultura de porte baixo e altura uniforme, cobrindo totalmente o solo em ótimas condições de umidade". Segundo Penman, para uma cobertura homogênea, subentendendo mesmo albedo, a taxa de transpiração potencial é a mesma, independentemente do tipo de planta ou de solo, sendo regida apenas pelas condições de clima. ASSIS (1978).

A velocidade de perda de água por uma superfície vegetada, sabemos, depende dos fatores meteorológicos e aerodinâmicos relacionados com a arquitetura da comunidade de plantas, como também das propriedades físicas do solo e de seu teor de umidade.

Abordando aspectos dinâmicos da disponibilidade de água no solo, DENMEAD e SHAW (1962) concluíram que, à medida em que diminui a umidade do solo, a transpiração atual cai até um valor abaixo da transpiração potencial.

Seguindo a mesma linha dos pesquisadores acima, EAGLEMAN e DECKER (1965) relacionando a umidade do solo com a taxa de evapotranspiração potencial, observaram influências das flutuações da demanda evaporativa da atmosfera sobre a taxa de evapotranspiração atual; verificaram ainda que, ao contrário do que foi sugerido por Thornthwaite, a taxa de evapotranspiração não segue uma função reta quando a umidade do solo baixa até uma tensão de -15 atmosferas, sendo regida porém por uma função curvilínea.

O albedo é outro elemento que afeta a evapotranspiração, de acordo com Seginer (1969), de modo que a variação do albedo da superfície evaporante implicará numa modificação das condições de refletividade, um dos artifici-

os empregados para reduzir a perda de água. A única preocupação de alguns técnicos tem sido a de diminuir essa perda de água sem se importar com o conhecimento das quantidades, o que também é de suma importância. O albedo e a umidade existente na superfície são dois fatores que regulam a evapotranspiração, estando intimamente ligados; esse fato foi constatado experimentalmente, quando para um aumento de energia refletida da superfície em 1,75 mm em equivalentes de água e vaporada, a redução na evapotranspiração chegou até 1,00 mm em regiões úmidas.

Vários pesquisadores vem estudando o albedo de superfícies vegetadas. SELLERS (1965) indicou para albedo de pastagens verdes, valores variando entre 0,10 e 0,20 e PENMAN, (1963), citando Monteith, indicou para superfícies vegetadas com grama, um albedo médio de 0,25 para efeito de introdução no cálculo do balanço de energia.

SANTOS (1957), entretanto, estudando novas técnicas para a determinação do albedo de superfícies, trabalhando com grama Batatais (Paspalum notatum, Fluegg) e utilizando-se de um espelho parabólico com um pirheliômetro Eppley colocado em seu foco e outro na parte externa, determinou o albedo para aquele tipo de cobertura, com um valor médio de 0,17, bastante coerente com o limite superior tabelado por Sellers e já mencionado.

Estudando a energia empregada no processo de evapotranspiração, TANNER e LEMON (1962) verificaram que a maior fração do balanço de energia é bipartida entre o calor latente destinado a evaporar a água e o calor sensível destinado a aquecer o ar: a distribuição desses valores, porém, está condicionada à disponibilidade de água a evaporar, de modo que quando a superfície se encontra úmida, a parte destinada ao aquecimento do ar é pequena em relação à que se destina à evaporação da água; como a água se constitui em um dos fatores limitantes à evapotranspiração, à medida em que o solo seca, há uma forte tendência em diminuir a taxa de

perda de água; se, entretanto, as plantas estão supridas convenientemente de água e por alguma razão de ordem biológica restringem a passagem de água para a atmosfera, ou por outro lado, a água se encontra em indisponibilidade para as plantas, a maior fração de energia radiante é convertida em calor sensível, em detrimento da evapotranspiração; uma atenção especial deve ser dada ao calor sensível de advecção, o qual afeta a evapotranspiração em locais onde a água se constitui um fator limitante.

LEMON et alii (1957), abordando aspectos de solo, planta e fatores meteorológicos influenciando na evapotranspiração, concluíram que a radiação líquida representa realmente a quantidade de energia disponível aos processos radiativos que ocorrem na superfície, porém essa perda não pode ser estimada unicamente através desse parâmetro e sim relacionando-o com a tensão de umidade do solo e com o modo com que a planta atua sobre o sistema de transferência de água para a atmosfera.

FRISTSCHEN e SHAW (1966) referiram-se a alguns métodos de estimativa da evapotranspiração, dividindo-os em três (3) grupos: um primeiro grupo dos que dependem do conhecimento dessa energia disponível ao processo, um segundo que emprega simplesmente valores de temperatura como uma medida da quantidade de energia e um terceiro que faz emprego de evaporímetros dos mais diferentes tipos. Comparando valores de evapotranspiração (ET) em milho pelos métodos de estimativa com valores de evaporação (EV) fornecidos por tanques, verificaram que a relação ET/EV variou consideravelmente à medida em que variou a densidade do plantio, principalmente em áreas onde o termo advectivo era grande. Esse fato, concluíram, não deverá ser tomado de imediato como verdadeiro, porém merece um estudo mais profundo sobre espaçamentos, fases da cultura e estado fitossanitário.

Preocupados com os aspectos meteorológicos da evapotranspiração, HALSTED e COVEY (1957) alertaram para a

existência de possíveis fontes de erro, comuns a uma série de equações empíricas e semi-empíricas; a parte crítica do estudo se resume na análise das frações de radiação líquida empregada na evaporação da água e no aquecimento do ar e do solo a qual, além de depender da disponibilidade de água ao processo, é influenciada pelas propriedades térmicas do solo, pela turbulência e pela razão de mistura dentro da comunidade vegetal e sobre a mesma. Durante o dia, quando o ar está sendo aquecido, a evapotranspiração atual é menor do que a diferença entre a radiação líquida e a fração destinada ao aquecimento do solo; considerando entretanto uma área irrigada, o ar cederá calor para o solo e assim o valor da evapotranspiração crescerá em relação à radiação líquida equivalente.

van BAVEL e HILLEL (1976) realizaram estudos numéricos através dos quais verificaram que o balanço de energia na superfície de um solo nu e o transporte de calor e de água tanto na camada limite superficial como no solo, são combinados para fornecer a taxa de perda de água por evaporação. A principal conclusão foi o fato de que o conceito histórico de evaporação potencial é impreciso, uma vez que a taxa de evaporação de uma superfície de solo úmido pode variar de mais de 10%, dependendo das propriedades daquele solo.

Estudando a cultura do milho, PETERS (1960) realizou medidas com o fim de dectar a magnitude dos fenômenos de evaporação e evapotranspiração, chegando à conclusão de que, em média, o solo nu é responsável pela metade da perda de água em um campo cultivado; entretanto, deve-se considerar que tais medidas foram efetuadas em período submetido a frequentes chuvas, mantendo o solo constantemente úmido; outrossim, a cobertura de plástico utilizada para proteger o solo do campo cultivado deve ter, de algum modo, alterado o albedo da superfície, modificando a temperatura do solo e, evidentemente, as condições de troca radiativa na cultura: as-

sim considerando, a transpiração atual não deverá representar a realidade da transpiração que poderia ocorrer em condições normais.

Thornthwaite em 1948 desenvolveu esforços no sentido de obter um modelo de estimativa da evapotranspiração potencial. O seu método pretende estimar a evapotranspiração potencial mensal, utilizando apenas valores de temperatura, em que a ETP mensal é dada por $ETP = C \cdot t^a$, onde C e a são constantes e t é a temperatura média do mês; a partir desse modelo, o autor chegou à seguinte expressão:

$$ETP \text{ mensal} = 1,6 (10\bar{T}/I)^a \text{ em mm}$$

onde T é a temperatura média do mês em $^{\circ}C$, I é um índice de calor resultante da somatória dos índices i mensais durante o ano e calculados segundo a expressão:

$$i = (\bar{T}/5)^{1,514}$$

e a é uma função cúbica de I , calculado segundo a expressão:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49$$

de cálculo tedioso, muito embora para alguns locais os valores encontrados tenham se ajustado bem conforme Leeper em 1950 e Sanderson em 1950, citados por ROSENBERG (1974). Tem-se, entretanto, conhecimento da existência de tabelas, as quais vieram simplificar sobremaneira a utilização desse método.

PENMAN (1948, 1952, 1956, 1963) propôs um modelo teórico-empírico para a estimativa da evaporação de grandes superfícies de água, posteriormente adaptado por outros autores para a estimativa da evapotranspiração e no qual envolve dois termos distintos: um energético, implicando no conhecimento da energia líquida disponível na superfície e um termo aerodinâmico, implicando no conhecimento da velocidade média do vento e do déficit de saturação de vapor no ar. Basicamente, o método de Penman diz que:

$$EV \text{ ou } ETP = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot H}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} + \frac{E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad \text{em mm}$$

onde Δ representa a tangente à curva de saturação de vapor em mmHg/°C, γ é a constante psicrométrica em mmHg/°C, H é a radiação líquida disponível ao processo e resultante do balanço de energia e E_a , calculado empiricamente, é função da velocidade do vento e do déficit de saturação e dado em mm.

PENMAN (1963) indicou para a determinação do termo E_a , quando se trata de estimar a evaporação da água, a seguinte expressão:

$$E_aV = 0,35 (0,5 + U_2/160,9)(e_s - e_a)$$

e para aplicação da sua equação à estimativa da evapotranspiração potencial (para superfícies rugosas como uma superfície vegetada) o autor indicou para a determinação do termo aerodinâmico a expressão abaixo:

$$E_aT = 0,35 (1,0 + U_2/160,9)(e_s - e_a)$$

e nas quais, U_2 representa a velocidade média do vento em km.dia⁻¹ e $(e_s - e_a)$ representa o déficit de saturação de vapor em mmHg.

van BAVEL e HARRIS (1962) estudaram uma simplificação, para tornar mais prático o emprego da fórmula de Penman, em que sugeriram duas modificações na determinação do termo energético e compararam os resultados obtidos com medidas efetuadas em lisímetros de percolação, uns plantados com grama rasteira e outros com milho. Nessas comparações, verificaram os autores que, de um modo geral, todas as estimativas concordaram com os valores medidos, considerando um longo período. Numa das modificações, sugeriram que se substituisse o valor de H (balanço de energia) por $0,8 H$, uma vez

que em média, postularam os autores, apenas 80% da energia líquida disponível é empregado no processo da evapotranspiração.

O método de Penman para a estimativa dos processos em apreço, encontra entretanto certas limitações em regiões com estações meteorológicas carentes de equipamentos. Esse fato levou VILLA NOVA e OMETTO (1975) a estudar uma simplificação do referido método para diversas localidades do Estado de São Paulo; as modificações propostas para o método de Penman resultaram em duas equações simplificadas para a estimativa da evapotranspiração potencial e duas outras para a estimativa da evaporação potencial, nos períodos de Primavera-Verão e Outono-Inverno, empregando o evaporímetro Piche na determinação do componente aerodinâmico e tornando mais prática a expressão para a determinação do termo energético, resultando no seguinte modelo:

$$ETP \text{ ou } EV = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_0 (a + b n / N) + \Omega E_{\text{piche}}$$

válido para locais de clima semelhante ao das regiões consideradas ou moderadamente seco; nesse modelo, Δ e γ têm os mesmos significados mencionados anteriormente, E_{piche} representa a evaporação ocorrida no evaporímetro Piche e Ω é um fator de conversão para esse evaporímetro a fim de se estimar a contribuição do vento e do déficit de saturação. Simplificada dessa maneira, o método de Penman passa a prescindir de dados de umidade relativa e de velocidade do vento, sendo indicada para regiões em que não existem estações completas.

Segundo PRUIT (1966), o emprego de evaporímetros no estudo da relação entre a evapotranspiração de uma área gramada com a evaporação de superfícies de água é bastante válido; torna-se, porém, necessário, que se domine bem o conhecimento de certos fatores tais como a forte advecção existente atuando na relação ET/EV, o que vem a demonstrar

que o emprego de tanques se constitui apenas em uma ferramenta a mais, de modo que, para cada local, com características próprias de clima, torna-se necessário uma adequação dos equipamentos de medida.

O emprego de lisímetros e de evapotranspirômetros tem sido difundido em aplicações práticas, oferecendo resultados representativos do consumo de água pelas culturas.

SLATYER e McILROY (1961), destacaram que um lisímetro convenientemente construído e operado, se constitui sem dúvidas no meio mais real, direto e preciso de se medir a evapotranspiração.

RITCHIE e BURNETT (1968), trabalhando com um lisímetro para medidas de consumo de água, verificaram que quando o conjunto era submetido a um período de escassez de água, mostrou-se bastante eficiente nas medidas de fluxo para pequenos períodos, havendo porém uma grande influência do vento no seu funcionamento, fato esse, segundo os autores, já constatado por van Bavel e Myers em 1962 e Pruitt e Angus em 1960.

ENGLAND (1963), com um lisímetro modificado a partir de um tanque evaporimétrico montado sobre um sistema de pesagem, obteve medidas com uma precisão de 0,125 mm de evapotranspiração. Efetuando leituras ao nascer e ao por do sol durante três (3) anos de observação, verificou uma variação nos valores medidos dia a dia, função da variação dos períodos diurnos.

HANS e SHAWCROFT (1965) trabalharam com um lisímetro com princípio de funcionamento baseado na variação de peso; entretanto o sistema se via afetado pela temperatura e pela tração durante longos períodos, o que provocava erros de medida.

Na Índia, DAGG (1970) trabalhou com lisímetro hidráulico na medida da evapotranspiração de uma cultura de chá; pelos resultados obtidos pode-se assumir que o sistema funcionou bem, mostrando-se capaz de fornecer dados consis -

tentes.

EKERN (1966) estudando a evapotranspiração de grama Bermuda (Cynodon dactylon, L.Pers.) em lisímetros, verificou que sob altas taxas de evapotranspiração potencial, o uso consuntivo pela vegetação foi aproximadamente igual ao valor de evaporação dado pelo tanque "Classe A" quando o solo se encontrava próximo da capacidade de campo. Entretanto, à medida em que diminuía a umidade, a relação evapotranspiração potencial/evaporação do tanque "Classe A" também diminuía, variando de um máximo de 1,1 a um mínimo de 0,33, evidenciando a dependência da água pela cultura e a utilidade daquele evaporímetro na determinação da evapotranspiração potencial, desde que se aplique um coeficiente de correção conforme o grau de umidade do solo.

No Brasil, CAMARGO (1966) realizou estudos sobre evapotranspiração potencial em três (3) localidades do Estado de São Paulo, empregando evapotranspirômetros de percolação nos quais plantou grama Batatais (Paspalum notatum, Fuegg) comparando os valores medidos com quatro diferentes métodos de estimativa. Constatou que os valores se mostraram consistentes com aqueles estimados pelos métodos de Thornthwaite e de Blaney e Criddle modificado. Confrontando os valores medidos com os estimados pelos métodos de Penman-Bavel e de Blaney e Criddle original, verificou uma discrepância entre os mesmos: os métodos em questão, indistintamente, sobrestimavam os valores no período hibernar e subestimavam no período estivar.

Posteriormente, ORTOLANI et alii (1966) verificaram que o método de Penman sobrestima o fenômeno em apenas 2%, enquanto que o de Thornthwaite na realidade os subestima em cerca de 9%.

