**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por
evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do
Estado de São Paulo**

Greice Ximena Santos Oliveira

**Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Agronomia, Área de concentração:
Física do Ambiente Agrícola**

**Piracicaba
2009**

Greice Ximena Santos Oliveira
Engenheiro Agrônomo

**Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por
evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do
Estado de São Paulo**

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ ROBERTO ANGELOCCI**

**Tese apresentada para obtenção do
título de Doutor em Agronomia, Área
de concentração: Física do Ambiente
Agrícola**

**Piracicaba
2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Oliveira, Greice Ximena Santos

Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo / Greice Ximena Santos Oliveira. - - Piracicaba, 2009.
102 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.
Bibliografia.

1. Agrometeorologia 2. Evaporação 3. Hidrologia 4. Lagos 5. Modelos matemáticos
6. Tanques 7. Vento I. Título

CDD 551.572
O48r

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Ao meu pai, **Aloísio**

que pesquisou, estudou, testou, corrigiu e acreditou

OFEREÇO

Ao meu noivo, **Fábio,**

pela sua compreensão e amor crescentes,

pelo ombro amigo, pelas palavras de carinho e incentivo

A minha mãe, **Ana Lúcia,** pelo amor incondicional e presença diária,

A minha avó, **Naide,** amiga e fã, pelo carinho e torcida,

Ao meu irmão, **Gleiser Vagner.**

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai, Filho e Espírito Santo, minha fonte de força diária, que me faz crescer e entender o mistério do porquê. Kyrie Eleison!

A meu pai Aloísio, que merece esse título tanto quanto eu, que em todos os momentos esteve comigo. Incentivador e paitrocinador de meus sonhos.

A minha mãe, Ana Lúcia, base de meu equilíbrio, com seu amor infinito, suportou as piores fases, me deu colo e também, muitas vezes, foi dura quando foi necessário.

A minha avó, Naide, que muito me emocionou e me alegrou com as projeções de um futuro novo. Pela esperança diariamente alimentada.

Ao meu noivo, Fábio, que muito aprendeu com a distância, que provou estar junto mesmo fisicamente distante.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Angelocci, pela orientação, sugestões e correções.

Ao Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova, pelos ensinamentos, motivação, idéias e principalmente pelo carinho. Obrigada por me permitir conviver consigo!

Ao Prof. Dr. Clóvis Alberto Volpe, por tão gentilmente ceder dados meteorológicos de Jaboticabal/SP, pela atenção, cordialidade, hospitalidade.

Aos queridos funcionários na UNESP/Jaboticabal: Vanessa, Gilberto e especialmente Carlos, pela hospitalidade, eficiência, compromisso e responsabilidade pelo que faz.

Ao Prof. Dr. Francisco Adriano, por tudo que me ensina.

Ao Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz, que sempre acreditou, apoio de todas as horas, mesmo no silêncio.

À amiga Andrea, pela convivência diária, ajuda constante, conversas, almoços, jantas, lanches, saídas ao shopping. Por compartilhar momentos infinitos e diversos.

A amiga Maristela, pelos abraços carinhosos, pela convivência com Sarah.

Ao amigo Lucas Vellame, pela ajuda desinteressada, contribuição, orientação, disponibilidade, descontração. Pela doçura de Nita.

Aos amigos, Leandro e Marlon, pela amizade florescida, pelo carinho, pelo apoio.

A querida Cristiane e seu amado Valter, amigos sinceros, que sempre me motivaram a buscar força no meu interior e na positividade do pensamento.

As pessoas queridas que deixaram um pouco de si: Tales, Ralini, Tadeu, Walesca, João Batista, Anthony, Júlia, Valéria, Bete.

A querida psicóloga Paula Cristina, que me ajudou a descomplicar duas etapas fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A minha grande mestra de dança do ventre Josiany Shimla, que sempre esteve presente, escutou, se preocupou e também me enlouqueceu, mas principalmente, por ter me feito descobrir uma grande força interior.

As queridas odaliscas, Karina, Erica, Patrícia e especialmente a Lory, pelos momentos mágicos, pela cumplicidade. Saudades!

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas ESALQ/USP: Ângela, Edivaldo, Fernando, Francisco, Robinson, Solange e Vanderlino.

"A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO	25
2.1 Processo de evaporação: importância, definições e fatores determinantes	25
2.2 Uso de evaporímetros na determinação da evaporação de superfícies de água livremente exposta à atmosfera	29
2.2.1 Tipos de tanques e sistemas de medida	29
2.2.2 Uso e comparação de tanques para estimativa da evaporação de superfícies extensas de água livremente exposta à atmosfera	33
2.3 Estimativa da evaporação de superfície de água livremente exposta à atmosfera por métodos meteorológicos	36
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Locais	43
3.2 Medidas de evaporação e dos elementos meteorológicos	45
3.2.1 Evaporação	45
3.2.2 Observações meteorológicas	47
3.3 Determinação das relações da evaporação dos tanques Classe A e de 20m ²	48
3.4 Modelos meteorológicos para estimativa da evaporação de água livremente exposta à atmosfera	49
3.4.1 Método do balanço de energia- Razão de Bowen	49
3.4.2 Método de Penman	51
3.4.3 Método de Priestley - Taylor	53
3.4.4 Método de Penman simplificado	54
3.4.5 Método de transferência de massa baseado na equação de Dalton	55
3.4.6 Método de Linacre	55
3.4.7 Método de Penman adaptado	56
3.4.8 Método do Tanque Classe A	58
3.5 Relações entre variáveis medidas sobre o lago e na estação meteorológica	59
3.6 Análise dos dados de relações entre evaporação de tanques e estimada por métodos meteorológicos	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61

4.1 Relações entre as variáveis meteorológicas medidas em ambiente terrestre (posto meteorológico) sobre lago	61
4.2 Temperatura da água nos evaporímetros e no lago	64
4.3 Temperatura do ar e na água	67
4.4 Relações entre evaporação do tanque de 20 m ² e do lago artificial	68
4.5 Relações entre evaporação do tanque Classe A e do tanque de 20 m ² em Piracicaba, SP	70
4.6 Relações entre a evaporação medida em tanque de 20 m ² e métodos meteorológicos	75
4.6.1 Métodos com emprego de variáveis meteorológicas observadas no ambiente e lago	75
4.6.2 Métodos com emprego de variáveis meteorológicas observadas no ambiente de postos meteorológicos	81
4.7 Discussão final	87
5 CONCLUSÕES	93
5.1 Referentes às relações entre medidas dos tanques Classe A e de 20 m ²	93
5.2 Referentes às relações entre as estimativas por métodos meteorológicos medidas pelo tanque de 20 m ²	93
REFERÊNCIAS	95

RESUMO

Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo

Este trabalho objetivou estabelecer relações entre evaporação de tanques Classe A e de 20 m², em Piracicaba, SP e testar o desempenho de métodos meteorológicos de estimativa da evaporação de superfícies de água livre nessa localidade e em Jaboticabal, SP. Utilizou-se dados meteorológicos coletados em ambiente de um pequeno lago artificial em Piracicaba para cálculos dos métodos de balanço de energia-razão de Bowen, Penman, Priestley-Taylor e Penman simplificado. Dados meteorológicos observados sobre gramado foram usados para estimativa pelos métodos de Penman, Penman modificado, Dalton adaptado, Linacre e tanque Classe A-Snyder. Os métodos foram avaliados utilizando índices de concordância e desempenho a partir de análise de regressão e de desvios por comparação com medidas do evaporímetro de 20 m². Foram observadas relações lineares significativas entre os valores da evaporação dos tanques Classe A e de 20 m² em todos os meses do ano em Piracicaba. A razão mensal entre as medidas dos evaporímetros apresentou variação ao longo do ano, com superestimativa pequena (até 3%) de fevereiro a junho e em novembro, e grande (10% a 15%) nos outros meses, em relação aos dados de Oliveira (1971) para a mesma localidade. A maior consistência estatística e representatividade da série de medidas, com 3 repetições de tanque Classe A, indicam que os fatores mensais de relações entre os dois evaporímetros podem substituir os obtidos por Oliveira (1971). Todos os métodos utilizados nos dois ambientes apresentaram boa concordância em termos médios com os observados no tanque de 20 m², sempre com grande dispersão dos dados, diminuindo com o aumento do número de dias de contabilização da evaporação. O método de balanço de energia apresentou bom desempenho com cálculos realizados em períodos de 24 horas, mostrando desvios acentuados com contabilização no período diurno. O método de Penman mostrou bom desempenho quando utilizado para períodos de 24 horas, com subestimativas médias entre -6,0% e -10,5%, mas com superestimativas de +7,2 e +12,4% no período diurno. Os métodos de Priestley-Taylor (1972) e de Penman simplificado mostraram desvios médios pequenos (+2,7 e +5,7%), sendo considerados de bom desempenho. Para os métodos que usaram observações no posto meteorológico, o do tanque Classe A-Snyder mostrou os menores desvios médios em Piracicaba (+3,9% a + 4,6%), mas apresentou maiores superestimativas (+14,0% a +14,4%) em Jaboticabal. Outra discrepância entre localidades foi observada para o método de Penman modificado, com subestimativas entre 5,5 e 14,1% em Piracicaba, mas desvio de +1,0%, em Jaboticabal. O método original de Penman mostrou desvios similares em ambas localidades (-8,9% a 12,3%), enquanto o de Dalton adaptado apresentou desvios de +2,1% a 8,1%, mas com alta dispersão em todos dias de contabilização. Os métodos de Penman simplificado e o de Priestley-Taylor, no caso do lago, e o tanque Classe A-Snyder, no caso do posto meteorológico, foram os que no geral apresentaram resultados mais comparáveis com os do tanque de 20 m², sendo que par ao último deve-se atentar para o desvio sistemático em Jaboticabal.

Palavras-chave: Tanque de 20 m²; Tanque Classe A; Lago; Temperatura da água; Temperatura do ar; Umidade do ar; Vento; Saldo de radiação; Razão de Bowen; Hidrologia

ABSTRACT

Relations between measurements of open-water surfaces evaporation by evaporimeters and estimates by meteorological methods in two regions of the State of Sao Paulo, Brazil

This study aimed to establish relations between evaporation Class A pan and 20 m² tank, in Piracicaba region, State of Sao Paulo, Brazil and to test the performance of meteorological methods to estimate open-water surfaces evaporation in this same region and also in Jaboticabal, SP. Computation of daily evaporation was performed by using weather data, collected in the environment of a small artificial lake in Piracicaba, and the following methods: energy balance-Bowen ratio, Penman, Priestley-Taylor and Penman simplified. The methods of Penman, Penman adapted, Dalton adapted, Linacre and of Class A pan-Snyder were evaluated by using weather station data in both regions. The results of the methods were compared with the measurements of the 20 m² tank evaporation, in a daily basis, and also for two, three or for the mean values for all days of measurements in every month, using indexes of agreement and performance from the regression analysis and deviations from the estimated and measured values. The linear relations between evaporation measured by the two evaporimeters were significative for all months in Piracicaba. The ratio of the two measurements showed variation throughout the year, with a small overestimation (about 3%) from February to June and November, and greater (10% to 15%) in the other months, compared to results of Oliveira (1971) for the same region. Due to the statistical consistency and representativeness of the series of 9 years and 3 repetitions of Class A pan, it is indicated that the factors of monthly relations between the two evaporimeters observed in this study can advantageously replace those obtained by Oliveira (1971). All methods used in the two environments showed good agreement, in average basis, with measurements by 20 m² tank, with large dispersion of data, which decreased with the increase of the time step. The energy balance method showed good performance when the calculations were performed in 24-h periods, but large deviations compared to the tank with data integrated over the daylight period. The Penman method showed good performance when used for periods of 24 h, with an average underestimation between -6.0 and -10.5% when integrated over the 24-h period, but with overestimation of +7.2 and +12.4% for the daylight period. The methods of Priestley-Taylor (1972) and Penman simplified showed small deviations between +2.7 and +5.7%, being considered as having good performance compared to the evaporimeter. Among the methods that used weather station data, the class A- Snyder was the one that showed the lowest average deviation in Piracicaba (+3.9 to +4.6%), but the greatest overestimation (+14.0% to 14.4%) in Jaboticabal. Another discrepancy between locations was observed for the Penman method modified, with underestimation between 5.5% and 14.1% in Piracicaba, but deviation of +1.0% in Jaboticabal. The original Penman method showed similar deviations in the two regions (-8.9% to 12.3%), while Dalton adapted method showed deviations of +2.1% to 8.1%. The methods of Penman simplified and Priestley-Taylor, used in the lake environment, and the Class A pan-Snyder method, with the use of wheater station data, were those that showed most comparable results with the 20 m² tank evaporation, but in Jaboticabal, it is necessary to take to account the observed systematic mean deviation.

Keywords: 20 m² tank; Class A pan, Lake; Water temperature; Air temperature; Air humidity; Wind; Net radiation; Ration of Bowen; Hydrology

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Estação Agrometeorológica do Campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP: a) vista aérea (Fonte: Google Earth). b) vista parcial, com os tanques Classe A em primeiro plano e o de 20 m² ao fundo43
- Figura 2 - Lago artificial em frente ao Pavilhão de Engenharia, Departamento de Ciências Exatas do Campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP: a) vista aérea, b) vista frontal. (Fonte: Google Earth).....44
- Figura 3 - Estação Agroclimatológica da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal: a) vista aérea (Fonte: Google Earth). b) tanques Classe A e de 20 m²45
- Figura 4 - Tanques evaporímetros: a) Tanque Classe A, em seu interior o poço tranquilizador com parafuso micrométrico e o mini-abrigo de tubo de PVC com termopar. b) Tanque de 20 m².....46
- Figura 5 - Relações entre médias diárias de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar global e saldo de radiação sobre a superfície gramada e sobre o lago artificial. Piracicaba, SP61
- Figura 6 - Saldo de radiação noturno no gramado e no lago. Piracicaba, SP63
- Figura 7 - Relações entre a velocidade média do vento. a) em períodos de 15 minutos a 0,4 m e 1,0 m sobre lago. b) diária a 2,0 m sobre gramado e a 1,0 m sobre o lago64
- Figura 8 - Relações de temperatura média da água dos tanques Classe A e 20 m². Piracicaba, SP65
- Figura 9 - Relações entre a temperatura média diária da água do lago e água dos tanques: a) 20 m²; b) Classe A. Piracicaba, SP65
- Figura 10 - Variação da temperatura da água nos evaporímetros e no lago: a) DJ 53 a 57; b) DJ 115 a 120; c) DJ 165 a 170; d) DJ 53 a 17867
- Figura 11 – Relação da temperatura média diária da água do lago e do ar. Piracicaba, SP68