Em Piracicaba, ASSIS (1978) trabalhou com evapotranspirômetros com sub-irrigação, empregando um alimentador para três unidades. Ao alimentador foi adaptado um sistema de registro contínuo. O conjunto mostrou grande sen-

sibilidade, com precisão aceitável para fins práticos, sendo que o sistema de registro permitiu avaliar a marcha da evapotranspiração potencial, através da determinação de valores de $\Delta ETP / \Delta t$.

Com referência à evaporação de superfícies de água, WARTENA e BORGHORST (1961) constataram que a evaporação ocorrida em tanques, está intimamente ligada às condições de temperatura do solo e de nebulosidade. Esse fato levou-os a realizar estudos nos diferentes termos do balanço de energia em um tanque "Classe A", observando que, do total de energia incidente que penetra na água, 8% da radiação de onda curta é refletida e particularmente a radiação difusa é refletida pelo fundo do tanque.

FITZPATRICK e STERN (1966) verificaram a viabilidade da simplificação do método de Penman para a estimativa da evaporação de superfícies de água. Segundo os autores, tanto o termo energético como o aerodinâmico poderão ser estimados empiricamente, baseados respectivamente na relação "horas de insolação/duração do período diurno" (n/N) e nos valores obtidos com o evaporímetro Piche.

STANHILL (1962) correlacionou valores de evaporação obtidos com o evaporímetro Piche àqueles da fração aerodinâmica da equação de Penman, resultando numa equação do tipo " $y = a + bx$ ". A contribuição do vento e do déficit de saturação, estimada dessa maneira, apresentou uma diferença de aproximadamente 15%. Assim, o emprego desse método na estimativa da evaporação de superfícies de água, tornou-se acessível a inúmeras regiões carentes de anemômetros instalados a 2,0 m da superfície do solo.

O emprego de fórmulas empíricas para a estimativa da evaporação de superfícies de água para qualquer região não parece ser aconselhável como bem demonstra BURMAN (1976), que comparou valores medidos pelo tanque "Classe A" com os estimados por três (3) métodos de estimativa, constatando que alguns deles, em certas localidades sobrestimam os valores medidos enquanto que em outras ocorre o inverso.

valores medidos enquanto que em outras ocorre o inverso.

Muito embora destaque o método de Penman como dos que mais fielmente exprimem a evaporação de superfícies de água, LINACRE (1977) propôs um método bastante simples no qual emprega apenas valores de temperatura média do ar e temperatura do ponto de orvalho, com o objetivo de atender regiões onde não existam elementos que permitam o emprego de um método mais completo como o de Penman. Desse modo, com o mesmo modelo, variando apenas o valor do albedo e alguns coeficientes, o método se aplica à estimativa da evaporação e da evapotranspiração.

BRUTSAERT e YEH (1970) comentaram sobre o emprego de métodos empíricos de transporte de massa em lagos e em tanques de evaporação ao nível do solo, e em que pese as limitações inerentes a cada um, ainda se constituem nos principais meios de estimativa de evaporação de superfícies de água, especialmente em regiões carentes de equipamentos específicos. Tais fórmulas, entretanto, deverão ser devidamente adaptadas à região para uma melhor avaliação do fenômeno.

Os evaporímetros têm sido usados como indicador da necessidade hídrica de culturas, com excelentes resultados, como é o caso do tanque "Classe A", a ponto de serem recomendados como método de maior viabilidade prática na estimativa da frequência e da quantidade de aplicação de água através da irrigação, conforme DOORENBOS e PRUIT (1975).

Ainda que apresente vantagens sobre outros evaporímetros, como bem se refere GANGOPADHYAYA *et alii* (1966), o emprego do tanque "Classe A" traz certos inconvenientes como a quantidade de energia direta e difusa recebida em suas paredes e a existência de obstáculos em sua proximidade os quais alteram o comportamento do vento, interferindo na representatividade dos valores medidos.

HANSON e RAUZI (1977) observaram que obstáculos próximos ao tanque "Classe A", provocaram uma redução de cerca de 15% na evaporação. Essa redução verificou-se devido

ã diminuição na velocidade do vento, muito embora a turbulência originada tendesse a compensar aquele efeito.

OLIVEIRA (1971) realizou estudos sobre o comportamento dos tanques "Classe A" e "GGI-3000" em diferentes condições de exposição e com a adaptação de coberturas de tela, relacionando os valores obtidos com os estimados segundo o método de Penman. Os coeficientes mensais entre a evaporação estimada e a evaporação medida pelo tanque "Classe A" variaram de 0,70 a 0,89, com uma média anual de $EVPen/ECA$ de 0,76 para a região de Piracicaba.

CAMPBELL e PHENE (1976) adaptando cobertura de tela com o fim de evitar o consumo de água do tanque "Classe A" por animais, observaram que os valores medidos foram menores do que os valores da evapotranspiração em cerca de 2%

A simplificação do sistema de leitura desse evaporímetro tem sido o objetivo de muitos pesquisadores como PHENE e CAMPBELL (1975), o que levou ASSIS (1978) a efetuar modificações no sistema de medida do tanque "Classe A" com a vantagem de o mesmo funcionar a nível constante e apresentar seu sistema de leituras em escala graduada bem mais simples do que no micrômetro, apresentando correlação altamente significativa com o sistema tradicional.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Os valores utilizados no presente trabalho foram coletados na estação meteorológica do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", na cidade de Piracicaba, Estado de São Paulo na posição de:

Latitude (ϕ): 22°43,0'S

Longitude (λ): 047°38,0'W

Altitude (Alt): 576 m

no período de 01.06.1978 a 04.03.1979.

A Figura 1 representa a planta da situação geral da área em que foi conduzido o trabalho.

4.1. Material

4.1.1. Medida da Evaporação

Os valores referentes à evaporação da água foram obtidos em evaporímetros com as seguintes características:

- Tanque "Classe A" (ECA) = tanque cilíndrico construído em chapa galvanizada nº 22 (AWG), com 120,0 cm de diâmetro e 25,0 cm de profundidade, tendo como acessórios para as medidas, um poço tranquilizador convencional nivelado por três (3) parafusos e um micrômetro capaz de medir variações do nível da água de até 0,02 mm; tal micrômetro fi-

LE GENDA

1. Abr. meteorológico
2. Abr. anemômetro
3. Casa do observador
4. Pluviômetros
5. Pluviômetro FUESS
6. Para-raios
7. Tanque GGI-3000
8. Actinômetro
9. Heliômetro
10. Tanque Classe A
11. Evapotranspirômetros
12. Mastro
13. Radiômetros evaporm.
14. Tanque 20m²
15. Anemômetro a 2,0 m
16. Anemômetro a 0,5 m
17. Tanque Classe A sif.
18. Evaporímetro de solo
19. Abrigos termométricos.

FIGURA I- Planta baixa da área em que foi conduzido o experimento.

riações do nível da água de até 0,02 mm; tal micrômetro fica assentado sobre o poço tranquilizador por ocasião da tomada de leitura. Esse tanque está assentado sobre um estrado de madeira pintado de branco, com a superfície a 15,0 cm do solo. Detalhes na Figura 2.

- Tanque "Classe A" sifonado (ECAs) - Tanque cilíndrico, com as mesmas características do anterior.

Esse tanque apresenta uma modificação no seu sistema de medidas de evaporação, como é mostrado com detalhes nas Figuras 3 e 4. O reabastecedor é construído do mesmo material do tanque, com diâmetro de 27,0 cm, pintado de branco, tendo pela parte externa em toda a sua altura um tubo de vidro, indicador do nível da água devidamente acoplado a uma escala graduada em milímetros de água evaporada do tanque, oferecendo desse modo uma leitura direta, com precisão de 0,1 mm, suficiente para fins práticos; um tubo de cobre, acompanhando o fundo do tanque, conduz a água do reabastecedor até o centro do evaporímetro e dispõe de uma cobertura a fim de amortecer o jato de água por ocasião da operação; a uma altura de 19,5 cm, um conjunto de 11 sifões em paralelo, tendo a extremidade interna protegida por um poço tranquilizador de duplo fundo (câmara de sifonação), fornece a referência de nível. Tal como o tanque "Classe A", este também está assentado sobre um estrado de madeira com a mesma altura; a relação "área do reabastecedor/área do tanque" é de 1:20.

Ambos os evaporímetros estão representados por duas (2) unidades.

2.1.2. Medida de Evaporação à sombra

A medida de evaporação à sombra foi tomada adaptando-se a uma das unidades do tanque "Classe A" sifonado, durante os últimos três meses de trabalho, uma cobertura de lençol plástico com superfície refletora branca e com as seguintes dimensões: 2,0 m X 3,0 m; essa cobertura era suportada por quatro (4) piquetes a uma altura de 50,0 cm da

VISTA DO TANQUE "CLASSE A"

DETALHE DO SISTEMA DE MEDIDAS

FIGURA 2. Vista do tanque CLASSE A" e detalhe do sistema de medidas.

FIGURA 3. Vista geral do conjunto Tanque "Classe A" sifonado-Reabastecedor.

Vista frontal

Vista lateral

FIGURA 3. Detalhes do sistema de medida do tanque "Classe A" sifonado.

borda do tanque, ficando sua maior dimensão colocada segundo a orientação Leste-Oeste verdadeiro,

4.1.3. Medida da Evapotranspiração

Evapotranspirômetros - Utilizou-se uma bateria de evapotranspirômetros constituída de cinco (5) unidades com sub-irrigação, os mesmos utilizados por ASSIS (1978).

Cada evapotranspirômetro é construído em chapa galvanizada, possuindo as seguintes dimensões: 184,0 cm de comprimento, 134,0 cm de largura e 32,0 cm de profundidade; no fundo foi colocada uma camada de areia de 4,0 cm de espessura e a seguir foi preenchido com solo peneirado, classificado como terra roxa estruturada, série "Luiz de Queiroz" (Alfisol), segundo RANZANI *et alii* (1966) e no qual foi plantada grama Batatais (*Paspalum notatum*, Fluegg), mantida com uma altura aproximada de 10,0 cm através de cortes periódicos.

Esses evapotranspirômetros eram comunicados inicialmente com cinco (5) reabastecedores construídos em PVC rígido, com diâmetro de 25,8 cm e uma altura de 50,0 cm, estabelecendo uma relação de área entre o reabastecedor e o evapotranspirômetro de 1:47,2.

Pela parte externa, cada reabastecedor tinha um tubo de vidro indicador do nível da água acoplado a uma escala graduada em milímetros de altura de lâmina de água evaporada no evapotranspirômetro e um vernier facilitava a leitura das frações de milímetro.

Entre cada evapotranspirômetro e o seu reabastecedor foi intercalada uma caixa de passagem construída em chapa galvanizada e na qual um sistema de boia controlava a admissão de água; as ligações "reabastecedor-caixa de passagem-evapotranspirômetro" foram feitas com tubos plásticos transparentes e flexíveis. Detalhes na Figura 5.

4.1.4. Elementos de Clima

Na observação dos elementos de clima, foram

FIGURA 5

Corte do conjunto de um evapotranspirômetro

Planta baixa da bateria de evapotranspirômetros

empregados os seguintes instrumentos:

Temperatura do ar - obtida diariamente por meio de dois (2) termômetros de máxima e de mínima de fabricação FUESS, modelos 43c e 43d respectivamente, com escala graduada em graus Celsius e com divisão de $0,2^{\circ}\text{C}$, instalados no abrigo meteorológico.

Umidade relativa do ar - obtida através de um termo-higrógrafo de fabricação FUESS modelo 159r, de rotação semanal, devidamente calibrado e apresentando uma precisão de $\pm 5\%$.

Velocidade do vento - foi medida com um anemômetro integrador de fabricação FUESS modelo 91g, instalado ao nível de 2,0 m da superfície do solo.

Precipitação - os dados referentes à precipitação, foram obtidos com pluviômetros HH, com leitura em proveta graduada em mililitros, posteriormente convertidas em milímetros.

Insolação - as horas de brilho solar foram obtidas com um heliôgrafo Campbell-Stokes de fabricação FUESS, modelo 96c.

Poder evaporante do ar - para essas medidas, utilizou-se um evaporímetro Piche de fabricação FUESS, modelo 72c, instalado no abrigo meteorológico e com o disco de papel situado a 2,0 m da superfície do solo.

Temperatura da água do tanque "Classe A" - a temperatura da água foi obtida diariamente por meio de dois termômetros de máxima e de mínima de fabricação FUESS, com as mesmas características dos já mencionados e montados em um suporte flutuante, ficando devidamente protegidos da incidência direta dos raios solares, permanecendo os seus bulbos imersos na água a aproximadamente 0,1 cm da superfície.

4.2. Métodos

4.2.1. Medidas da Evaporação

Tanque "Classe A" (ECA) - As medidas da eva -

poração foram tomadas diariamente, ao nascer e ao por do sol durante os primeiros sete (7) meses e apenas ao nascer do sol durante os dois (2) meses.

O nível da água era deixado inicialmente a 5,0 cm da borda do tanque e restabelecido quando atingia o nível de 7,5 cm da borda, segundo recomendação da OMM.

As leituras foram efetuadas com um micrômetro e a evaporação do período era obtida por diferença entre as leituras de duas operações consecutivas, defasadas 24 horas.

Tanque "Classe A" sifonado (ECAs) - O funcionamento do tanque "Classe A" sifonado (ECAs) baseia-se em refazer o nível baixado desde o início do período, para que se obtivesse o valor da evaporação das últimas 24 horas.

A modificação do sistema de medidas consistiu da adaptação de um conjunto de sifões em paralelo, construídos em tubo de cobre com diâmetro de 0,4 cm, ficando suas extremidades internas protegidas por um poço tranquilizador (câmara de sifonação) de paredes simples e duplo fundo, cuja finalidade era a de quebrar a turbulência na entrada da água na câmara.

A cada dia, ao nascer e ao por do sol, abria-se o registro do reabastecedor, admitindo água na parte central do fundo do tanque, até se observar que o nível da água elevava-se até atingir a extremidade do conjunto de sifões na câmara de sifonação; ato contínuo, o registro do reabastecedor era fechado. A seguir, tova-se com um recipiente um pouco da própria água do tanque, a qual era colocada dentro da câmara de sifonação, elevando rapidamente o nível da água na mesma, acionando assim o sistema de sifões e fazendo com que o excesso de água admitido na operação de recarga do tanque fosse recolhido em um coletor à saída dos sifões; após cessar o escoamento, esse excesso era levado de retorno ao reabastecedor, sendo então efetuada a leitura na escala graduada em milímetros, acoplada ao tubo de vidro indicador do nível da água; por diferença entre as leituras de duas operações con -

secutivas, obtinha-se o valor da evaporação do período anterior.

4.2.2. Medidas da Evaporação à sombra

Esta operação foi realizada com uma das unidades do tanque "Classe A" sifonado (ECAs sombra) durante os três (3) últimos meses de trabalho (dezembro de 1978 a fevereiro de 1979). À maneira da operação acima, esta era, entretanto realizada apenas ao nascer do sol, admitindo-se água no tanque a fim de refazer o nível de referência dado pelo conjunto de sifões, o qual baixava por efeito da evaporação em função do vento e do déficit de saturação do ar.

Cessado o escoamento do excedente de água admitido por ocasião da recarga, era levado de retorno ao reabastecedor, após o que era efetuada a leitura na escala graduada em milímetros, acoplada ao longo do tubo de vidro no reabastecedor. Por diferença entre as leituras de duas operações consecutivas, obtinha-se o valor da evaporação do período, à sombra.