Figura 12 - Evaporação do lago comparada ao tanque de 20 m ² : a) médias diárias; b) média para o período de dois dias	69
Figura 13 - Relações mensais entre evaporação dos tanques Classe A e 20 m ² . Piracicaba, SP	70
Figura 14 - Equação de regressão linear entre a evaporação do tanque de 20 m ² e Classe A. Piracicaba, SP	73
Figura 15 - Relação entre a evaporação estimada pelos métodos de BERB, Penman, Priestley-Taylor, Penman-Vila Nova e medida pelo tanque de 20 m ² . Piracicaba,SP	77
Figura 16 - Relação entre evaporação estimada pelo método de Penman modificado por Kohler e Parmele e medida pelo tanque de 20 m ² . Piracicaba e Jaboticabal,SP	82
Figura 17 - Relação entre evaporação estimada pelo método de Linacre e medida pelo tanque de 20 m ² . Piracicaba e Jaboticabal,SP	82
Figura 18 - Relação entre evaporação estimada pelo método de Snyder e medida pelo tanque de 20 m ² . Piracicaba e Jaboticabal,SP	82
Figura 19 - Relação entre evaporação estimada pelo métodos de Penman e medida pelo tanque de 20 m ² . Piracicaba e Jaboticabal,SP	83
Figura 20 - Relação entre a evaporação estimada pelo método de Dalton adaptada por Gangopadhyaya et al. e medida pelo tanque de 20 m ² . Piracicaba e Jaboticabal,SP	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa de evaporação pelo índice c	60
Tabela 2 - Teste F, a 5% de significância, obtido para as equações lineares de regressão entre a evaporação dos tanques de 20 m ² e Classe A	72
Tabela 3 - Valores médios diários de evaporação medida nos tanques de 20 m ² e Classe A para cada mês e a razão entre a evaporação de ambos, 1999 a 2007. Piracicaba, SP	73
Tabela 4 - Coeficientes a , b , R ² das equações entre valores de evaporação estimados pelos métodos (E_{est}) e medidos (E_{20}). d e c = índices de concordância e de desempenho. Formas de cálculo: níveis de medida de T_s e T_u (Bowen); uso de T_u e/ou T_s para cálculo de s (Penman).	79
Tabela 5 - Coeficientes a , b e R ² das equações, índices d , c , e desvios médios e relativos entre valores de evaporação estimados (E_{est}) e medidos (E_{20}). Piracicaba e Jaboticabal, SP.	85

1 INTRODUÇÃO

Para um gerenciamento eficiente dos recursos hídricos, Chin e Zhao (1995) afirmam que a estimativa precisa da evaporação é fundamental, pois esta é um dos principais componentes do ciclo hidrológico. Portanto, o conhecimento das perdas de água por evaporação de superfícies de água livremente exposta à atmosfera, principalmente onde são altíssimas, como em regiões áridas e semi-áridas, além de representar uma valiosa contribuição para diferentes campos do conhecimento científico, tem grande importância, especialmente nas aplicações meteorológicas e hidrológicas. Diante disto, estudos que envolvam medidas e/ou estimativas precisas da evaporação, representam uma alternativa muito importante para o planejamento mais adequado do uso da água armazenada em reservatórios.

O conhecimento da taxa de evaporação de corpos com superfície de água livremente exposta à atmosfera, como lagos, represas, reservatórios, tanques, etc. torna-se necessário, como, por exemplo, em estudos de balanços hídricos, no manejo de suprimento de água para fins agrícolas e urbanos, nos estudos hidrológicos em geral, no manejo de várzeas e na modelagem da água superficial e subsuperficial (FINCH, 2001; TAN; SHUY; CHUA, 2007).

A World Meteorological Organization (WMO, 1971) afirma que, quando se trabalha com corpos de água naturais, a medida direta da evaporação apresenta dificuldades, decorrentes das técnicas de medida e, também, da necessidade de um controle adequado das entradas e saídas de água do corpo, como aquelas devidas ao deflúvio superficial, ou por alimentação de lagos por cursos de água, ou por infiltração no solo (ou drenagem) para camadas profundas, difíceis de serem medidas. Segundo Simon e Mero (1985), nesses casos é praticamente impossível a medida da evaporação pelo balanço de água.

Devido aos problemas citados, é comum a determinação da evaporação de superfícies de água livremente exposta à atmosfera por estimativa, seja por uso de medidas de tanques de evaporação (evaporímetros), seja por aplicação de métodos meteorológicos.

A estimativa pelo uso de tanques de evaporação associa as medidas destes com a evaporação dos corpos naturais, sendo interessante devido ao baixo custo e à relativa simplicidade de medida nos evaporímetros. Apesar de simples, a determinação apresenta problemas, visto que a evaporação dos tanques depende da sua geometria, área evaporativa e exposição das paredes (totalmente expostas à atmosfera ou enterradas), o que torna as medidas específicas para cada tipo.

É comum, a utilização de tanques de pequeno porte em estudos climatológicos e hidrológicos, por ser a sua evaporação um integrador da demanda hídrica da atmosfera, e no manejo da água na agricultura, pois os seus dados podem ser utilizados na determinação da evapotranspiração.

Vários tipos de tanques evaporímetros têm sido utilizados, os dois mais comuns são o tanque Classe A (USWB - United States Weather BureauSWB) bastante utilizado no Ocidente, e o GGI-3000, de uso no leste europeu.

A WMO tem conduzido comparações entre tanques evaporímetros, procurando encontrar um tanque de evaporação de referência internacional. Os estudos realizados, até agora, em vários países, indicam que os tanques enterrados fornecem dados geralmente mais próximos da evaporação de um lago e da evapotranspiração potencial, do que aqueles obtidos com tanques colocados acima da superfície, como o Classe A, devido à absorção de radiação e a transferência de calor sensível entre o ar do ambiente e sua parede (GANGOPADHYAYA et al., 1966; TAN e FULTON, 1980), resultando um regime de armazenamento de calor no seu interior diferente daquele de um grande corpo de água. Outros problemas são apontados, como a instalação do tanque em sítios não representativos dos locais onde se encontra o grande corpo de água, principalmente, quanto ao efeito das condições de sua bordadura, do regime de ventos, condições atmosféricas diferenciadas sobre o tanque e o corpo de água. Adicionalmente, o manejo e as medidas nos tanques apresentam problemas, como a ocorrência de chuvas intensas que comprometem as medidas, erros de leitura pelo observador, consumo de água por animais (que pode ser minimizado por colocação de telas sobre o tanque), vazamentos imperceptíveis.

Há algumas décadas, são feitas tentativas de se automatizar as medidas dos tanques, o que poderia minimizar o erro do observador e permitir registros contínuos e o

trabalho com dados horários, por exemplo, com tratamento direto em ambiente computacional, mas essa técnica também apresenta problemas. Como resultado, normalmente as séries de medidas evaporimétricas apresentam descontinuidades e falhas grandes ao longo dos anos.

Desde o trabalho de Sleight (1917), que comparou a evaporação de tanques com diferentes diâmetros e assumiu que a evaporação de um tanque circular de diâmetro com, no mínimo, 3,60 m representava bem a evaporação de um lago no Colorado, USA, tem-se procurado adotar um evaporímetro de referência para estudos de evaporação. Em 1996, a WMO recomendou para tal fim o tanque com diâmetro de 5,0 m e profundidade de 2,0 m (“tanque de 20 m²”). Tem-se adotado a evaporação desse tanque como representativa daquela de um lago ou de uma superfície extensa de água, apesar de ser uma grande aproximação, pois a evaporação real da superfície líquida depende, além dos fatores meteorológicos, de outros específicos, tais como: geometria do corpo de água, presença de plantas aquáticas, grau de pureza da água e profundidade do lago. A evaporação do tanque de 20 m² é adotada, também, como referência em estudos de desempenho de métodos meteorológicos.

Considerando os diversos tipos de evaporímetros utilizados, vários estudos são desenvolvidos com a finalidade de se encontrar as relações de evaporação entre eles. No Brasil, podem ser citados os trabalhos de Oliveira (1971) para Piracicaba, SP, de Volpe e Oliveira (2003) para Jaboticabal, SP e de Leitão, Oliveira e Leitão (2007), em duas regiões da Paraíba (Cariri e Sertão). As relações, logicamente, são específicas para os tipos de tanque e para as condições climáticas regionais.

Um grande número de métodos tem sido proposto, como alternativa para estimativa da evaporação, usando-se equações determinísticas, originárias de modelos meteorológicos. O método combinado (termos energético e aerodinâmico) de Penman (1948) é um dos mais utilizados para estimar a denominada “evaporação potencial”, definida como aquela que ocorre numa superfície extensa de água livremente exposta às condições atmosféricas. Diversas modificações da equação de Penman tem sido apresentadas, como sejam: a de Kohler (1955) ou a simplificação de Villa Nova (1967).

O modelo de transferência de massa de Gangopadhyaya et al. (1966), baseado na equação de Dalton e o método empírico de Linacre (1993), são aplicados, como

também o modelo conceitual das relações complementares de Morton (1971; 1983; 1986). Outra possibilidade é usar o coeficiente de tanque de evaporação (K_p), estimado a partir das equações propostas por Snyder (1992), em função da bordadura do tanque, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento, em escala diária.

Métodos usados em escala micrometeorológica, como o balanço de energia-razão de Bowen sobre a superfície líquida, ou o método de correlação de turbilhões são, também, utilizados. Um modelo de origem meteorológica foi proposto por Edinger et al. (1968), baseado no conceito de uma temperatura de equilíbrio e uma constante de tempo associada, para minimizar o efeito do armazenamento de calor no corpo d'água. Recentemente, introduziu-se o uso de modelos de redes neurais artificiais (TAN; SHUY; CHUA, 2007).

Vários trabalhos com uso de métodos meteorológicos foram realizados no Brasil, no estado de São Paulo (VILLA NOVA, 1967; OLIVEIRA, 1971; TROVATI, 1987; ROQUE, 2000; ROQUE e SANSÍGOLO, 2001), na região do lago Sobradinho (DIAS e KELMAN, 1987; PEREIRA, 2004) e em duas localidades da Paraíba (LEITÃO; OLIVEIRA; LEITÃO, 2007), com diferentes abordagens e usando o método de Penman ou a evaporação do tanque de 20 m^2 como referência para testar o desempenho dos outros métodos.

A contribuição desses trabalhos para o estudo de evaporação de corpos d'água como lagos, reservatórios e outros é muito importante, mas evidenciam que novos estudos precisam ser realizados. Silans (1989) mencionou a importância de mais estudos na área, de maneira a ampliar a metodologia de cálculo da evaporação, de modo a conferir maior precisão nas estimativas.

Considerando a hipótese de que é possível estimar a evaporação de uma superfície de água livremente exposta à atmosfera tanto a partir de evaporímetros práticos, como o tanque Classe A, como por métodos meteorológicos, a proposta desse trabalho fundamenta-se nos objetivos descritos a seguir.

Objetivo geral:

- Estabelecer relações mensais entre evaporação dos tanques Classe A e de 20 m^2 em Piracicaba, SP, bem como verificar as relações entre a evaporação

estimada por métodos meteorológicos e a medida pelo tanque de 20 m² para esta localidade e para Jaboticabal, SP, com intuito de comparar o desempenho desses métodos e fazer recomendações sobre o seu emprego.

Objetivos específicos:

- Estabelecer relações mensais entre a evaporação do tanque Classe A e do tanque de 20 m² em Piracicaba, a partir de uma série de 9 anos de observações e com repetições de medidas do Classe A, o que permite, em tese, obter relações mais consistentes do que as determinadas por Oliveira (1971) para essa localidade;
- Com base em série de medidas meteorológicas realizadas no ambiente de um pequeno lago artificial em Piracicaba, SP, determinar relações da evaporação diária para períodos de um e dois dias, estimada pelos métodos do balanço de energia-razão de Bowen, de Penman (1948), de Penman simplificado por Villa Nova et al. (2006) e de Priestley-Taylor (1972) com a evaporação medida pelo tanque de 20 m², tomando-se este último como padrão para discutir o desempenho dos métodos e fazer recomendações sobre o seu emprego;
- Com base em medidas sobre gramado em postos meteorológicos, determinar as relações entre a evaporação estimada pelos seguintes métodos de base meteorológica: de Penman, de Penman adaptado por Kholer e Parmele (1967), da equação de Dalton adaptada por Gangopadhyaya et al. (1966) e do do tanque Classe A com coeficientes determinados pela equação de Snyder (1992) e a evaporação medida pelo tanque de 20 m², tomada como referência, para discutir o desempenho e fazer recomendações sobre o emprego desses métodos nas localidades de Piracicaba e Jaboticabal, SP.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Processo de evaporação: importância, definições e fatores determinantes

O ciclo da água inicia-se com a energia solar que incide na Terra. A transferência da água da superfície terrestre para a atmosfera, passando do estado líquido ao estado gasoso, processa-se através da evaporação direta, por transpiração das plantas e dos animais e, em menor escala, por sublimação. A vegetação tem um papel importante neste ciclo, pois uma parte da água precipitada é absorvida pelas raízes e acaba por voltar à atmosfera pela transpiração ou pela simples e direta evaporação do solo e da própria água interceptada pela vegetação, constituindo o processo denominado de evapotranspiração.

Durante esta alteração do seu estado físico, a água, absorve calor, armazenando energia solar na molécula de vapor. Dado o controle da energia solar no processo de evaporação, a água evapora, em particular, durante os períodos mais quentes do dia e nas zonas mais quentes da Terra, principalmente nas regiões áridas e semi-áridas. No entanto, a rapidez com que a água evapora (taxa de evaporação) depende de vários fatores, além da disponibilidade de energia radiante, tais como: área da superfície evaporante, temperatura, pressão atmosférica, umidade do ar e vento.

Com exceção da Europa e América do Norte, é na agricultura irrigada que se emprega a maior quantidade de água, responsável no mundo por aproximadamente 69% de todo o uso. A utilização para fins domésticos conta com 10% e a indústria consome 21% de toda a água retirada (FAO, 2003).

É importante fazer uma distinção entre a água que é retirada e a água que é realmente utilizada, pois dos 3600 km³ de água retirados anualmente, para uso humano, aproximadamente, metade é absorvida através da evaporação e transpiração das plantas. O restante, ao contrário, retorna para os rios ou se infiltra no solo e fica depositada nos aquíferos. Contudo, essa água, é geralmente, de qualidade inferior àquela que foi inicialmente retirada. A irrigação consome bastante, metade ou mais, da água que é utilizada em forma de evaporação, incorporação nas lavouras e

transpiração das plantações. A outra metade retorna para o solo, para a superfície ou se perde em evaporação improdutiva (ANA, 2006).