4.2.3. Efeito da temperatura da água de recarga

Em várias ocasiões, foi tomada a temperatura da água do reabastecedor para efeito de comparação com a temperatura da água do tanque, valendo-se para isso de um termômetro de fabricação FUESS. Essas leituras eram efetuadas ao nascer do sol.

4.2.4. Medida da Evapotranspiração

Na bateria de evapotranspirômetros, o nível do lençol freático foi mantido constante, aproximadamente a 19,0 cm do solo.

Diariamente, ao nascer do sol, eram feitas as leituras do total evapotranspirado desde o nascer do sol no dia anterior, após o que os reabastecedores eram "zerados".

O funcionamento ocorria da seguinte maneira : com a evapotranspiração, havia um abaixamento do lençol freático de uma altura Δh ; esse abaixamento, pelo princípio fi-

sico dos vasos comunicantes, fazia com que a caixa de passagem suprisse de água o evapotranspirômetro até estabelecer um novo equilíbrio; esse suprimento, por sua vez, provocava um abaixamento no nível da água na caixa de passagem, fazendo com que a boia liberasse a agulha, admitindo água do reabastecedor no mesmo volume correspondente à evapotranspiração, volume esse transformado em lâmina correspondente à área do evapotranspirômetro, com leitura na escala graduada em milímetros, acoplada ao tubo de vidro indicador de nível da água no reabastecedor.

Durante a noite, dado o difícil deslocamento em tempo hábil e durante o dia, quando havia condições de cobertura do céu por núvens de chuva ameaçando precipitar, a bateria de evapotranspirômetros era protegida com uma cobertura de lençol plástico em armação de madeira, suportada por quatro (4) piquetes a 30,0 cm da superfície gramada, guardando uma inclinação para facilitar o escoamento da água por ocasião da chuva.

A partir dos últimos 20 dias de observação, as repetições A, B e D foram reunidas através de uma só caixa de passagem, a qual era alimentada por um só reabastecedor, oferecendo uma relação de 1:30, e ao qual foi adaptado um sistema de registro à semelhança do que foi empregado por ASSIS (1978), possibilitando desse modo a determinação dos valores de $\Delta ETP/\Delta t$ em milímetros por hora, diariamente, de modo a se estabelecer o comportamento médio da evapotranspiração potencial diária naquele período.

4.2.5. Estimativa da Evaporação

A evaporação foi estimada através do método de Penman (1963), já consagrado e tido como dos mais representativos do fenômeno.

Penman dá como expressão para essa estimativa:

$$EV = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot H + EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad \text{em mm}$$

na qual os termos Δ , γ , H , EaV foram calculados a partir de expressões e representam:

Δ - a tangente à curva de saturação de vapor e foi calculada para uma amplitude de temperatura de 00,0°C a 28,9°C, derivando a expressão de Tetens:

$$e_s = 6,11 \times 10^{\frac{a \cdot T}{b+T}} \times 0,75 \text{ mmHg} \quad \begin{matrix} a = 7,5 \\ b = 237,5 \end{matrix}$$

onde e_s é a tensão de saturação de vapor à temperatura do ar tomada no abrigo em graus Celsius, resultando então na seguinte expressão:

$$\frac{d e_s}{d t} = \frac{18779,5 \times 10^{\frac{a \cdot T}{b+T}}}{(b + T)^2} \text{ mmHg.}^\circ\text{C}^{-1}$$

APÊNDICE 1

γ - é a constante psicrométrica e foi determinada para psicrômetro não ventilado para uma pressão atmosférica variando na época entre 710,0 a 720,0 mmHg, obtendo-se um valor de $\gamma = 0,57 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$

H - é o valor diário do balanço de energia e foi estimado segundo a expressão abaixo, em mm equivalente de água evaporada:

$$H = \frac{Q_0}{59} (a + bn/N)(1-r) - \frac{T_a^4}{59} (0,56 - 0,09 e_a)(0,1 + 0,9n/N) \text{ mm}$$

e onde o termo Q_0 é, por sua vez, estimado segundo a expressão:

$$Q_0 = \frac{1440}{\pi} S (\bar{d}/d)^2 (\sin \phi \cdot \sin \delta \cdot h_1 + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin h_2)$$

SELLERS (1975).

APÊNDICE 3

Nas expressões para a estimativa de H e Q_0 :

n - insolação diária em horas e décimos;

N - duração do período diurno, estimado através da expressão

$$N = 0,133 \text{ arc cos } (-\text{tg} \phi \cdot \text{tg} \delta) \quad \text{APÊNDICE 4}$$

r - albedo médio para superfícies de água, tomado como 0,05 (Penman, 1963)

σ - constante de Stefan-Boltzman, $8,123 \times 10^{-11} \text{ cal.cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{°K}^{-4}$

T_a - temperatura média do ar em °K. No APÊNDICE 2, tabela com o produto σT_a^4 .

e_a - tensão atual de vapor no ar em mmHg, determinada através da expressão:

$$e_a = (e_s \cdot UR) / 100$$

$\bar{d}$ - distância média Terra-Sol em unidades astronômicas.

d - distância Terra-Sol no dia considerado e nas mesmas unidades.

S - constante solar, assumida como $2 \text{ cal.cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$

ϕ - latitude do lugar

δ - declinação do sol para o dia considerado

h_1 - ângulo horário local ao nascer do sol, em radianos

h_2 - ângulo horário local ao nascer do sol, em graus

$\underline{a}$ e $\underline{b}$ - coeficientes assumidos para Piracicaba e determinados por OMETTO (1973) como 0,26 e 0,51 respectivamente.

E_a - poder evaporante do ar, estimado através da expressão a seguir:

$$E_a V = 0,35 (0,5 + U_2/160,9) (e_s - e_a) \text{ mm}$$

onde U_2 representa a velocidade média do vento em km.dia^{-1} e $(e_s - e_a)$ representa o déficit de saturação de vapor no ar em mmHg.

4.2.6. Estimativa da Evapotranspiração

Do mesmo modo considerado para a estimativa da evaporação da água, a evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de PENMAN (1963), na qual substituiu-se o valor de albedo médio para a grama Batatais (*Paspalum notatum*, Fluegg) igual a 0,17, determinado para esta região por SANTOS (1957) e a expressão para a estimativa do termo E_a , proposta para superfície vegetada, tomou a seguinte forma:

$$EaT = 0,35 (1,0 + U_2/160,9) (e_s - e_a) \text{ mm}$$

cujas incógnitas já foram comentadas.

4.2.7. Elementos de Clima

Para a obtenção dos valores dos elementos de clima, foram utilizados os instrumentos instalados na própria estação meteorológica e aos quais já nos reportamos no parágrafo 4.1.4.:

Temperatura do ar - a temperatura média do ar foi obtida diariamente através da expressão:

$$t_m = \frac{t_x + t_n}{2}$$

utilizando-se os valores de temperatura máxima (t_x) e de temperatura mínima (t_n).

Umidade relativa do ar - a umidade relativa média diário foi calculada através da expressão:

$$UR_m = \frac{UR_{6h} + \dots + UR_{24h} + \dots + UR_{5h}}{24}$$

com os valores retirados do registro do termo-higrógrafo.

Velocidade do vento - a velocidade média do vento foi obtida através de um anemômetro instalado ao nível de 2,0 m da superfície do solo e obtida em km.dia^{-1} por diferença entre as leituras de dois dias consecutivos, à mesma hora.

Precipitação - os valores de precipitação foram obtidos através de dois pluviômetros HH com proveta graduada em mililitros e posteriormente convertida em altura de lâmina de água em função da área do instrumento.

Insolação - os dados referentes à duração do brilho solar foram obtidos das fitas do heliôgrafo, em horas e décimos.

Poder evaporante do ar - foram obtidos por diferença entre duas leituras consecutivas do evaporímetro Piche em dias consecutivos.

Temperatura da água do tanque - para esse cálculo, utilizou-se a mesma expressão para a temperatura média do ar.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1: Relativos às medidas de Evaporação pelo tanque "Classe A" tradicional (ECA) e com a modificação proposta (ECAs).

Os valores de evaporação medidos pelo tanque "Classe A" com o sistema convencional de medidas (ECA) e pelo tanque "Classe A" sifonado, estão representados na Tabela 1 (valores diários) e na Tabela 2 (valores médios de cinco (5) dias).

Colocados em gráfico, o lugar geométrico dos pontos se aproximou de uma reta de 45° de inclinação a partir da origem dos eixos, parecendo com isso que a modificação proposta para as medidas, não difere do sistema usado para esse tipo de evaporímetro.

Analisando estatisticamente os desvios entre os valores obtidos com os dois sistemas, chegou-se ao seguinte quadro de resultados:

PERÍODO	r	t	t _{10%}	t _{5%}	t _{1%}	CV	
						ECA	ECAs
DIÁRIO	0,9792	0,242	1,65	1,96	2,58	39,07	38,34
MÉDIAS DE 5 DIAS	0,9935	0,490	1,68	2,02	2,70	34,50	33,54

Pelos resultados apresentados, verifica-se uma alta correlação entre os dois sistemas, tanto quando se tomou para estudos os valores diários como os valores médios de cinco (5) dias; os desvios entre as leituras pelos dois sistemas de medidas em ambos os casos não mostraram significância e os coeficientes de variação comprovam o comportamento idêntico.

Os valores de ECA versus ECAs mostram entre tanto que, na maioria dos casos -60%- a modificação proposta sobrestimou o fenômeno em relação ao sistema tradicional de medidas; em 32% dos casos, subestimou e em apenas 8% não houve diferença, de modo que, no total, o sistema modificado apresentou uma tendência em sobrestimar os valores de evaporação, quando considerou-se o sistema tradicional como padrão para esse tipo de medida.

O fato dessa sobrestimativa deve-se a que, na maioria dos dias, por ocasião da leitura ao por do sol, a superfície de água estar submetida à intranquilidade devida à ação do vento, de modo que quando o nível da água se encontrava próximo da referência (dada pela extremidade interna do sistema de sifões) durante a operação, o sistema de medidas admitia ar, prejudicando assim o seu funcionamento e consequentemente a leitura; a interferência do vento, evidentemente, crescia com a sua velocidade e a partir de 4,0 m/s a agitação provocada na superfície, por vezes prejudicava a operação de leitura.

Essa tendência em fornecer valores mais elevados durante o dia, como é mostrado na Tabela 3 era entretanto compensada pelo próprio sistema durante a operação ao nascer do sol, obtendo-se valores inferiores que compensavam o total diário.

O tempo máximo observado para que o instrumento completasse a operação - da admissão de água no tanque ao equilíbrio final após sifonar o excesso - foi de 5 minutos aproximadamente, quando então esse remanescente da operação an

terior era sifonado.

As Figuras 6 e 7 mostram a dispersão dos valores obtidos pelos dois sistemas, respectivamente em base diária e com base em médias de 5 leituras.

A Figura 8 mostra a marcha da evaporação diurna e noturna durante o período em que foi conduzido o experimento com duas observações diárias, abrangendo diferentes condições de energia - baixa (junho), média (setembro) e alta (dezembro) - bem como diferentes durações do período diurno.

Pelo que foi dado observar, durante o inverno (não muito rigoroso na época), com os dias menores do que as noites, a incidência de baixa energia radiante condicionava uma igual contribuição dos dois períodos para a evaporação de 24 horas, tendo uma vez ou outra a evaporação noturna sobrepujado a evaporação diurna; à medida em que se aproximava o verão, com o aumento da energia incidente, observou-se que a contribuição diurna chegou a ser de 80% do total diário.

Em face disso é de se supor que em condições de inverno mais acentuado, muito frequente a partir de médias latitudes, a contribuição noturna aproxima-se da diurna uma vez que o déficit de saturação entre o ar e a superfície da água deve ser mantido aproximadamente constante por causa do maior resfriamento noturno e da energia absorvida durante o dia.

Tabela 1. Continuação.

DIA	DEZEMBRO			JANEIRO			FEVEREIRO		
	ECA	ECAs	d	ECA	ECAs	d	ECA	ECAs	d
01	11,70	10,20	-1,50	-	-	-	-	-	-
02	-	-	-	-	-	-	7,15	7,30	+0,15
03	8,70	8,80	+0,10	-	-	-	9,05	9,10	+0,05
04	10,60	10,50	-0,10	-	-	-	8,50	8,50	0,00
05	9,30	9,10	-0,20	8,85	9,00	+0,15	8,35	8,60	+0,25
06	-	-	-	8,60	9,20	+0,60	7,10	7,50	+0,40
07	-	-	-	9,50	9,30	-0,20	8,00	8,00	0,00
08	-	-	-	9,35	9,60	+0,25	9,65	9,50	-0,15
09	-	-	-	8,65	9,60	+0,95	-	-	-
10	-	-	-	8,20	7,90	-0,30	5,05	5,00	-0,05
11	8,90	9,20	+0,30	4,00	4,00	0,00	-	-	-
12	7,55	7,70	+0,15	-	-	-	-	-	-
13	8,40	8,40	0,00	9,35	9,50	+0,15	-	-	-
14	-	-	-	9,95	10,30	+0,35	-	-	-
15	-	-	-	9,20	9,90	+0,70	6,85	7,00	+0,15
16	-	-	-	9,00	9,00	0,00	5,80	6,00	+0,20
17	9,20	9,20	0,00	9,55	10,60	+1,05	2,70	3,10	+0,40
18	6,80	6,80	0,00	8,80	8,80	0,00	5,80	5,60	-0,20
19	7,20	7,20	0,00	8,65	9,00	+0,35	7,60	7,00	-0,60
20	9,20	10,20	+1,00	-	-	-	8,60	8,50	-0,10
21	10,95	10,10	-0,85	2,50	2,60	+0,10	-	-	-
22	9,05	9,50	+0,45	6,95	6,60	-0,35	-	-	-
23	9,60	9,70	+0,10	6,85	7,00	+0,15	6,00	6,30	+0,30
24	8,80	8,80	0,00	-	-	-	6,90	6,50	-0,40
25	10,45	10,40	-0,05	-	-	-	7,40	8,00	+0,60
26	-	-	-	7,60	7,40	-0,20	7,40	7,50	+0,10
27	-	-	-	-	-	-	7,35	7,80	+0,45
28	-	-	-	-	-	-	6,90	7,20	+0,30
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	8,20	8,20	0,00	-	-	-	-	-	-

FIGURA 6. Gráfico representativo dos valores de evaporação em base diária, medidos pelos tanques "CLASSE A" (ECA) e "CLASSE A" sifonado (ECAs)

Tabela 2. Valores representativos de evaporação medidos pelos tanques "Classe A" (ECA), "Classe A" sifonado (ECAs) e respectivos desvios ($d = ECAs - ECA$) em mm, para médias de cinco (5) dias.

PERÍODO	ECA	ECAs	d	PERÍODO	ECA	ECAs	d
01.06-06.06	3,00	2,87	-0,13	01.10-05.10	8,39	8,52	+0,13
07.06-12.06	3,20	3,26	+0,06	06.10-11.10	9,17	9,29	+0,12
13.06-17.06	2,92	3,22	+0,30	12.10-17.10	7,15	7,03	-0,12
18.06-22.06	3,43	3,47	+0,04	19.10-23.10	8,11	8,01	-0,10
23.06-27.06	3,21	3,51	+0,30	24.10-01.11	8,96	9,05	+0,09
28.06-02.07	4,11	4,15	+0,04	02.11-12.11	6,70	6,95	+0,25
03.07-07.07	3,47	3,51	+0,04	13.11-19.11	7,12	7,75	+0,63
08.07-12.07	3,90	3,98	+0,08	20.11-24.11	7,64	7,76	+0,12
13.07-24.07	3,45	3,73	+0,28	25.11-30.11	8,68	8,65	-0,03
25.07-29.07	4,25	4,24	-0,01	01.12-11.12	9,84	9,56	-0,28
30.07-06.08	4,97	5,64	+0,67	12.12-19.12	7,83	7,86	+0,03
07.08-12.08	5,28	5,39	+0,11	20.12-24.12	9,52	9,66	+0,14
13.08-18.08	3,56	3,60	+0,04	25.12-07.01	9,12	9,22	+0,10
19.08-23.08	3,69	4,65	+0,96	08.01-13.01	7,57	7,90	+0,33
24.08-28.08	5,76	5,51	-0,25	14.01-18.01	9,30	9,72	+0,42
29.08-06.09	5,44	5,25	-0,19	19.01-26.01	6,51	6,52	+0,01
08.09-12.09	6,09	5,93	-0,16	27.01-06.02	8,03	8,20	+0,17
13.09-20.09	5,62	5,98	+0,36	07.02-16.02	7,07	7,10	+0,03
21.09-25.09	7,54	7,48	-0,06	17.02-23.02	6,14	6,10	-0,04
26.09-30.09	7,44	7,59	+0,15	24.02-28.02	7,19	7,40	+0,21

FIGURA 7. Gráfico representativo dos valores de evaporação medidos pelos tanques "Classe A" (ECA) e "Classe A" sifonado (ECAs) com base em médias de 5 dias.

Tabela 3. Valores representativos de evaporação diurna e evaporação noturna medidos pelos tanques "Classe A" (ECA), "Classe A" sifonado (ECAs) e a diferença entre os dois períodos (d), para médias de cinco (5) dias.

PERÍODO	ECA			ECAs		
	DIUR.	NOTUR	d	DIUR.	NOTUR	d
01.06-06.06	1,64	1,36	+0,28	1,79	1,08	+0,71
07.06-12.06	1,61	1,59	+0,02	1,77	1,49	+0,28
13.06-17.06	1,46	1,46	0,00	1,52	1,70	-0,18
18.06-22.06	1,92	1,51	+0,41	1,82	1,65	+0,17
23.06-27.06	1,58	1,63	-0,05	1,85	1,66	+0,19
02.06-02.07	2,18	1,93	+0,25	2,12	2,03	+0,09
03.07-07.07	1,76	1,71	+0,05	1,97	1,54	+0,43
08.07-12.07	2,10	1,80	+0,30	2,32	1,66	+0,66
13.07-24.07	2,05	1,40	+0,65	2,10	1,63	+0,47
25.07-29.07	2,51	1,74	+0,77	2,48	1,76	+0,72
30.07-06.08	2,91	2,06	+0,85	3,32	2,32	+1,00
07.08-12.08	3,30	1,98	+1,32	3,34	2,05	+1,29
13.08-18.08	2,30	1,26	+1,04	2,33	1,27	+1,06
19.08-23.08	2,09	1,60	+0,49	3,00	1,65	+1,35
24.08-28.08	3,67	2,09	+1,58	3,93	1,58	+2,35
29.08-06.09	3,30	2,14	+1,16	3,37	1,88	+1,49
08.09-12.09	4,05	2,04	+2,01	4,03	1,90	+2,13
13.09-20.09	3,43	2,19	+1,24	3,84	2,14	+1,70
21.09-25.09	5,02	2,52	+2,50	5,00	2,48	+2,52
26.09-30.09	5,04	2,40	+2,64	4,99	2,60	+2,39
01.10-05.10	5,76	2,63	+3,07	5,88	2,64	+3,24
06.10-11.10	6,70	2,47	+4,23	6,85	2,44	+4,41
12.10-17.10	5,29	1,86	+3,43	5,31	1,72	+3,59
19.10-23.10	5,93	2,18	+3,75	5,81	2,20	+3,61
24.10-01.11	6,35	2,61	+3,74	6,36	2,69	+3,67
02.11-12.11	4,72	1,98	+2,74	4,96	1,99	+2,97
13.11-19.11	5,05	2,07	+2,98	5,30	2,45	+2,85
20.11-24.11	5,74	1,90	+3,84	5,75	2,01	+3,74
25.11-30.11	6,27	2,41	+3,86	6,26	2,39	+3,87
01.12-11.12	7,64	2,20	+5,44	7,64	1,92	+5,72

FIGURA 8. Gráfico representativo da marcha da evaporação diurna e evaporação noturna no período de Junho a Dezembro na região de Piracicaba, abrangendo épocas de baixa, média e alta energia.

5.2. Relativos à utilização do evaporímetro Piche na estimativa do componente aerodinâmico da fórmula de Penman.

No decorrer do trabalho estudou-se a equação proposta por Penman na sua forma original e uma simplificação da mesma utilizando o evaporímetro Piche na determinação do componente aerodinâmico daquela, de modo a eliminar as limitações da falta de anemômetro a 2,0 m do nível do solo, na maioria das estações meteorológicas.

Fundamentado no trabalho desenvolvido por STANHILL (1962) em Israel, empregou-se o evaporímetro Piche operando-o da maneira tradicional, ou seja, com recarga de água após a evaporação total do volume disponível, trocando o disco de papel apenas nessas ocasiões; ao contrário do que foi feito por aquele pesquisador, com recarga e trocas do disco diariamente.

O termo aerodinâmico é calculado pelas seguintes expressões:

a) para a evaporação da água

$$EaV = 0,35 (0,5 + U_2/160,9)(e_s - e_a) \text{ mm}$$

b) para a evapotranspiração

$$EaT = 0,35 (1,0 + U_2/160,9)(e_s - e_a) \text{ mm}$$

nas quais, U_2 representa a velocidade média do vento em km.dia^{-1} e $(e_s - e_a)$ representa o déficit de saturação do vapor no ar.

Aplicando um coeficiente multiplicativo (função unicamente da temperatura do ar $\frac{1}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$) ao termo EaV

(ou EaT), temos representada a contribuição da temperatura no termo aerodinâmico.

Tais correlações são possíveis porque a evaporação que ocorre no evaporímetro Piche colocado à sombra,

também é basicamente uma função da velocidade do vento, e do déficit de saturação no ar atmosférico.

Relacionando os valores estimados pelas fórmulas propostas por PENMAN (1963) com os valores fornecidos por aquele evaporímetro, verificou-se uma dispersão dos pontos segundo uma reta.

O estudo da regressão obtida forneceu o seguinte resultado:

a) para a evaporação da água

PERÍODO	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	
DIÁRIO	$\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,080 + 0,107 E_{\text{piche}}$	$r^2=0,912 \quad N=123$
MÉDIA DE 5 DIAS	$\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,115 + 0,101 E_{\text{piche}}$	$r^2=0,943 \quad N= 24$

b) para a evapotranspiração

PERÍODO	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	
DIÁRIO	$\frac{EaT}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,230 + 0,130 E_{\text{piche}}$	$r^2=0,840 \quad N=123$
MÉDIA DE 5 DIAS	$\frac{EaT}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,224 + 0,129 E_{\text{piche}}$	$r^2=0,958 \quad N= 24$

Os valores de $\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$ e $\frac{EaT}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$ estimados através

das equações originais e os valores de evaporação obtidos com o evaporímetro Piche, dos quais se lançou mão para a determinação das equações de regressão, constam da Tabela 4 em base diária e da Tabela 5 com base em médias de cinco (5) dias. As Figuras 9 e 10 apresentam a dispersão dos pontos em base diária respectivamente para a evaporação como para a evapotranspiração, bem como as retas representativas das equações de re

gressão para cada caso; as Figuras 11 e 12 tem o mesmo objetivo para cada caso levando, porém, em co-sideração as médias de cinco (5) dias.

A análise estatística dos desvios entre os valores do termo aerodinâmico estimados pelas equações originais e pelas equações encontradas no presente trabalho através das médias de cinco (5) dias e constantes das Tabelas 6 e 7 em base diária e na Tabela 8 com base em médias de cinco (5) dias, é apresentada a seguir:

a) para a evaporação

PERÍODO	r	t	$t_{10\%}$	$t_{5\%}$	$t_{1\%}$	CV orig. $f(E_p)$
DIÁRIO	0,9638	0,018	1,65	1,98	2,62	47,44 44,87
MÉDIAS DE 5 DIAS	0,9374	0,094	1,72	2,07	2,82	28,95 27,27

b) para a evapotranspiração

PERÍODO	r	t	$t_{10\%}$	$t_{5\%}$	$t_{1\%}$	CV orig. $f(E_p)$
DIÁRIO	0,9692	0,095	1,65	1,98	2,62	43,93 39,45
MÉDIAS DE 5 DIAS	0,9777	0,030	1,71	2,07	2,81	25,23 25,23

Observa-se assim, que os desvios apresentados entre os valores do termo aerodinâmico calculados da maneira como foi proposta originalmente e o mesmo termo calculado através da equação de regressão com base em médias de cinco (5) dias, apresentam uma alta correlação, os desvios entre os dois métodos não diferem de zero e os coeficientes de variação são similares, podendo-se assumir, sem grande margem de erro que, para cada região, é possível de terminar uma equação de regressão com observações locais da aquele evaporímetro, de modo a eliminar as limitações da inexistência de anemômetros ao nível de 2,0 m da superfície do solo na maioria das estações meteorológicas, a fim de

possibilitar o emprego do método de Penman.

Confrontando-se a equação encontrada por STANHILL (1962) com a obtida para a região de Piracicaba,

$$\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,1118 + 0,1469 E_{\text{piche}} \quad (\text{Israel})$$

$$\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,115 + 0,101 E_{\text{piche}} \quad (\text{Piracicaba})$$

nota-se que os coeficientes lineares praticamente não diferem entre si e a diferença existente entre os coeficientes angulares, acredita-se que possa ser atribuída ao manuseio do aparelho, a diferenças nas condições climáticas dos dois locais, diferença na quantidade de valores utilizados e no processamento dos mesmos.

Determinadas as equações de regressão já referidas, tomou-se para ambos os casos as equações obtidas por médias de cinco (5) dias, adaptando-as às equações para a estimativa da evaporação e da evapotranspiração pelo método de Penman.

Os resultados da evaporação da água e da evapotranspiração potencial assim estimados, foram então confrontados com os estimados pelo método original, estando representados na Tabela 9 com base em médias de cinco (5) dias e a análise estatística apresentou o seguinte resultado:

PERÍODO	r	t	t _{10%}	t _{5%}	t _{1%}	CV		OBS.
						orig	simp.	
MÉDIA DE 5 DIAS	0,9899	0,205	1,75	2,13	2,95	9,60	9,30	EV
MÉDIA DE 5 DIAS	0,9847	0,008	1,78	2,18	3,06	10,34	10,06	ETP

respectivamente para a evaporação e a evapotranspiração.

Em face dos resultados da análise estatística, pode-se verificar que houve alta correlação para as situações estudadas, os desvios não apresentaram significância e os coeficientes de variação se equivaleram, de modo a confirmar a similaridade dos dois métodos dentro do rigor exigido.

Desde que a equação de Penman seja separada em seus dois termos (energético e aerodinâmico) para quaisquer dos objetivos, verifica-se que o termo aerodinâmico contribuiu durante os nove (9) meses de trabalho com uma média de 19%, variando de 26% a 12% e durante o período de correlação com o evaporímetro Piche, com uma média de 16%, variando de 19% a 12%, conforme mostra o quadro abaixo:

CONTRIBUIÇÃO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Evaporação $f(U_2, \Delta e)$	23%	22%	26%	22%	19%	16%	15%	17%	12%

Assim, esse fato vem aumentar a viabilidade da simplificação do método pois, considerando-se os desvios como "ERROS", estes serão mínimos de modo a não prejudicar a estimativa de quaisquer dos fenômenos.

Tabela 4. Valores representativos de evaporação fornecida pelo evaporímetro Piche e de $\frac{E_a V}{A+1}$ e $\frac{E_a T}{A+1}$ utilizados na determinação da equação de regressão a fim de empregar aquele evaporímetro para a estimativa do componente aerodinâmico da equação de Penman.

DIA	OUTUBRO			NOVEMBRO			DEZEMBRO		
	$\frac{E_a V}{A+1}$	$\frac{E_a T}{A+1}$	E_{pi}	$\frac{E_a V}{A+1}$	$\frac{E_a T}{A+1}$	E_{pi}	$\frac{E_a V}{A+1}$	$\frac{E_a T}{A+1}$	E_{pi}
01	-	-	-	1,11	1,40	7,30	1,28	1,75	11,80
02	-	-	-	1,36	1,67	11,40	0,83	1,15	7,30
03	-	-	-	0,66	0,85	4,70	1,18	1,57	8,70
04	-	-	-	0,43	0,56	2,40	-	-	-
05	-	-	-	0,15	0,21	1,20	-	-	-
06	-	-	-	0,56	0,81	3,70	0,48	0,66	3,50
07	-	-	-	1,02	1,36	8,70	0,27	0,36	1,70
08	-	-	-	0,87	1,21	8,30	0,20	0,32	1,40
09	-	-	-	1,23	1,68	8,40	0,15	0,22	1,00
10	-	-	-	0,22	0,32	1,80	-	-	-
11	-	-	-	0,31	0,40	2,10	1,59	1,96	12,70
12	-	-	-	0,33	0,47	2,40	1,04	1,37	8,60
13	-	-	-	0,95	1,27	6,40	0,82	1,16	7,50
14	0,40	0,57	3,30	0,77	1,37	8,20	0,42	0,92	3,80
15	0,96	1,25	7,30	1,09	1,45	8,10	0,38	0,57	3,30
16	0,73	0,98	5,70	0,15	0,19	1,00	0,46	0,64	3,50
17	1,10	1,41	8,90	0,78	1,03	4,50	0,95	1,24	6,20
18	-	-	-	-	-	-	0,91	1,21	5,60
19	-	-	-	1,06	1,39	7,50	0,94	1,24	7,20
20	0,78	1,06	6,60	0,74	1,01	6,70	0,96	1,36	8,80
21	1,01	1,31	10,00	0,73	1,01	5,40	1,49	2,04	13,60
22	0,88	1,21	9,40	0,61	0,87	5,00	1,53	1,95	12,60
23	0,96	1,38	9,20	0,95	1,24	6,80	1,03	1,34	8,40
24	1,47	2,05	13,10	1,02	1,34	11,40	1,02	1,38	7,60
25	1,44	1,99	13,20	0,84	1,17	7,00	-	-	-
26	1,34	1,91	11,80	-	-	-	0,18	0,25	0,60
27	0,66	0,88	4,90	-	-	-	0,13	0,22	1,10
28	0,62	0,86	4,50	-	-	-	0,17	0,29	1,70
29	0,38	0,50	2,20	1,06	1,38	9,60	0,19	0,29	1,60
30	0,55	0,81	4,30	0,93	1,24	9,10	0,42	0,64	3,80
31	-	-	-	-	-	-	0,68	1,01	6,20

Tabela 4. Continuação.