O Brasil é um grande reservatório de água no mundo, possuindo a maior reserva hidrológica do planeta – 13,8% da água doce disponível situa-se no país, perfazendo 59,9% dos recursos hídricos da América do Sul, o que se configura como um grande desafio para gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente, porque a concentração de água no país encontra-se fisicamente má distribuída (ANA, 2006).

Acredita-se que até 2025, a atividade agrícola com irrigação irá crescer de 20 a 30%. No Brasil, calcula-se que 50% da água captada para uso é destinada para irrigação em apenas 5% da área total, conseqüentemente, torna-se necessário ampliar a área irrigada, adotando-se técnicas e equipamentos mais eficientes, que determinem menor desperdício. Estima-se que apenas metade da água de irrigação chega às raízes das plantas.

Observa-se que as áreas com potencial de crescimento agrícola são aquelas com deficiência hídrica elevada, o que implica na construção de corpos artificiais, como represas, açudes e tanques, um aliado indispensável para sustentar projetos de irrigação. Assim, a previsão de perdas de água por evaporação, tanto na época do projeto quanto ao longo do período de operação de um reservatório, representa um fator primordial de economia para o setor.

Considerando estas questões e, ainda, a cobrança pelo uso da água, uma realidade na bacia do rio Paraíba do Sul (MG, RJ e SP) e nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (SP e MG) (ANA, 2007), admite-se que toda metodologia que possa subsidiar a economia e incentivar a preservação dos recursos hídricos deve ser estabelecida, além de representar uma valiosa contribuição para diferentes campos do conhecimento científico, e grande importância nas aplicações meteorológicas e hidrológicas.

Atribui-se a Hesíodo, que viveu em 800 a. C., na era pré-filosófica, o primeiro relato sobre evaporação que se tem notícia, por meio da observação natural da formação de névoa em fazendas, inclusive insinuando que a evaporação era uma consequência do vento. Evidências apontam para Tales de Mileto (século VI a. C.) como autor das primeiras observações em torno da evaporação, mas os primeiros

relatos escritos são atribuídos a Anaximander (565 a. C.), que cita que a evaporação é causa e não consequência do vento (BRUTSAERT, 1988).

Os séculos XVII e XVIII são marcados pelas primeiras medidas e experimentos relacionados à evaporação. Descartes (século XVII) foi o primeiro filósofo natural a romper com os conceitos de Aristóteles e o primeiro experimento relatado é atribuído a Perrault em 1733 (BRUTSAERT, 1988).

Em 1802, Dalton publicou, indiscutivelmente, a maior contribuição para o desenvolvimento da teoria atual sobre a evaporação. O autor conseguiu resumir o consenso de alguns cientistas do final do século XVIII, explicando que alguns fluídos evaporam mais rapidamente que outros; que a quantidade evaporada é diretamente proporcional a superfície exposta; o acréscimo de temperatura no líquido é visto como acréscimo da evaporação; a evaporação é maior quando existe corrente de ar do que quando este está parado; e ainda que, a evaporação da água é maior quanto menor for a umidade existente previamente na atmosfera.

Em 1948, Howard Penman, desenvolveu no Reino Unido, uma equação clássica e muito usada até os dias atuais, que descreve a evaporação de uma superfície de água livremente exposta à atmosfera. Para tanto são necessários dados médios diários de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, para prever a evaporação, integrando conjuntamente o efeito energético e aerodinâmico sobre esse fenômeno (PENMAN, 1948).

Embora o conjunto de condições atmosféricas seja o grande fator a determinar a evaporação de uma superfície de água livremente exposta, a evaporação efetiva depende de uma série de outros fatores, ligados à geometria do lago, grau de pureza e profundidade do corpo de água, estratificação térmica da água e condições de armazenamento de calor no corpo, de maneira que coeficientes empíricos são utilizados nos ajustes finais (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

O efeito individual de cada fator é muito variável, complicando o estudo teórico da perda de água de grandes corpos d'água. Muitas vezes desconsidera-se o efeito do armazenamento de calor, para corpos d'água poucos extensos e "rasos" (por exemplo, até 4 m de profundidade). Abdulai et al. (1990), indicam a possibilidade de se desprezar o termo de armazenamento. A falta de pureza da água é um fator extremamente

variável, embora Sartori (2000) sugira que no caso de salinidade em concentrações até aquela máxima encontrada nos mares, o efeito não é significativo. Entretanto, a presença de impurezas na superfície líquida pode afetar o balanço de energia radiante. As dificuldades que isso impõe no tratamento teórico da evaporação e o grau de empirismo que acaba sendo utilizado tem levado os autores muitas vezes a usar diretamente coeficientes de ajustes de evaporação de tanques, tomando o de 20 m² como referência, ou a usar diretamente modelos determinísticos, que embora também sejam aproximativos, tornam-se ferramentas úteis no estudo da evaporação (BRUTSAERT; YEH, 1970; LEITÃO; OLIVEIRA; LEITÃO, 2007).

Ao se trabalhar com evaporação de corpos naturais d'água, é importante ter em mente denominações ligadas a esse processo, devido aos múltiplos fatores que o afetam. Define-se evaporação potencial como a lâmina de água evaporada por uma extensa superfície de água pura, livremente exposta às condições atmosféricas reinantes (TUBELIS; NASCIMENTO, 1981), sendo condicionada basicamente pelas variáveis meteorológicas que a afetam. O fato de se assumir como uma superfície extensa é para minimizar efeitos do transporte advectivo de calor, que contribui para a perda de água. Evaporação de lago é a lâmina de água evaporada por uma superfície de água de grandes dimensões, livremente exposta às condições atmosféricas reinantes (TUBELIS; NASCIMENTO, 1981).

Como é comum o uso de evaporímetros, o termo “evaporação de tanque” é usado para especificar a perda de água desses dispositivos de medida. Sendo o tanque de 20 m² um padrão de medidas de evaporação e considerando-se que representa bem a evaporação de uma superfície extensa de água livremente exposta à atmosfera, às vezes sua perda de água é assumida como sendo correspondente à evaporação potencial, como ocorreu no trabalho de Oliveira (1971).

2.2 Uso de evaporímetros na determinação da evaporação de superfícies de água livremente exposta à atmosfera

2.2.1 Tipos de tanques e sistemas de medida

Segundo Volpe e Oliveira (2003), a medida direta da evaporação da água exige a utilização de um reservatório, onde o nível da água possa ser medido com precisão. Em virtude da facilidade de se medir a evaporação em tanques, esta tem sido utilizada para estimar a evaporação de lagos e de culturas. Admite-se, desse modo, que existe correlação positiva entre a evaporação d'água do tanque e aquela do lago ou da superfície vegetada.

Os tanques, em associação com outros instrumentos meteorológicos, têm produzido uma enorme quantidade de dados, os quais são usados na determinação da evaporação de lagos (WMO, 1971) e na determinação da evapotranspiração de culturas (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998).

Pesquisas têm sido realizadas procurando relacionar a evaporação de tanques e a evaporação de lagos. Uma aproximação simples consiste no uso de um coeficiente de tanque, definido como a razão entre a evaporação do lago, ou de um tanque com diâmetro igual ou superior a 3,60 m, e a evaporação do tanque. Esse coeficiente, logicamente, deve ser apropriado para cada tanque e para determinada condição de clima, uma vez que a capacidade de armazenar energia dos tanques é menor que a dos lagos, assim como a exposição, a dimensão e o material de confecção conferem a cada tanque evaporação diferenciada (VOLPE; OLIVEIRA, 2003).