DIA	JANEIRO			FEVEREIRO			MARÇO		
	$\frac{E_0V}{\Delta+1}$	$\frac{E_0T}{\Delta+1}$	E_{pi}	$\frac{E_0V}{\Delta+1}$	$\frac{E_0T}{\Delta+1}$	E_{pi}	$\frac{E_0V}{\Delta+1}$	$\frac{E_0T}{\Delta+1}$	E_{pi}
01	0,44	0,64	3,00	0,82	1,11	7,40	0,54	0,60	2,60
02	0,26	0,41	2,30	0,76	1,06	6,40	1,09	1,35	8,30
03	0,31	0,49	2,60	1,30	1,65	10,60	1,02	1,32	8,60
04	0,83	1,06	6,20	0,83	1,12	8,00	-	-	-
05	1,23	1,55	9,20	0,65	0,94	6,00	-	-	-
06	1,48	1,84	11,70	0,54	0,85	5,30	-	-	-
17	1,31	1,69	12,70	0,70	1,08	6,90	-	-	-
08	1,14	1,52	8,50	0,94	1,31	9,50	-	-	-
09	1,52	1,90	12,60	0,63	0,90	6,40	-	-	-
10	0,96	1,34	8,60	0,41	0,60	3,60	-	-	-
12	0,49	0,70	3,90	0,35	0,50	3,30	-	-	-
12	0,76	0,97	5,10	0,66	0,83	3,00	-	-	-
13	1,33	1,68	11,40	-	-	-	-	-	-
14	1,30	1,66	11,60	0,28	0,39	2,90	-	-	-
15	1,31	1,70	11,50	-	-	-	-	-	-
16	1,12	1,46	10,80	0,52	0,78	5,30	-	-	-
17	1,17	1,52	10,70	0,26	0,41	2,60	-	-	-
18	1,21	1,54	10,40	0,41	0,66	3,90	-	-	-
19	-	-	-	0,75	1,06	6,80	-	-	-
20	0,40	1,73	3,60	0,92	1,36	7,00	-	-	-
21	0,48	0,50	4,60	1,01	1,26	6,80	-	-	-
22	1,10	-	8,90	0,34	0,45	2,70	-	-	-
23	0,75	1,39	7,30	0,41	0,73	5,00	-	-	-
24	0,60	1,07	5,90	0,62	0,91	5,90	-	-	-
25	-	-	-	0,63	0,96	7,00	-	-	-
26	-	-	-	0,81	1,22	7,70	-	-	-
27	0,76	1,03	4,70	0,73	1,03	5,30	-	-	-
28	0,44	0,61	3,20	0,70	1,02	7,10	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	1,13	1,42	10,00	-	-	-	-	-	-

FIGURA 9. Gráfico representativo da dispersão dos pontos de $\frac{EaV}{\frac{\Delta + 1}{\gamma}}$ e E_{piche} , em valores diários para a região de Piracicaba e respectiva reta de regressão.

FIGURA 10. Gráfico representativo da dispersão dos pontos de $\frac{EaT}{\Delta\gamma + 1}$ e E_{piche} em valores diários para a região de Piracicaba e respectiva reta de regressão.

Tabela 5. Valores representativos de evaporação fornecidos pelo evaporímetro Piche e de $\frac{E_s V}{\Delta + 1}$ e $\frac{E_s T}{\Delta + 1}$ com base em média de cinco (5) dias, utilizados na determinação da equação de regressão a fim de empregar aquele evaporímetro na estimativa do componente aerodinâmico da equação de Penman.

PERÍODO	$\frac{E_s V}{\Delta + 1}$	$\frac{E_s T}{\Delta + 1}$	E_{pi}
14.10-20.10	0,79	1,05	6,36
21.10-25.10	1,15	1,59	10,98
26.10-30.10	0,71	0,99	5,54
01.11-05.11	0,74	0,94	5,40
06.11-10.11	0,78	1,08	6,18
11.11-15.11	0,71	0,99	5,44
16.11-21.11	0,69	0,93	5,02
22.11-29.11	0,90	1,20	7,96
30.11-06.12	0,94	1,27	8,08
07.12-12.12	0,65	0,85	5,08
13.12-17.12	0,61	0,91	4,86
18.12-22.12	1,17	1,57	9,56
23.12-28.12	0,51	0,70	3,88
29.12-02.01	0,40	0,60	3,38
03.01-07.01	1,03	1,33	8,48
08.01-12.01	0,97	1,29	7,74
13.01-17.01	1,25	1,60	11,20
18.01-23.01	0,79	1,16	6,96
24.01-01.02	0,75	1,05	6,24
02.02-06.02	0,82	1,12	7,26
07.02-11.02	0,61	0,81	5,94
12.02-18.02	0,43	0,61	3,54
19.02-23.02	0,69	0,97	5,66
24.02-28.02	0,70	1,03	6,60

FIGURA 11. Gráfico representativo da dispersão dos pontos de $\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$ e E_{piche} , com base em média de 5 dias para a região de Piracicaba e respectiva reta de regressão.

FIGURA 12. Gráfico representativo da dispersão dos pontos de $\frac{E_{aT}}{\Delta\gamma + 1}$ e E_{piche} , com base em médias de 5 dias para a região de Piracicaba e respectiva reta de regressão.

Tabela 6. Valores representativos do componente aerodinâmico da equação de Penman para a estimativa da evaporação, calculados através da expressão original e em função do evaporímetro Piche e respectivos desvios ($d=fPiche-original$).

DIA	OUTUBRO			NOVEMBRO			DEZEMBRO		
	Or.	fPi	d	Or.	f.Pi	d	Or.	f.Pi	d
01	-	-	-	1,11	0,86	-0,25	1,28	1,35	+0,07
02	-	-	-	1,36	1,30	-0,06	0,83	0,86	+0,03
03	-	-	-	0,66	0,58	-0,08	1,18	1,01	-0,17
04	-	-	-	0,43	0,34	-0,09	-	-	-
05	-	-	-	0,15	0,21	+0,06	-	-	-
06	-	-	-	0,56	0,48	-0,08	0,48	0,46	-0,02
07	-	-	-	1,02	1,01	-0,01	0,27	0,26	-0,01
08	-	-	-	0,87	0,97	+0,10	0,20	0,23	+0,03
09	-	-	-	1,23	0,98	-0,25	0,15	0,19	+0,04
10	-	-	-	0,22	0,27	+0,05	-	-	-
11	-	-	-	0,31	0,31	0,00	1,59	1,44	-0,15
12	-	-	-	0,33	0,34	+0,01	1,04	1,00	-0,04
13	-	-	-	0,95	0,77	-0,18	0,82	0,88	+0,06
14	0,40	0,43	+0,03	0,77	0,96	+0,19	0,42	0,49	+0,07
15	0,96	0,86	-0,10	1,09	0,95	-0,14	0,38	0,43	+0,05
16	0,73	0,69	-0,04	0,15	0,19	+0,04	0,46	0,46	0,00
17	1,10	1,04	-0,06	0,78	0,56	-0,22	0,95	0,75	-0,20
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	1,06	0,88	-0,18	0,94	0,85	-0,09
20	0,78	0,79	+0,01	0,74	0,80	+0,06	0,96	1,02	+0,06
21	1,01	1,15	+0,14	0,73	0,66	-0,07	1,49	1,54	+0,05
22	0,88	1,09	+0,21	0,61	0,62	+0,01	1,53	1,43	-0,10
23	0,96	1,07	+0,11	0,95	0,81	-0,14	1,03	0,98	-0,05
24	1,47	1,49	+0,02	1,02	1,30	+0,28	1,02	0,90	-0,12
25	1,44	1,50	+0,06	0,84	0,83	-0,01	-	-	-
26	1,34	1,35	+0,01	-	-	-	0,18	0,14	-0,04
27	0,66	0,61	-0,05	-	-	-	0,13	0,20	+0,07
28	0,62	0,56	-0,06	-	-	-	0,17	0,26	+0,09
29	0,38	0,32	-0,06	1,06	1,11	+0,05	0,19	0,25	+0,06
30	0,55	0,54	-0,01	0,93	1,06	+0,13	0,42	0,49	+0,07
31	-	-	-	-	-	-	0,68	0,75	+0,07

Tabela 6. Continuação

DIA	JANEIRO			FEVEREIRO			MARÇO		
	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d
01	0,44	0,40	-0,04	0,82	0,87	+0,05	0,54	0,36	-0,18
02	0,26	0,33	+0,07	0,76	0,77	+0,01	1,09	0,97	-0,12
03	0,31	0,36	+0,05	1,30	1,22	-0,08	1,02	1,00	-0,02
04	0,83	0,75	-0,08	0,83	0,94	+0,11	-	-	-
05	1,23	1,07	-0,16	0,65	0,72	+0,07	-	-	-
06	1,48	1,34	-0,14	0,54	0,65	+0,11	-	-	-
07	1,31	1,44	+0,13	0,70	0,82	+0,12	-	-	-
08	1,14	0,99	-0,15	0,94	1,10	+0,16	-	-	-
09	1,52	1,43	-0,09	0,63	0,77	+0,14	-	-	-
10	0,96	1,00	+0,04	0,41	0,47	+0,06	-	-	-
11	0,49	0,50	+0,01	0,35	0,43	+0,08	-	-	-
12	0,76	0,63	-0,13	0,66	0,40	-0,26	-	-	-
13	1,33	1,30	-0,03	-	-	-	-	-	-
14	1,30	1,32	+0,02	0,28	0,39	+0,11	-	-	-
15	1,31	1,31	0,00	-	-	-	-	-	-
16	1,12	1,24	+0,12	0,52	0,65	+0,13	-	-	-
17	1,17	1,23	+0,06	0,26	0,36	+0,10	-	-	-
18	1,21	1,20	-0,01	0,41	0,50	+0,09	-	-	-
19	-	-	-	0,75	0,81	+0,06	-	-	-
20	0,40	0,47	+0,07	0,92	0,83	-0,09	-	-	-
21	0,48	0,57	+0,09	1,01	0,81	-0,20	-	-	-
22	1,10	1,04	-0,06	0,34	0,37	+0,03	-	-	-
23	0,75	0,86	+0,11	0,41	0,62	+0,21	-	-	-
24	0,60	0,71	+0,11	0,62	0,71	+0,09	-	-	-
25	-	-	-	0,63	0,83	+0,20	-	-	-
26	-	-	-	0,81	0,91	+0,10	-	-	-
27	0,76	0,58	-0,18	0,73	0,65	-0,08	-	-	-
28	0,44	0,42	-0,02	0,70	0,84	+0,14	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	1,13	1,15	+0,02	-	-	-	-	-	-

Tabela 7. Valores representativos do componente aerodinâmico da equação de Penman para a estimativa da evapotranspiração potencial, calculados através da expressão original e em função do evaporímetro Piche e respectivos desvios ($d=f_{\text{Piche}}-\text{original}$)

DIA	OUTUBRO			NOVEMBRO			DEZEMBRO		
	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d
01	-	-	-	1,40	1,18	-0,22	1,75	1,76	+0,01
02	-	-	-	1,67	1,71	+0,04	1,15	1,18	+0,03
03	-	-	-	0,85	0,84	-0,01	1,57	1,36	-0,21
04	-	-	-	0,56	0,54	-0,02	-	-	-
05	-	-	-	0,21	0,39	+0,18	-	-	-
06	-	-	-	0,81	0,71	-0,10	0,66	0,69	+0,03
07	.	.	-	1,36	1,36	0,00	0,36	0,45	+0,09
08	-	-	-	1,21	1,31	+0,10	0,32	0,41	+0,09
09	-	-	-	1,68	1,32	-0,36	0,22	0,36	+0,14
10	-	-	-	0,32	0,46	+0,14	-	-	-
11	-	-	-	0,40	0,50	+0,10	1,96	1,88	-0,08
12	-	-	-	0,47	0,54	+0,07	1,37	1,35	-0,02
13	-	-	-	1,27	1,06	-0,21	1,16	1,21	+0,05
14	0,57	0,66	+0,09	1,37	1,30	-0,07	0,92	0,72	-0,20
15	1,25	1,18	-0,07	1,45	1,28	-0,17	0,57	0,66	+0,09
16	0,98	0,97	-0,01	0,19	0,36	+0,17	0,64	0,69	+0,05
17	1,41	1,39	-0,02	1,03	0,82	-0,21	1,24	1,04	-0,20
18	-	-	-	-	-	-	1,21	0,96	-0,25
19	-	-	-	1,39	1,21	-0,18	1,27	1,17	-0,10
20	1,06	1,09	+0,03	1,01	1,10	+0,09	1,36	1,37	+0,01
21	1,31	1,53	+0,22	1,01	0,93	-0,08	2,04	2,00	-0,04
22	1,21	1,45	+0,24	0,87	0,88	+0,01	1,95	1,87	-0,08
23	1,38	1,43	+0,05	1,24	1,11	-0,13	1,34	1,32	-0,02
24	2,05	1,93	-0,12	1,34	1,71	+0,37	1,38	1,22	-0,16
25	1,99	1,95	-0,04	1,17	1,14	-0,03	-	-	-
26	1,91	1,76	-0,15	-	-	-	0,25	0,31	+0,06
27	0,88	0,87	-0,01	-	-	-	0,22	0,37	+0,15
28	0,86	0,82	-0,04	-	-	-	0,29	0,45	+0,16
29	0,50	0,52	+0,02	1,38	1,48	+0,10	0,29	0,44	+0,15
30	0,81	0,79	-0,02	1,24	1,41	+0,17	0,64	0,72	+0,08
31	-	-	-	-	-	-	1,01	1,04	+0,03

Tabela 7. Continuação.

DIA	JANEIRO			FEVEREIRO			MARÇO		
	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d
01	0,64	0,62	-0,02	1,11	1,19	+0,08	0,60	0,57	-0,03
02	0,41	0,53	+0,12	1,06	1,06	0,00	1,35	1,31	-0,04
03	0,49	0,57	+0,08	1,65	1,61	-0,04	1,32	1,35	+0,03
04	1,06	1,04	-0,02	1,12	1,27	+0,15	-	-	-
05	1,55	1,43	-0,12	0,94	1,01	+0,07	-	-	-
06	1,84	1,75	-0,09	0,85	0,92	+0,07	-	-	-
07	1,69	1,88	+0,19	1,08	1,13	+0,05	-	-	-
08	1,52	1,34	-0,18	1,31	1,47	+0,16	-	-	-
09	1,90	1,87	-0,03	0,90	1,06	+0,16	-	-	-
10	1,34	1,35	+0,01	0,60	0,70	+0,10	-	-	-
11	0,70	0,74	+0,04	0,50	0,66	+0,16	-	-	-
12	0,97	0,89	-0,08	0,83	0,62	-0,21	-	-	-
13	1,68	1,71	+0,03	-	-	-	-	-	-
14	1,66	1,74	+0,08	0,39	0,61	+0,22	-	-	-
15	1,70	1,73	+0,03	-	-	-	-	-	-
16	1,46	1,63	+0,17	0,78	0,92	+0,14	-	-	-
17	1,52	1,62	+0,10	0,41	0,57	+0,16	-	-	-
18	1,54	1,58	+0,04	0,66	0,74	+0,08	-	-	-
19	-	-	-	1,06	1,11	+0,05	-	-	-
20	-	-	-	1,36	1,14	-0,22	-	-	-
21	-	-	-	1,26	1,11	-0,15	-	-	-
22	-	-	-	0,45	0,58	+0,13	-	-	-
23	1,39	1,18	-0,21	0,73	0,88	+0,15	-	-	-
24	1,07	1,00	-0,07	0,91	1,00	-0,09	-	-	-
25	-	-	-	0,96	1,14	+0,18	-	-	-
26	-	-	-	1,22	1,23	+0,01	-	-	-
27	1,03	0,84	-0,19	1,03	0,92	-0,11	-	-	-
28	0,61	0,65	+0,04	1,02	1,15	+0,13	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	1,42	1,53	+0,11	-	-	-	-	-	-

Tabela 8. Valores representativos do componente aerodinâmico da equação de Penman para a estimativa da evaporação e da evapotranspiração potencial, calculados através das expressões originais e em função do evaporímetro Piche e respectivos desvios ($d = f_{\text{Piche}} - \text{original}$).

PERÍODO	p/EVAPORAÇÃO			p/EVAPOTRANSPIRAÇÃO		
	Or.	fPi	d	Or.	fPi	d
14.10-20.10	0,79	0,76	+0,03	1,05	1,04	-0,01
21.10-25.10	1,15	1,22	+0,07	1,59	1,64	+0,05
26.10-30.10	0,71	0,67	-0,04	0,99	0,94	-0,05
01.11-05.11	0,74	0,66	+0,08	0,94	0,92	-0,02
06.11-10.11	0,78	0,74	-0,04	1,08	1,02	-0,06
11.11-15.11	0,74	0,66	-0,08	0,99	0,93	-0,06
16.11-21.11	0,69	0,62	-0,07	0,93	0,87	-0,06
22.11-29.11	0,70	0,92	+0,22	1,20	1,25	+0,05
30.11-06.12	0,94	0,93	-0,01	1,27	1,27	0,00
07.12-12.12	0,65	0,63	-0,02	0,85	0,88	+0,03
13.12-17.12	0,61	0,61	0,00	0,91	0,85	-0,06
18.12-22.12	1,17	1,08	-0,09	1,57	1,46	-0,11
23.12-28.12	0,51	0,51	0,00	0,70	0,72	+0,02
29.12-02.01	0,40	0,46	+0,06	0,60	0,66	+0,06
03.01-07.01	0,97	0,90	-0,07	1,33	1,32	-0,01
08.01-12.01	1,03	0,97	-0,06	1,29	1,22	-0,07
13.01-17.01	1,25	1,25	0,00	1,60	1,67	+0,07
18.01-23.01	0,79	0,82	+0,03	1,16	1,12	-0,04
24.01-01.02	0,75	0,75	0,00	1,05	1,03	-0,02
02.02-06.02	0,82	0,85	+0,03	1,12	1,16	+0,04
07.02-11.02	0,61	0,71	+0,10	0,88	0,99	+0,11
12.02-18.02	0,43	0,47	+0,04	0,61	0,68	+0,07
19.02-23.02	0,69	0,69	0,00	0,97	0,95	-0,02
24.02-28.02	0,70	0,78	+0,08	1,03	1,08	+0,05

Tabela 9. Valores representativos de evaporação e de evapo - transpiração potencial estimados pelo método de Penman original e pela simplificação do mesmo proposta no presente trabalho, com respectivos desvios (d) do método simplificado em relação ao original.

PERÍODO	EVAPORAÇÃO			PERÍODO	EVAPOTR.POTENC.		
	Or.	Simp	d		Or.	Simp	d
14.10-20.10	5,14	5,13	-0,01	01.11-08.11	5,40	5,35	-0,05
21.10-25.10	6,51	6,64	+0,13	09.11-19.11	5,23	5,10	-0,13
26.10-06.11	6,02	5,85	-0,17	20.11-24.11	5,12	5,36	+0,24
07.11-14.11	5,52	5,48	-0,04	25.11-03.12	6,21	6,20	-0,01
15.11-22.11	6,00	5,93	-0,07	04.12-18.12	5,67	5,55	-0,12
23.11-01.12	6,51	6,50	-0,01	19.12-23.12	6,22	6,16	-0,06
02.12-17.12	6,49	6,37	-0,12	24.12-07.01	6,12	6,07	-0,05
18.12-22.12	6,43	6,36	-0,07	08.01-13.01	5,64	5,57	-0,07
23.12-06.01	6,69	6,58	-0,11	14.01-18.01	6,47	6,53	+0,06
07.01-12.01	6,19	6,12	-0,07	19.01-03.02	5,42	5,39	-0,03
13.01-17.01	7,04	7,04	0,00	04.02-08.02	5,93	6,02	+0,09
18.01-31.01	5,17	5,19	+0,02	09.02-19.02	4,32	4,41	+0,09
01.02-06.02	6,32	6,37	+0,05	20.02-26.02	5,31	5,34	+0,03
07.02-17.02	5,24	5,35	+0,11				
18.02-24.02	5,59	5,64	+0,05				
25.02-02.03	5,79	5,83	+0,04				

5.3. Relativos ao confronto entre a Evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman simplificado e a Evapotranspiração potencial medida.

Os valores de evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman simplificado e a evapotranspiração potencial observada na bateria de evapotranspirômetros com grama Batatais (Paspalum notatum, Fluegg) estão representados na Tabela 10 em base diária e na Tabela 11 com base em valores médios de cinco (5) dias.

O confronto direto entre os valores estimados e os valores observados nos ofereceu o seguinte resultado da análise:

PERÍODO	r	t	t _{10%}	t _{5%}	t _{1%}	CV	
						estim	obser
DIÁRIO	0,7996	1,349	1,67	2,01	2,67	14,04	17,23
MÉDIA DE 5 DIAS	0,7817	2,228	1,83	2,26	3,25	5,71	11,20

Pode-se observar que quando se tomou valores diários para a análise, os desvios entre os mesmos não diferiram de zero ao passo que para os valores com base em médias de cinco (5) dias, os desvios foram significantes ao nível de 5% e ao nível de 10%, não o sendo apenas ao nível de 1%.

Durante o período de observações, os valores fornecidos pela bateria de evapotranspirômetros sempre estiveram abaixo dos valores estimados.

Dado a erros cometidos principalmente na avaliação de horas do brilho solar; na determinação da umidade relativa média do dia; na leitura do evaporímetro Piche e nas medidas fornecidas pela bateria de evapotranspirômetros, pode-se afirmar que a simplificação proposta no presente trabalho é perfeitamente válida dentro do rigor que se exige.

Tabela 10. Valores representativos da evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman simplificado (ETPe), medida na bateria de evapotranspirômetros (ETPm) e respectivos desvios (d) em base diária.

DIA	NOVEMBRO			DEZEMBRO			JANEIRO		
	ETPe	ETPm	d	ETPe	ETPm	d	ETPe	ETPm	d
01	-	-	-	6,66	5,81	-0,85	-	-	-
02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03	-	-	-	5,99	4,62	-1,37	-	-	-
04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07	5,62	5,02	-0,60	-	-	-	-	-	-
08	5,88	4,89	-0,99	-	-	-	-	-	-
09	-	-	-	-	-	-	6,34	5,50	-0,84
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	6,20	5,38	-0,82	-	-	-
12	-	-	-	5,50	4,86	-0,64	3,29	3,90	+0,61
13	-	-	-	-	-	-	6,10	5,10	-1,00
14	5,57	4,27	-1,30	-	-	-	6,47	6,70	+0,23
15	5,80	4,75	-1,05	-	-	-	6,51	6,30	-0,21
16	-	-	-	-	-	-	6,62	6,80	+0,18
17	-	-	-	5,43	5,50	+0,07	6,63	5,90	-0,73
18	-	-	-	4,56	4,32	-0,24	6,44	5,50	-0,94
19	-	-	-	5,44	4,86	-0,58	-	-	-
20	-	-	-	6,15	6,03	-0,12	-	-	-
21	-	-	-	6,50	5,52	-0,98	-	-	-
22	5,06	4,15	-0,91	6,51	5,62	-0,89	-	-	-
23	5,80	3,94	-1,86	6,19	5,20	-0,99	4,93	4,00	-0,93
24	6,05	4,95	-1,10	6,39	4,92	-1,37	-	-	-
25	5,86	4,50	-1,36	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	6,46	5,04	-1,42	-	-	-	-	-	-
30	6,04	4,73	-1,31	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	6,40	5,10	-1,30	-	-	-

Tabela 10. Continuação

DIA	FEVEREIRO			MARÇO		
	ETPe	ETPm	d	ETPe	ETPm	d
01	-	-	-	-	-	-
02	5,43	4,60	-0,83	4,66	4,60	-0,06
03	6,03	5,70	-0,33	5,60	4,95	-0,65
04	6,17	5,60	-0,57	-	-	-
05	5,65	6,00	+0,35	-	-	-
06	5,61	5,40	-0,21	-	-	-
07	6,22	6,00	-0,22	-	-	-
08	6,44	6,40	-0,04	-	-	-
09	-	-	-	-	-	-
10	4,02	3,00	-1,02	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
16	4,64	4,40	-0,24	-	-	-
17	3,11	2,30	-0,81	-	-	-
18	4,50	3,50	-1,00	-	-	-
19	5,79	4,80	-0,99	-	-	-
20	5,51	5,30	-0,21	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-
24	5,50	4,20	-1,30	-	-	-
25	5,71	4,90	-0,81	-	-	-
26	5,73	4,90	-0,83	-	-	-
27	4,95	4,50	-0,45	-	-	-
28	5,49	5,00	-0,49	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-

Tabela 11. Valores representativos da evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman simplificado (ETPe), medida na bateria de evapotranspirômetros (ETPm) e respectivos desvios (d) com base base em médias de cinco (5) dias.

PERÍODO	ETPe	ETPm	d
01.11-22.11	5,59	4,62	-0,97
23.11-30.11	6,04	4,63	-0,41
01.12-17.12	5,96	5,23	-0,73
18.12-22.12	5,83	5,27	-0,56
23.12-12.01	5,72	4,92	-0,80
13.01-17.01	6,47	6,16	-0,31
18.01-04.02	5,80	5,08	-0,72
05.02-10.02	5,59	5,36	-0,23
11.02-20.02	5,31	4,06	-0,25
21.02-28.02	5,48	4,70	-0,78

5.4. Relativos ao teste da equação do termo aerodinâmico proposta por Penman para a estimativa da Evaporação da água e sua aplicabilidade às condições locais.

PENMAN (1963) em sua equação para a estimativa da evaporação da água, indica para a determinação do termo aerodinâmico EaV a seguinte expressão:

$$EaV = 0,35 (0,5 + U^2/160,9)(e_s - e_a) \text{ mm}$$

Essa expressão tem sido aplicada em todas as regiões, não se tendo conhecimento de testes realizados a fim de verificar até que ponto é válida a sua aplicação com os coeficientes propostos.

Assim, durante o experimento, tentou-se simular condições de sombreamento ao tanque "Classe A" sifonado, colocando-se uma cobertura de lençol plástico de superfície refletora branca, com 3,0 m X 2,0 m e com sua maior dimensão disposta no sentido Leste-Oeste. Desse modo, pretendeu-se que a evaporação ali ocorrida, fosse apenas função da velocidade do vento e do déficit de saturação de vapor no ar.

Com esses dois elementos e mais os valores de evaporação fornecidos por aquele evaporímetro, tomando-se médias de cinco (5) dias, determinou-se a equação de regressão que melhor se ajustasse aos pontos no gráfico, resultando na seguinte expressão:

$$ECAs(smb) = (0,43 + 0,30 U^2/160,9)(e_s - e_a)$$

Quando se compara uma equação com a outra, nota-se que seus coeficientes angulares se aproximam, com um desvio de 0,05, mostrando que as duas retas são praticamente paralelas, admitindo-se que pequenos erros de leitura tenham acarretado tal diferença; já os coeficientes lineares mostram uma diferença de 0,255 em favor da equação encontrada para Piracicaba, superestimando o fenômeno.

Antes de afirmar que o fenômeno para esta região segue a equação encontrada, é de bom alvitre tecer comentários sobre as condições em que foi montado o teste, sugerindo que essas diferenças encontradas nos termos da equação deva-se:

a) à cobertura empregada para sombrear o evaporímetro, a qual, possivelmente, não deve ter sido tão extensa quanto necessária, de modo a proteger a superfície evaporante apenas da radiação direta e não da radiação difusa de grande faixa do céu;

b) à própria radiação direta, quando o sol a baixas alturas atingia diretamente tanto as paredes do tanque como a própria superfície evaporante durante determinado tempo, o que poderá ser apreciado no quadro abaixo:

ELEVAÇÃO DO SOL	PARTE DO CONJUNTO ATINGIDA PELA RADIAÇÃO
13,5º	Superfície evaporante e parede do tanque.
29,0º	Apenas a parede do tanque
40,0º	sombreamento completo do conjunto

c) à altura em que foi colocada a cobertura para sombreamento (50,0 cm da borda do tanque) pois o balanço de energia entre a superfície e o teto deve ter influenciado incrementando o fenômeno;

d) à própria cor da face inferior da cobertura (branco brilhante em lugar de preto fôsko), refletindo energia em direção à massa líquida.

Entretanto, à maneira como as retas apresentam-se no gráfico (Figura 13), sugere a viabilidade de tal tipo de estudo, devendo o mesmo ser repetido em melhores condições de simulação de sombra total e para um período maior de observações.

Os valores empregados na determinação da equação de regressão constam da Tabela 12 com base em médias de cinco (5) dias.

Tabela 12. Valores representativos dos termos em Y e em X empregados na determinação da equação de regressão. tomados como médias de cinco (5) dias.

$Y = \frac{ECAs(sombra)}{e_s - e_a}$	$X = \frac{U_2}{160,9}$
0,698	0,940
0,555	0,702
0,699	0,805
0,733	0,982
0,684	0,772
0,603	0,486
0,791	1,170
0,755	1,062
0,864	1,248
0,753	1,226
0,717	0,943
0,698	0,814
0,668	0,774
0,613	0,598
0,648	0,634

$$\frac{ECAs(sombra)}{(e_s - e_a)} = 0,43 + 0,30 \frac{U_2}{160,9}$$

$$r^2 = 0,81$$

$$n = 15$$

$$ECAs(sombra) = (0,43 + 0,30 \frac{U_2}{160,9})(e_s - e_a)$$

FIGURA 13. Gráfico representativo da equação de regressão encontrada para evaporação à sombra em Piracicaba e da equação proposta por Penman

5.5. Relativos aos coeficientes determinados para a relação Evaporação estimada/Evaporação medida.

OLIVEIRA (1971), estudando o comportamento de evaporímetros (Classe A e GGI-3000) e as relações entre a evaporação estimada e a evaporação medida, chegou a coeficientes mensais entre a evaporação estimada pelo método de Penman original e a evaporação medida por aqueles dois (2) evaporímetros em diferentes condições de exposição e com cobertura de tela protetora.