Existem vários tipos de tanques de evaporação; alguns instalados à superfície do solo, outros enterrados, variando também em suas dimensões e no material de construção. Os três tipos mais difundidos no mundo são: o Classe A (USWB) com diâmetro de 1,21 m e profundidade de 0,254 m, de paredes expostas e bastante utilizado no Ocidente; o GGI-3000 com área evaporante de 3000 cm² e profundidade entre 0,60 m e 0,68 m, e o tanque de 20 m² de superfície evaporante e profundidade de 2,0 m, ambos com as paredes enterradas, são mais utilizados no leste da Europa (GANGOPADHYAYA et al., 1966). Mas, outros tanques de pequenas dimensões têm

sido utilizados, como o enterrado tipo “Colorado” e o tipo Young, ambos com paredes enterradas. Uma alternativa que se usa é colocar uma tela nos evaporímetros, o que modifica suas características, afetando a evaporação (HOUNAN, 1973).

Os trabalhos experimentais sobre comparações da evaporação observada em pequenos tanques com a de grandes reservatórios tiveram início depois que Dalton, em princípios do século XIX, enunciou a lei fundamental da evaporação que ocorre em uma superfície de água livre. Tomlinson, 1894 apud Oliveira (1971), ao fazer uma das primeiras séries de comparação desse tipo, observou que a evaporação medida em superfícies de água livre decresce com a área de acordo com uma determinada proporcionalidade.

Sleight (1917), em Denver, Colorado, confrontou evaporação de tanques enterrados, com 0,90 m de profundidade e diâmetros variáveis de 0,30 m a 3,60 m, com a de um lago de 720 ha, chegando à conclusão que a evaporação do tanque de 3,60 m seria a mesma registrada em um lago. Com base nessa informação, conduziu trabalhos e estabeleceu o fator 0,70 para relacionar a evaporação que ocorre em um tanque de 1,20 m de diâmetro por 0,25 m de profundidade e instalado acima do solo (que mais tarde seria denominado Classe A), com a de um tanque de 3,60 m de diâmetro.

White (1932), por meio de comparações conduzidas durante dois anos em Mildford, Utah, obteve para o tanque Classe A o fator 0,67 para transformar a evaporação registrada na evaporação do tanque de 3,60 m. Observa-se que este valor é um pouco mais baixo que o fator 0,70 estabelecido por Sleight (1917), em Denver.

Mais tarde, Young (1947), promoveu comparações da evaporação do tanque Classe A com a do tanque de referência de 3,60 m, em Fullerton na Califórnia e a do lago Elsinore também na Califórnia, encontrando para esses locais um mesmo fator 0,77 de conversão.

Olivier (1971), baseando-se na suposição de que sejam comparáveis os tanques e suas exposições nos poucos experimentos até então realizados, construiu com os dados disponíveis um gráfico comum, a fim de mostrar a variação da evaporação com o diâmetro do tanque. As relações de evaporação foram estabelecidas tomando como unidade um lago de 720 ha. A partir da curva obtida, pode verificar que para o tanque de 3,60 m de diâmetro a relação foi da ordem de 1,1 e foi considerada

suficientemente segura para os cálculos da evaporação em extensas superfícies de água. Concluiu citando que novas comparações fossem efetuadas, principalmente, com diâmetros maiores.

Em 1965, a WMO recomendou como referência para estudos comparativos com evaporímetros, que todos os países membros da organização adotassem como padrão um tanque enterrado de 20 m² de superfície (5 m de diâmetro e 2 m de profundidade), a fim de fornecer as bases necessárias para a escolha de um evaporímetro universalmente aceito.

É na União Soviética que surgem as primeiras referências sobre comparações entre o tanque Classe A e o tanque recomendado pela WMO, nos períodos de 1949-1953 e 1958-1963.

Segundo Villa Nova, Sentelhas e Pereira (2005), um dos problemas pertinentes a utilização dos tanques é a determinação da medida exata da lâmina evaporada. Para este fim, via de regra utiliza-se um parafuso micrométrico associado a um poço tranquilizador, mas este sistema de medida tem inconvenientes, tais como a capacidade do observador de utilizar um nônio e também de visualizar com perfeição o ponto de contato do micrômetro com a água. Na prática, na falta destes requisitos pessoais, frequentemente se cometem erros de considerável expressão na leitura dos dados de evaporação de água em evaporímetros empregados em estações agrometeorológicas, tanto convencionais (EMC) como também automatizadas (EMA).

Para superar tal problema, diversos sistemas automáticos de medidas de evaporação de tanques foram desenvolvidos nas últimas décadas. Sensores automáticos das medidas são usados, como o que emprega um transdutor diferencial variável linear – LVTD, ligado a uma bóia (PHENE; CAMPBELL, 1975), que sofreu adaptações posteriores para aumentar o tempo de operação e a resolução das medidas (BLOEMEN, 1978, van HAVEREN, 1982). Ambrus et al. (1981) desenvolveram um sensor com mecanismo eletro-magnético, que controla a operação de válvulas que repõem a água evaporada. Chow (1994) desenvolveu sistema eletrônico mais complexo, que permitia a medida automática simultânea tanto da evaporação quanto da chuva.

Amorim Neto (1981), elaborou e testou com bons resultados um sistema de medida no qual se completava o volume de água evaporado através de um tanque complementar acoplado a um sistema de nível constante com válvula e bóia. Com esse sistema, o operador lê apenas uma escala comum com precisão de 0,05 mm por milímetro de leitura e permite medidas com boa aproximação em dias de chuva. Assim, nota-se que uma das vantagens dos sistemas que usam o princípio elétrico em relação aos sistemas mecânicos é a aquisição automática por “dataloggers” e o tratamento totalmente informatizado dos dados.

Villa Nova, Sentelhas e Pereira (2005), desenvolveram um novo sistema de medidas diárias que, acoplado a um tanque Classe A padrão, tem vantagem de não necessitar válvula de bóia para reabastecimento do tanque de evaporação propriamente dito, além do que, sendo o tanque medidor também um pluviômetro, permite a leitura em condições de dias com chuvas de intensidade da ordem de grandeza da evapotranspiração e a confecção de um balanço hídrico simples, sem leituras pluviométricas e com exatidão idêntica a de um evapotranspirômetro de nível de lençol freático constante, ainda muito empregado para avaliação de consumo de água das culturas.

Comparações preliminares feitas por Schwingel et al. (2001), também no município de Piracicaba, SP, em tanques Classe A, indicaram boa concordância entre as medidas com um sensor automático e as com parafuso micrométrico, percebendo-se uma tendência de pequena superestimativa por parte do primeiro. Entretanto, o número de dias de medidas perdidos por problemas no mecanismo automático foi maior do que com o uso de medidas de observação com o parafuso micrométrico e o desempenho do medidor automático do tipo utilizado necessita cuidados frequentes para que as medidas sejam confiáveis.