No presente trabalho, além das relações estabelecidas pelo autor acima para a região de Piracicaba com referência ao tanque "Classe A", procurou-se estabelecer os coeficientes levando em consideração a modificação proposta para o sistema de medidas e a simplificação do método de Penman, resultando no seguinte quadro:

MÊS	A $\pm\sigma$	B $\pm\sigma$	C $\pm\sigma$	D $\pm\sigma$	E
JUN	0,70 0,14	0,68 0,17			0,85
JUL	0,67 0,14	0,67 0,12			0,70
AGO	0,72 0,19	0,69 0,14			0,70
SET	0,71 0,12	0,72 0,11			0,67
OUT	0,71 0,11	0,71 0,12	0,77 0,12	0,78 0,14	0,71
NOV	0,84 0,16	0,81 0,12	0,84 0,16	0,80 0,12	0,79
DEZ	0,75 0,07	0,75 0,06	0,75 0,07	0,75 0,06	0,73
JAN	0,83 0,22	0,79 0,16	0,82 0,32	0,78 0,17	0,72
FEV	0,83 0,10	0,79 0,16	0,82 0,22	0,78 0,17	0,72

onde A representa EVPen or/ECA

B " EVPen or/ECA's

C representa EVPen sp/ECA

D " EVPen sp/ECA's

σ " Desvio padrão

E " EVPen or/ECA (Oliveira, 1971)

5.6. Relativos à marcha da Evapotranspiração potencial diária para o período Fevereiro/Março em Piracicaba.

No decorrer da operação com a bateria de evapotranspirômetros, por vezes ocorreram problemas no funcionamento da mesma, tanto por entupimento dos condutos de abastecimento de água pelo crescimento de algas, como pelas raízes da grama que penetravam na entrada de água da caixa, obstruindo a mesma.

Tais problemas foram sanados com a adaptação de um "poço de visita" de PVC rígido formando uma câmara onde apenas a água penetrava, impedindo assim que raízes e a areia do fundo da caixa obstruíssem a entrada de água.

Apartir de 15 de Fevereiro, as repetições A, B e D foram reunidas através de uma só caixa de passagem, acoplando-a a um reabastecedor com relação de 1:30 e ao qual foi adaptado um registrador para obtenção da curva representativa da Evapotranspiração acumulada a cada 24 horas.

Estabelecendo as tangentes a essa curva nos pontos representativos de cada hora do dia, obteve-se um valor de $\Delta ETP/\Delta t$ em mm/h para cada ponto. Tomando-se o valor médio para cada hora no período de 15.02.79 a 04.03.79 e os respectivos desvios, levantou-se a curva média da evapotranspiração potencial para aquele período.

O emprego do sistema de registro possibilitou assim detectar o instante do pico de evapotranspiração potencial diária, a qual ocorre após a passagem meridiana do sol (13:00 horas), observando-se assim um tempo de retardo entre o instante de máxima energia incidente e o instante da perda máxima de água pelo fenômeno.

A tabela 13 mostra os diversos valores de $\Delta ETP/\Delta t$ e a Figura 14 representa a curva média da evapotranspiração potencial diária nos períodos diurno e noturno.

Tabela 13. Valores médios, representativos de $\Delta ETP/\Delta t$ em mm/h e respectivos para a região de Piracicaba no período de 15.02.1979 a 04.03.1979.

H O R A	F E V E R E I R O												M A R Ç O				$\frac{ETP}{t}$		σ
	15	16	17	18	19	20	21	24	25	26	27	28	01	02	03	04			
00	-	0,10	-	0,07	-	0,10	0,10	-	0,08	0,09	0,10	0,09	0,09	0,06	-	0,09	0,09	0,01	
01	-	0,10	-	0,07	-	0,10	0,09	-	0,07	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09	-	0,08	0,09	0,01	
02	-	0,10	-	0,07	-	0,10	0,09	-	0,07	0,08	0,10	0,10	0,08	0,06	-	0,08	0,08	0,01	
03	-	0,09	-	0,07	-	0,08	0,09	-	0,07	0,09	0,10	0,09	0,08	0,09	-	0,08	0,08	0,01	
04	-	0,09	-	0,07	-	0,06	0,09	-	0,07	0,08	0,10	0,09	0,08	0,06	-	0,08	0,08	0,01	
05	-	0,09	-	0,07	-	0,07	0,08	-	0,08	0,08	0,10	0,09	0,08	0,08	-	0,08	0,08	0,01	
06	-	0,09	-	0,07	-	0,07	0,08	-	0,08	0,07	0,10	0,09	0,08	0,08	-	0,08	0,08	0,01	
07	0,12	-	-	-	0,08	0,05	0,08	-	0,08	0,08	-	-	0,08	0,08	-	-	0,08	0,02	
08	0,23	-	-	-	0,12	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16		
09	0,33	-	-	-	0,24	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23		
10	0,42	-	-	-	0,25	0,26	0,27	0,31	0,24	0,35	0,36	0,45	0,32	-	0,32	-	0,32	0,07	
11	0,26	-	-	-	0,39	0,41	0,34	0,43	0,40	0,47	0,50	0,49	0,32	-	0,43	-	0,40	0,07	
12	0,35	-	-	-	0,34	0,47	0,56	0,46	0,55	0,60	0,55	0,65	0,39	0,24	0,44	-	0,47	0,12	
13	0,24	-	-	-	0,45	0,49	0,56	0,43	0,59	0,63	0,64	0,50	0,33	0,34	0,51	-	0,48	0,12	
14	0,28	-	-	-	0,39	0,47	0,42	0,53	0,58	0,63	0,56	0,46	0,28	0,38	0,50	-	0,46	0,11	
15	0,44	-	-	-	0,39	0,48	0,23	0,28	0,52	0,46	0,33	0,40	0,37	0,31	0,48	-	0,39	0,09	
16	0,42	-	-	-	0,33	0,43	-	0,33	0,46	0,36	0,17	0,39	0,26	0,25	0,38	-	0,34	0,09	
17	0,33	-	-	-	0,31	0,42	-	0,16	0,26	0,21	0,12	0,25	-	0,15	0,30	-	0,25	0,09	
18	0,18	-	-	-	0,23	0,23	-	0,11	0,16	0,17	0,12	0,16	-	0,12	0,18	-	0,17	0,04	
19	0,13	0,08	0,08	-	0,15	0,10	-	0,11	0,11	0,14	0,11	0,11	-	0,12	0,15	-	0,12	0,02	
20	0,13	0,06	0,06	-	0,15	0,10	-	0,10	0,11	0,12	0,10	0,10	-	0,09	0,13	-	0,11	0,02	
21	0,13	0,08	0,08	-	0,14	0,10	-	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10	-	0,09	0,11	-	0,11	0,02	
22	0,11	0,08	0,08	-	0,10	0,10	-	0,09	0,10	0,11	0,09	0,10	-	0,09	0,11	-	0,10	0,01	
23	0,11	0,08	0,08	-	0,10	0,10	-	0,08	0,09	0,10	0,09	0,09	-	0,09	0,11	-	0,09	0,01	
24	0,10	0,07	0,07	-	0,10	0,10	-	0,08	0,09	0,10	0,09	0,09	-	0,06	0,09	-	0,09	0,01

FIGURA 14. Gráfico representativo da marcha diária da evapotranspiração potencial na região de Piracicaba no período de 15.02.79 a 04.03.79 para valores médios.

5.7. Relativos à utilização do tanque "Classe A" sifonado na determinação da Evapotranspiração potencial.

Uma maneira bastante prática de determinação da evapotranspiração potencial e recomendada pela FAO, segundo DOORENBOS e PRUITT (1975) em práticas de irrigação, é a aplicação de um coeficiente nas leituras fornecidas pelo tanque "Classe A".

Esse método é de fácil acesso ao agricultor, não muito afeito a equações matemáticas por mais simples que elas sejam.

Nele, a evapotranspiração é calculada do seguinte modo:

$$ETP = k_p \cdot E_{\text{tanque}}$$

onde k_p é um fator de conversão que depende de classes de vento e de umidade relativa e do tipo de exposição do evaporímetro.

Assim, no presente trabalho, adotando-se os limites estabelecidos pela FAO (1975) foram determinados os valores de k_p , empregando médias de três (3) dias para os valores de velocidade do vento ao nível de 2,0 m do solo e para os valores de umidade relativa média, para a evaporação e para a evapotranspiração potencial medida obtendo-se os resultados relativos no quadro abaixo, para as condições de exposição do evaporímetro dentro de um área gramada num raio de até 10 m.

Vento leve U.Relativa alta		Vento leve U.Relativa média		Vento moderado U.Relativa média	
FAO	Determ	FAO	Determ	FAO	Determ
0,75	0,66	0,65	0,64	0,60	0,61

De acordo com os resultados, pode-se admitir pelo menos para fins práticos, que o método preconizado é aceitável, embora tais resultados tenham sido obtidos com um reduzido número de dados.

Tabela 14. Valores representativos de evaporação (ECAs) em mm, evapotranspiração potencial medida (ETPm) em mm, velocidade média do vento (U_2) em km.dia⁻¹, umidade relativa média do dia (UR) em %, coeficientes de ETPm/ECAs e de classes de vento e de umidade relativa, com base em médias de três (3) dias.

ECAs	ETPm	U_2	UR	ETPm ECAs	CLASSES	
					U_2	UR
7,27	4,35	154,12	75,1	0,60	Leve	Alta
8,08	4,46	160,40	72,8	0,55	"	Média
7,73	4,89	165,24	71,6	0,63	"	"
8,07	5,07	141,43	68,4	0,63	"	"
9,17	5,30	131,60	61,8	0,58	"	"
9,93	5,56	152,72	60,4	0,56	"	"
9,77	5,28	176,52	63,6	0,54	Mode.	"
9,33	5,25	182,74	69,5	0,56	"	"
9,90	6,03	209,79	66,8	0,61	"	"
9,73	6,60	196,56	67,2	0,68	"	"
9,83	6,33	186,77	67,7	0,64	"	"
9,47	6,07	194,67	69,7	0,64	"	"
8,30	5,30	164,22	73,1	0,64	Leve	"
8,73	5,77	157,57	73,3	0,66	"	"
8,20	5,67	103,17	74,4	0,69	"	"
8,03	5,80	76,95	72,6	0,72	"	"
8,33	5,93	82,53	70,6	0,71	"	"
4,90	3,50	62,15	80,1	0,71	"	Alta
5,23	3,53	73,76	79,4	0,67	"	"
7,03	4,53	82,67	71,3	0,64	"	Média
7,33	4,67	81,65	71,2	0,64	"	"
7,77	4,77	89,35	70,8	0,61	"	"
7,50	4,80	96,80	71,2	0,64	"	"

6. CONCLUSÕES

Em face dos resultados apresentados, o presente trabalho leva as seguintes conclusões:

1. A modificação proposta para o sistema de medidas do tanque "Classe A" mostrou-se tão viável quanto o sistema tradicional que se utiliza de um micrômetro e poço tranquilizador, com a vantagem de apresentar facilidade nas leituras, podendo ser operado por pessoal menos qualificado.

2. O sistema trabalha com uma variação mínima do nível da água, permanecendo praticamente com a mesma massa e após a recarga diária, o nível de referência é sempre o mesmo, facilitando o trabalho do operador.

3. Em cerca de 60% dos casos, o sistema modificado apresentou valores mais elevados do que o sistema tradicional.

4. O sistema modificado, por vezes, se viu prejudicado no seu funcionamento quando a velocidade do vento a 0,50 m da superfície do solo era superior a 4,0 m/s.

5. As leituras ao nascer e ao por do sol possibilitaram verificar as contribuições diurnas e noturnas para a evaporação da água no período de 24 horas, sendo que durante o inverno os valores dos dois períodos se equipararam e durante o verão a contribuição diurna chegou a ser de 80% da

do total do dia, supondo-se que a partir de médias latitudes, com a ocorrência de invernos mais acentuados, os valores de evaporação noturna naquela época chegue a alcançar os valores diurnos.

6.0 evaporímetro Piche mostrou-se eficiente na determinação do componente aerodinâmico da equação de Penman para a estimativa da evaporação de superfícies de água e para a estimativa da evapotranspiração potencial; as diferenças apresentadas entre o método original e o simplificado, são perfeitamente desprezíveis já que a contribuição do vento e do déficit de saturação foi em média de apenas 16% do total estimado.

7. Os evapotranspirômetros dotados de sistema de registro mostraram-se eficientes na determinação do comportamento diário da evapotranspiração potencial, a despeito de em algumas ocasiões terem apresentado funcionamento irregular, tendo possibilitado detectar o pico máximo daquele fenômeno durante o dia.

8. Os coeficientes determinados pela relação $EVPen/ECA$ tanto para os originais como para as simplificações propostas, mostraram-se consistentes com aqueles determinados por OLIVEIRA.

9. Considerando o critério adotado pela FAO quanto às classes de velocidade de vento e de umidade relativa, sem observar o rigor dos limites, pode-se afirmar que os coeficientes de tanque (k_p) para o evaporímetro com a modificação proposta, estiveram de acordo com os indicados por aquela para a determinação da evapotranspiração potencial através do tanque "Classe A"

$$ETP = k_p \cdot ECAs$$

7. SUMMARY

Simplifications in measurement and estimation methods of water evaporation and potential evapotranspiration were the main objectives of this research work.

A "Class A" pan modification was adopted with siphons maintaining the zero reference level by the time of pan refilling. This procedure minimized errors and simplified the water level observations without loss of precision.

A modified Penman's equation is presented for water evaporation and evapotranspiration estimates.

The simplified formulas were developed for the Piracicaba region and presented in the following form:

$$\frac{EaV}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,115 + 0,101 E_{piche} \quad (\text{evaporation})$$

$$r^2 = 0,943$$

$$\frac{EaT}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} = 0,224 + 0,129 E_{piche} \quad (\text{evapotranspiration})$$

$$r^2 = 0,958$$

Evaporation estimated by the Penman's method in its original form or in its simplified version showed to be consistent with the results found by OLIVEIRA (1971), if compared with "Class A" pan.

The aerodynamic term in Penman's equation is discussed and tests were performed with the siphoned "Class A" pans, under shade conditions.

Potential evapotranspiration estimated by Penman's simplified version formula agreed with evapotranspirometer data, observed in the same period.

8. LITERATURA CITADA

- ASSIS, F.N. de, 1978. O uso do Evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre a Evapotranspiração medida e estimada. Piracicaba, ESALQ-USP. 73p. (Dissertação de Mestrado).
- BRUTSAERT, W e G.YEH, 1970. Implications of a type of empirical Evaporation formula for lakes and pans. Water Resources Research. 6:1202-1208.
- BURMAN, R.D., 1976. Intercontinental comparison of Evaporation estimates. Journal of the Irrigation and Drainage Division. IR-1.102:109-117.
- CAMARGO, A.P. de, 1966. Contribuição para a determinação da Evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Campinas. IAC, 54 p. BC-161
- CAMPBELL, R.B. e C.J.PHENE, 1976. Estimating potential Evapotranspiration from screened pan Evaporation. Agricultural Meteorology. Amsterdam. 16:343-352.
- DAGG, M, 1970. A study of the water use of tea in East Africa using a hydraulic lysimeter. Agricultural Meteorology Amsterdam. 07:303-320.

- DENMEAD, O.T. e R.H.SHAW, 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agronomy Journal. Madison. 54(5):385-390.
- DOORENBOS, J. e W.O.PRUIT, 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, ROMA, FAO, 180 p. (Irrigation and Drainage Paper n° 24).
- EAGLEMAN, J.R. e W.L.DECKER, 1965. The role of soil moisture content and meteorological conditions. Agronomy Journal. Madison. 57(6):626-629.
- EKERN, P.C., 1966. Evapotranspiration by Bermuda grass Sod (Cynodon dactylon, L.Pers.), in Hawaii. Agronomy Journal. Madison. 58(4)387-390.
- FITZPATRICK, E.A. e W.R.STERN, 1966. Estimates of potential Evaporation using alternative data in Penman's formula. Agricultural Meteorology. Amsterdam. 3:225-239.
- FRITSCHEN, L. e R.H. SHAW, 1966. Evapotranspiration from corn as related to Pan evaporation. Agronomy Journal Madison. 53(3):149-150.
- GANGOPADHYAYA, M et alii, 1966. Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Geneva, WMO.121p (Technical Note n° 83).
- HALSTED, M.H. e W.COVEY, 1957. Some meteorological aspects of evapotranspiration. Soil Science Soc. of America. Madison. 21(5):461-464.
- HANKS, R.J. e R.W.SHAWCROFT, 1965. An economical lysimeter for evapotranspiration studies. Agronomy Journal. Madison. 57(6):634-636.
- HANSON, C.L. e F.RAUZI, 1977. Class A Pan evaporation as affected by shelter and daily prediction equation. Agricultural Meteorology. Amsterdam. 18:27-35.

- LEMON, E.R., A.H.GLASER e L.E.SATTERWHITE, 1957. Some aspects of the relationship of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration. Soil Science Soc. of America Proceedings. Madison. 21(5):464-468
- LINACRE, E.T., 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature alone. Agricultural Meteorology. Amsterdam. 18:409-424
- OLIVEIRA, A.S., 1971. Estudos comparativos da evaporação potencial estimada por tanques e pelo método de Penman. Piracicaba. ESALQ-USP. 113p. (Tese de Livre Docência).
- OMETTO, J.C., 1973. Etude des relations entre le rayonnement solaire global, le rayonnement net et l'insolation. Apresentado no Congresso Internacional "Le soleil au service de l'Homme" - Hulho - Paris.
- ORTOLANI, A.A., A.P.de CAMARGO e N.V.Villa NOVA, 1966. Correlação entre evapotranspiração potencial calculada segundo os métodos de Penman e de Thornthwaite e de dados de evapotranspirômetros, na região de Ribeirão Preto. In: Bragantia. Vol 25. Campinas-IAC. Nota 15.65-68.
- PENMAN, H.L., 1963. Vegetation and Hydrology. Londres. Commonwealth Agricultural Bureaux. 124 p. (Technical Communication nº 53).
- PETERS, D.B., 1960. Relative magnitude of evaporation and transpiration. Agronomy Journal. Madison. 52(9):536-538.
- PHENE, C.J. e R.B. CAMPBELL, 1975. Automating Pan evaporation measurements for irrigation control. Agricultural Meteorology. Amsterdam. 15:181-191.
- PRUITT, W.O., 1966. Empirical methods of estimating evapotranspiration using primarily evaporation Pans. Proceedings of Conf. Evapotranspiration, America Soc. Agric. Eng., Chicago, pp 57-61.

- RANZANI, G.O., O.FREIRE e T.KINJO, 1966. Carta de solos do município de Piracicaba. Piracicaba. ESALQ-USP. 85 p.
- RITCHIE, J.F. e E.BURNETT, 1968. A precision weighing Ly -
simeter for row crop water studies. Agronomy Journal
Madison. 60(5):545-549.
- ROSENBERG, N.J., 1974. Microclimate: The Biological envi -
ronment. New York. John Wiley & Sons. 301 p.
- SANTOS, J.M., 1957.-Contribuição aos estudos para a deter -
minação do albedo. Piracicaba. ESALQ-USP. 48 p. (Tese
de Doutorado).
- SEGNER, I. 1969. The effect of albedo on the evapotrans -
piration rate. Agricultural Meteorology. Amsterdam.
6:05-31.
- SELLERS, W.D., 1965. Physical Climatology. Chicago. The U -
niversity of Chicago Press. 272 p.
- SLATYER, R.O. e I.C. McILROY, 1961. Evaporation and the
principles of its measurements. In: Practical Microcli -
matology - with special reference to the water factors
in soil-plant-atmosphere relationship. Australia.CSIRO.
Unesco. pp 3.14-3.20.
- STANHILL, G., 1962. The use of the Piche evaporimeter in
the calculation of evaporation. Quarterly Journal of
Royal Meteorological Society. Londres. 88(375):80-82.
- TANNER, C.B. e E.R.LEMON, 1962. Radiant energy utilized in
evapotranspiration. Agronomy Journal. Madison. 54(3):207-
212.
- THORNTHWAITE, C.W. e F.K.HARE, 1965. The loss of water to
the air. Meteorological Monographs. 6:163-170.
- van BAVEL, C.H.M. e D.H.HIRRIIS, 1962. Evapotranspiration ra -
te from Bremuda grass and corn at Raleigh, N.Carolina .
Agronomy Journal. Madison. 54(4):319-322.

- van BAVEL, C.H.M. e D.H.HILLEL, 1976. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. Agricultural Meteorology. Amsterdam. 17:453-476.
- VILLA NOVA, N.A. e J.C.OMETTO, 1975. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. A ser publicado. 19p.
- WARTENA, L. e A.J.W.BORGHORST, 1961. The energy balance of an evaporation pan and the measurements of the reflectivity of its bottom. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society. Londres. 87(372):245-249.

9. APÊNDICE

Apêndice 1. Valores de Δ para o intervalo de temperaturas de 0,0°C a 28,9°C, obtidos derivando a expressão de Tetens.

t°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
00	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35
01	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38
02	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40
03	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43
04	0,43	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45
05	0,46	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48
06	0,49	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51
07	0,52	0,52	0,52	0,53	0,53	0,53	0,54	0,54	0,54	0,54
08	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,57	0,57	0,57	0,58
09	0,58	0,59	0,59	0,59	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,61
10	0,62	0,62	0,62	0,63	0,63	0,64	0,64	0,64	0,65	0,65
11	0,66	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69
12	0,69	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73
13	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77
14	0,78	0,78	0,79	0,79	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,82
15	0,82	0,83	0,83	0,84	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87
16	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,91	0,92	0,92
17	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97
18	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02
19	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08
20	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14
21	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20
22	1,21	1,21	1,22	1,23	1,23	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27
23	1,27	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31	1,32	1,32	1,33	1,34
24	1,34	1,35	1,36	1,36	1,37	1,38	1,39	1,39	1,40	1,41
25	1,42	1,42	1,43	1,44	1,45	1,45	1,46	1,47	1,48	1,48
26	1,49	1,50	1,51	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,55	1,56
27	1,57	1,58	1,59	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,63	1,64
28	1,65	1,66	1,67	1,68	1,68	1,69	1,70	1,71	1,72	1,73

Apêndice 2. Valores de σT_a^4 para intervalos de temperatura de 0,0°C a 28,9°C, em $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$

t°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
00	650	651	652	652	654	654	656	656	657	658
01	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668
02	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678
03	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688
04	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698
05	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708
06	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718
07	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728
08	729	730	731	732	733	734	736	737	738	739
09	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749
10	750	751	752	754	754	755	756	757	759	760
11	761	762	763	764	765	766	767	768	770	771
12	772	773	774	775	776	777	778	779	780	782
13	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792
14	794	795	796	797	798	799	800	801	802	804
15	805	806	807	808	809	810	812	813	814	815
16	816	817	818	819	820	822	823	824	825	826
17	827	828	830	831	832	833	834	835	836	838
18	839	840	841	842	843	845	846	847	848	849
19	850	852	853	854	855	856	857	859	860	861
20	862	863	864	866	867	868	869	870	872	873
21	874	875	876	878	879	880	881	882	883	885
22	886	887	888	890	891	892	893	894	896	897
23	898	899	900	902	903	904	905	906	908	909
24	910	911	913	914	915	916	918	919	920	921
25	922	924	925	926	927	929	930	931	932	934
26	935	936	937	939	940	941	942	944	945	946
27	948	949	950	951	952	954	955	956	958	959
28	960	961	963	964	965	967	968	969	970	972

Apêndice 3. Valores da radiação solar que atinge uma área horizontal unitária em um dia, admitindo-se a ausência da atmosfera e a constante solar (S) é-quivalente a $2 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para a latitude $22^{\circ} 43,0' \text{ S}$, de Junho/78 a Fevereiro/79.

DIA	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
01	571	553	619	742	871	976	1031	1043	1009
02	569	554	623	746	875	978	1032	1042	1005
03	568	554	626	751	879	981	1033	1042	1003
04	566	556	630	755	883	983	1034	1041	1001
05	564	557	633	760	887	986	1035	1041	999
06	563	559	637	765	891	988	1036	1040	997
07	561	560	640	769	894	990	1037	1040	995
08	560	562	644	773	898	993	1038	1039	993
09	559	563	647	778	902	995	1038	1038	990
10	556	565	651	782	905	997	1039	1038	988
11	555	566	655	786	910	999	1040	1037	985
12	554	568	659	791	914	1001	1040	1036	983
13	553	570	663	795	917	1003	1041	1035	980
14	553	572	667	799	921	1005	1041	1034	978
15	552	574	671	803	924	1008	1042	1034	975
16	551	576	675	809	927	1010	1043	1032	972
17	550	578	679	813	931	1011	1043	1031	969
18	550	580	683	817	934	1013	1043	1030	966
19	550	582	687	821	937	1015	1043	1029	964
20	549	585	691	826	940	1016	1043	1028	960
21	549	587	695	830	943	1018	1043	1026	956
22	549	590	699	834	947	1020	1044	1025	953
23	549	592	703	838	950	1021	1044	1024	950
24	549	595	708	842	953	1022	1044	1022	947
25	550	598	712	846	956	1024	1044	1021	944
26	550	600	716	850	959	1025	1044	1019	940
27	550	603	721	854	962	1026	1044	1017	937
28	551	606	725	859	965	1028	1044	1016	934
29	551	610	729	863	968	1029	1043	1014	-
30	552	613	734	867	970	1030	1043	1012	-
31	-	617	738	-	973	-	1043	1010	-

Apêndice 4. Valores de duração do dia em horas e décimos para a região de Piracicaba, latitude 22° 43.0'S.

DIA	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
01	10,70	10,63	10,95	11,52	12,17	12,81	13,28	13,37	13,00
02	10,70	10,63	10,96	11,54	12,19	12,83	13,29	13,36	12,98
03	10,69	10,64	10,98	11,56	12,21	12,85	13,30	13,36	12,96
04	10,68	10,64	11,00	11,58	12,23	12,87	13,31	13,35	12,95
05	10,67	10,65	11,01	11,61	12,25	12,89	13,32	13,34	12,93
06	10,66	10,65	11,03	11,63	12,27	12,91	13,33	13,33	12,91
07	10,66	10,66	11,05	11,65	12,30	12,93	13,33	13,33	12,89
08	10,65	10,67	11,06	11,67	12,32	12,94	13,34	13,32	12,87
09	10,64	10,67	11,08	11,69	12,34	12,96	13,35	13,31	12,85
10	10,64	10,68	11,10	11,71	12,36	12,98	13,35	13,30	12,83
11	10,63	10,69	11,12	11,73	12,38	13,00	13,36	13,29	12,82
12	10,63	10,70	11,13	11,75	12,40	13,01	13,37	13,28	12,80
13	10,62	10,71	11,15	11,78	12,42	13,03	13,37	13,27	12,78
14	10,62	10,72	11,17	11,80	12,45	13,05	13,38	13,26	12,76
15	10,62	10,73	11,19	11,82	12,47	13,06	13,38	13,25	12,74
16	10,61	10,74	11,21	11,84	12,49	13,08	13,38	13,23	12,72
17	10,61	10,75	11,23	11,86	12,51	13,09	13,39	13,22	12,70
18	10,61	10,76	11,24	11,88	12,53	13,11	13,39	13,21	12,68
19	10,61	10,77	11,26	11,90	12,55	13,12	13,39	13,20	12,65
20	10,61	10,78	11,28	11,93	12,57	13,14	13,39	13,18	12,63
21	10,61	10,79	11,30	11,95	12,59	13,15	13,39	13,17	12,61
22	10,61	10,81	11,32	11,97	12,61	13,17	13,39	13,16	12,59
23	10,61	10,82	11,34	11,99	12,63	13,18	13,39	13,14	12,57
24	10,61	10,83	11,36	12,01	12,65	13,20	13,39	13,13	12,55
25	10,61	10,85	11,38	12,03	12,67	13,21	13,39	13,11	12,53
26	10,61	10,86	11,40	12,06	12,69	13,22	13,39	12,09	12,51
27	10,61	10,87	11,42	12,08	12,71	13,23	13,39	13,08	12,49
28	10,62	10,89	11,44	12,10	12,73	13,25	13,38	13,06	12,46
29	10,62	10,90	11,46	12,12	12,75	13,26	13,38	13,05	-
30	10,62	10,92	11,48	12,14	12,77	13,27	13,38	13,03	-
31	-	10,93	11,50	-	12,79	-	13,37	13,01	-

Apêndice 5. Valores de razão de insolação (n/N) para a região de Piracicaba, latitude 23° 43,0'S

DIA	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
01	0,42	0,88	0,74	0,30	0,77	0,43	0,85	0,18	0,62
02	0,23	0,78	0,75	0,28	0,82	0,89	0,78	0,10	0,60
03	0,78	0,56	0,79	0,78	0,80	0,33	0,71	0,15	0,71
04	0,58	0,84	0,75	0,59	0,82	0,08	0,66	0,00	0,81
05	0,86	0,44	0,78	0,00	0,81	0,00	0,74	0,52	0,73
06	0,78	-	0,88	0,46	0,85	0,60	0,23	0,72	0,74
07	0,66	0,61	0,90	0,45	0,84	0,86	0,06	0,86	0,81
08	0,17	0,70	0,45	0,47	0,74	0,83	0,00	0,90	0,79
09	0,31	0,75	0,59	0,89	0,77	0,54	0,01	0,86	0,75
10	0,85	0,73	0,92	0,72	0,06	0,22	0,51	0,83	0,27
11	0,86	0,84	0,90	0,90	0,57	0,00	0,69	0,27	0,31
12	0,64	0,75	0,81	0,85	0,85	0,00	0,62	0,02	0,19
13	0,68	0,63	0,00	0,78	0,59	0,74	0,76	0,69	0,03
14	-	0,62	0,03	0,17	0,14	0,84	0,31	0,87	0,16
15	0,73	0,19	0,91	0,08	0,56	0,78	0,42	0,88	0,41
16	0,57	0,28	0,90	0,62	0,54	0,00	0,47	0,89	0,55
17	0,63	-	0,90	0,06	0,80	0,29	0,69	0,88	0,11
18	0,83	-	0,76	0,82	0,68	0,56	0,44	0,84	0,51
19	0,82	-	0,72	0,82	0,46	0,77	0,72	0,57	0,75
20	0,71	-	0,65	0,56	0,76	0,26	0,85	0,02	0,82
21	0,47	-	0,41	0,23	0,91	0,59	0,75	0,00	-
22	0,74	-	0,83	0,79	0,91	0,46	0,65	0,24	0,15
23	0,55	-	0,38	0,80	0,89	0,36	0,70	0,57	0,37
24	0,57	-	0,02	0,80	0,89	0,68	0,79	0,75	0,76
25	0,66	0,55	0,90	0,83	0,89	0,73	0,59	-	0,81
26	0,80	0,89	0,83	0,71	0,79	0,55	0,00	0,73	0,82
27	0,85	0,89	0,79	0,70	0,46	0,02	0,01	0,56	0,62
28	0,89	0,78	0,52	0,67	0,35	0,70	0,00	0,30	0,72
29	0,89	0,64	0,57	0,74	0,31	0,87	0,15	0,00	-
30	0,83	0,71	0,64	0,82	0,64	0,68	0,44	0,35	-
31	-	0,90	0,00	-	0,27	-	0,82	0,48	-