2.2.2 Uso e comparação de tanques para estimativa da evaporação de superfícies extensas de água livremente expostas à atmosfera

Provavelmente, o método mais comum de estimativa de evaporação de grandes superfícies de água, como lagos e represas, é o uso de coeficientes associando a perda evaporativa desses corpos com a de tanques evaporimétricos (GANGOPADHYAYA et al. 1966; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). O maior problema desse tipo de procedimento é que os coeficientes são dependentes do tipo de tanque e da sua exposição em relação ambiente, podendo, neste caso, serem encontradas as seguintes condições de instalação (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997): a) tanque flutuante sobre o lago; b) tanque instalado nos limites da borda do lago (em terra, mas sob influência da presença do lago); c) instalado nas vizinhanças do lago, mas afastado o suficiente para não ser influenciado pelo lago; d) instalado em ambiente terrestre, sem lago, a partir do que são feitas projeções de evaporação em reservatórios e lagos futuros.

Outro aspecto a ser considerado é que tais coeficientes são dependentes da extensão da superfície e da profundidade do corpo d'água, bem como das condições de cobertura de superfície no entorno deste. Quanto a extensão de lagos, eles são classificados como pequenos quando a área é menor que 5 km^2 , grandes quando tem superfícies maiores que 40 km^2 e médios entre esses limites (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). Esses autores apresentam tabelas de valores de coeficientes que ajustam as relações de evaporação do tanque de 20 m^2 e de lago com a profundidade e extensão deste, além do tipo de cobertura na qual o tanque se localiza (floresta; transição floresta-estepe; estepe; região semi-árida; deserto). Os valores de coeficiente de profundidade variam do valor unitário para profundidades pequenas (até 2 m no caso de reservatórios pequenos) a 0,88 para profundidades de 25 m em grandes reservatórios.

Como já informado, os evaporímetros mais usados nesse tipo de determinação são os tanques de 20 m^2 , o Classe A e o GGI-3000, sendo o segundo deles provavelmente o mais utilizado. Tem havido uma preocupação em se determinar relações entre esses tipos de tanques, para uma tentativa de comparação de

resultados, visto que a utilização dos tanques menores é mais prática do que de 20 m². Mesmo antes desse evaporímetro ser adotado como um padrão, comparações entre os outros tipos de tanques, enterrados ou não, foram realizadas nos Estados Unidos (ROHWER, 1931, 1934; WHITE, 1932; YOUNG, 1945, 1947), em alguns deles já com uso do tanque Classe A. Nas décadas de 1940, 1950 e 1960, esse tipo de trabalho foi ampliado no mundo todo, inclusive com a introdução na União Soviética do tanque de 20 m² (OLIVEIRA, 1971).

O coeficiente de ajuste da evaporação do tanque de 20 m² ao Classe A tem sido assumido muitas vezes com valores fixo, por exemplo, igual a 0,66, mas frequentemente é aproximado para 0,7. Este coeficiente também pode ser estimado usando-se diversas equações propostas, como, por exemplo, a dependente da umidade do ar, da velocidade do vento e bordadura do tanque Classe A proposta por Snyder (1992), tendo esse método apresentado o melhor desempenho entre seis métodos na região do Cariri e do Sertão da Paraíba (LEITÃO; OLIVEIRA; LEITÃO, 2007). Como os coeficientes de tanque no trabalho de Snyder são dependentes da umidade do ar, da velocidade do vento e da bordadura do tanque, o emprego da equação de Snyder não precisa ficar restrita aos coeficientes específicos para um local, configurando-se também como um método meteorológico.

Hounan (1973) apresenta coeficientes de relação entre a evaporação do tanque Classe A e 10 tipos de evaporímetros obtidos em várias regiões do mundo. Especificamente para a relação entre a evaporação do Classe A em relação a do tanque de 20 m², esse autor cita valores entre 0,75 e 0,68 para duas regiões da antiga União Soviética, no período de maio a outubro, mas para uma região da Índia foram encontrados valores mensais da relação variando de 0,71 a 0,92, com média de 0,82, indicando a grande variação encontrada no coeficiente em função das condições climáticas das regiões.

Fu et al. (2004), estudaram coeficientes de tanques para conversão de água evaporada em superfícies livremente expostas a atmosfera, baseado em 6 anos de evaporação do Rio Nansihu, na China, utilizando 14 tipos de tanques diferentes. Entre algumas de suas conclusões, observaram que o coeficiente encontrado depende do tipo de tanque, em razão do modo de instalação, estruturas, e sua composição. O

tanque de 20 cm de diâmetro apresentou coeficiente médio anual de 0,6 e o tanque de 100 m² apresentou evaporação praticamente igual ao tanque de 20 m².

Oliveira (1971) obteve resultados comparativos de determinações de evaporação de julho de 1968 a junho de 1969, em Piracicaba, SP, com os seguintes evaporímetros: 20 m², Classe A tanto no modelo original, quanto modificado (um com tela protetora contra animais e outro enterrado) e GGI-3000 (original, com tela e exposto). Foram obtidos fatores mensais de relação entre a evaporação do tanque de 20 m² e os demais evaporímetros, sendo que considerados os valores médios anuais da razão entre a evaporação do tanque de 20 m² (E20) e cada um dos outros tanques, verificou-se ser 0,76 para o Classe A original, 0,80 para o com tela e 1,02 o enterrado, 0,95 e 1,02 para o GGI-3000 sem e com tela, sendo que para esse tanque exposto o fator de relação foi 0,59, ou seja, tanto os GGI-3000, com e sem proteção, quanto o Classe A enterrado, mostraram valores próximos do tanque de 20 m², embora em alguns meses do ano uma variação de 0,88 a 1,17 tenha sido verificada, sendo que em março, junho e dezembro não houve correlação linear significativa entre o de 20 m² e o tanque Classe A.

Volpe, André e Valarelli (1983), com série de dados num período de dez anos, compararam a evaporação dos tanques Classe A, GGI-3000, “Screened Sunken “ (Young) e de 20 m². Volpe e Oliveira (2003) repetiram o estudo para uma série temporal mais longa e concluíram que a evaporação medida nos tanques Classe A, GGI-3000 e Young foram superiores à evaporação medida no tanque de 20 m², em todos os meses do ano, sendo maior no tanque Classe A, e pouco diferindo entre os outros dois. A relação média de todos os meses do tanque de 20 m² para os demais foram 0,75 para o Classe A, 0,85 para o GGI-3000 e 0,84 para o enterrado com tela (“screened sunken”), tendo os autores verificado que a regressão linear entre a evaporação dos tanques foi significativa praticamente em todos os meses, mas, com baixos valores.

Oliveira (2003), trabalhando no semi-árido Nordeste (Cariri e Sertão), usando diferentes tipos de tanques evaporimétricos, com a finalidade de determinar o mais adequado e viável processo de medida, observou que devido a sua exposição e constituição metálica, o tanque Classe A foi muito mais influenciado pelas condições climáticas, indicando superestimativa na evaporação em comparação com o tanque

padrão (20 m^2). No entanto, ao ser corrigido pelo fator tradicionalmente adotado de 0,70, o tanque Classe A, subestimou a evaporação observada no tanque padrão durante todo o período estudado, produzindo, particularmente, no período frio e úmido, erros ainda mais acentuados. Com o uso de tanques tubulares de cimento, a obtenção de medidas da evaporação foram muito mais precisas do que com o tanque Classe A. Ao contrário do Classe A, que apresentou coeficientes de tanque (K_p) com significativas variações (0,93 a 0,76), entre os períodos frio e quente, estes tanques mostraram pequenas variações de coeficiente (1,00 a 0,93).

2.3 Estimativa da evaporação de superfície de água livremente exposta à atmosfera por métodos meteorológicos

A estimativa da evaporação de superfícies de água livremente exposta à atmosfera a partir dos dados de evaporímetros é bastante empírica, com variação espacial e temporal dos coeficientes de ajuste, sendo mais aplicáveis à corpos d' água pequenos ou médios, do que para corpos grandes e para valores que não os diários. Uma alternativa é a estimativa por modelos baseados em balanço de energia, balanço de água, aerodinâmicos e combinados (BURMAN; POCHOP, 1994; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997). Como já descrito, os baseados somente em balanço de água tem problemas metodológicos, de modo que os baseados em balanço de energia, os aerodinâmicos e os combinados são mais utilizados, existindo uma série de métodos desses tipos que empregam variáveis meteorológicas, muitos deles derivados de um método ou de uma equação que servem de raiz a eles, como acontece com as equações de Dalton e de Penman.

Outro aspecto a ser considerado é que nesses métodos, normalmente são usados dados meteorológicos/climatológicos observados em ambientes terrestres ou no próprio ambiente do corpo de água, conforme descrito no item anterior. Morton (1983) comenta que há vários problemas associados com o uso de dados observados em ambientes terrestres na estimativa operacional da evaporação de lagos. O primeiro é que nas mudanças sazonais o calor armazenado na subsuperfície não são refletidas diretamente em tanques de evaporação ou em dados climatológicos, e que tais

mudanças são significativas na determinação de variações sazonais da evaporação de lagos profundos. No entanto, o mesmo autor relata que este problema não é tão importante, porque estimativas anuais são adequadas para o planejamento e gerenciamento da água ou estudos de impactos ambientais. Alerta, também, que o mais sério problema é que tanques e dados climatológicos são influenciados significativamente por mudanças na disponibilidade de água para evaporação da superfície de solo adjacente e não são representativos de ambiente sobre lagos.

Em se tratando de reservatórios de água, lagos e córregos, a estimativa da evaporação é importante no manejo dos recursos hídricos, mas o desenvolvimento de métodos confiáveis para estimativa da evaporação em lagos, baseados em informações climatológicas de fácil obtenção, ainda é um desafio. A maioria dos métodos atualmente disponíveis estima a evaporação a partir de observações de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar (ROQUE; SANSIGOLO, 2001).

A primeira equação para estimativa da evaporação de água de uma superfície líquida, foi proposta por Dalton, 1802 apud Gangopadhyaya et al. (1966), em função da diferença de pressão parcial de vapor na temperatura da superfície líquida (e_o) e a medida no ar (e_a) e de um coeficiente de ajuste K, que é também função da velocidade do vento, ou seja:

$$E = K(e_o - e_a) \quad (1)$$

Várias outras equações baseadas na equação de Dalton, com ajuste do coeficiente K, foram propostas. Gangopadhyaya et al. (1966) e Hounam (1973) apresentam um modelo de transferência de massa com base na equação de Dalton, no qual os elementos climáticos, inclusive a velocidade do vento, são obtidos a 2 m da superfície da água do reservatório.

São comuns formulações empíricas ou semi-empíricas, não só para determinar os diferentes coeficientes para os modelos teóricos, como também para obtenção indireta de determinados termos (parametrização) dos modelos evaporimétricos para lagos (OLIVEIRA, 2003).

Penman (1948) apresentou um modelo que considera a combinação da evaporação da água livre devido à radiação solar como fonte de energia e de um componente aerodinâmico. Para se utilizar a equação de Penman, é necessário a disponibilidade de dados de temperatura, radiação, umidade e vento, que não raro, não estão disponíveis (BURMAN; POCHOP, 1994). Normalmente, a dificuldade de disponibilidade de informações climáticas para o modelo de Penman tem se constituído em limitação à sua utilização. Daí, a motivação de muitos autores para estudarem a simplificação do modelo ou para introduzirem correções em aproximações. São exemplos de equações simplificadas: Kohler, Nordenson e Fox (1955), Kohler e Parmele (1967), Linacre (1967a, 1993), Priestley e Taylor (1972), Stewart e Rouse (1976) e De Bruin (1978).

Kohler, Nordenson e Fox (1955), Kohler e Parmele (1967), apresentaram uma equação para estimativa da evaporação de água em lagos que é uma adaptação do modelo de Penman, com base em observações feitas por eles em condições de campo. Além de utilizarem medições de vento a 4 m acima da superfície, introduziram uma correção positiva para o coeficiente psicrométrico (γ) que segundo os autores permite compensar o erro decorrente de se considerar a igualdade de temperatura do ar (usada nos cálculos) e a temperatura real da superfície líquida.

Priestley e Taylor (1972) descreveram a evaporação utilizando o conceito de equilíbrio de condições, isto é, quando o ar em contacto com a superfície úmida é saturado em vapor. Sob estas condições, a energia radiante determina a taxa de evaporação, e o termo aerodinâmico da equação de Penman torna-se zero, reduzindo a equação apenas ao termo energético. Para tanto, introduziram um coeficiente empírico para adotar que as condições atmosféricas estejam em equilíbrio, cujos valores tem sido determinados em vários locais do mundo e sob diferentes condições de superfícies evaporantes, sendo um valor médio de 1,26 na escala mensal tem sido admitido para estimar a evapotranspiração potencial (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997) e inclusive a evaporação potencial. Vários autores discutem os valores e o significado desse coeficiente (PEREIRA; VILLA NOVA, 1992; VILLA NOVA; PEREIRA, 2006).

Stewart e Rouse (1976), modificaram a fórmula de Priestley-Taylor para cálculo de evaporação de um lago raso eliminando o fluxo de calor da subsuperfície e

substituindo o saldo de radiação por uma relação linear com a radiação solar incidente. O fluxo de calor na subsuperfície foi eliminado por considerar períodos mais longos (de duas semanas a um mês) quando esse termo se aproxima de zero, conseguindo obter valores estimativos para vários lagos dentro de um erro de 10% no período de tempo acima citado.

Ikebuchi et al. (1988), propuseram uma equação para estimar a evaporação em lagos, baseada em medidas de temperatura da superfície d'água e a 6m acima da superfície do lago para determinar a umidade específica do ar nesses níveis de medida, que multiplicada pela velocidade do vento a 6 m e pelo coeficiente de transferência de massa permite o cálculo direto da evaporação diária em milímetros.

Pelo modelo de Morton (1983a,b), que estima a evapotranspiração complementar (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration - CRAE), pode ser calculada a evapotranspiração real ou regional de uma grande área ou, mesmo a evaporação de um lago pelo modelo designado simplificadamente como CRLE (Complementary Relationship Lake Evaporation). O modelo está fundamentado no conceito de que existe relação complementar entre a evaporação potencial (E_p) e a real referente a uma grande área (E_a), que é função da disponibilidade de água no ambiente para a evaporação, de maneira que E_a pode ser baseada nas respostas complementares da evaporação, ou seja, $E_a + E_p = 2 E_w$, sendo E_w a evapo(transpi)ração da área no ambiente úmido, no momento que ela se iguala à evaporação potencial. O trabalho de NASH (1989) faz uma boa análise teórica das diferenças desse modelo com o de Penman.

Linacre (1993) propôs uma equação simplificada da fórmula de Penman (1948) que utiliza dados de temperatura, radiação e velocidade do vento, para a estimativa da evaporação de água em lagos.

Métodos micrometeorológicos, como o de balanço de energia-razão de Bowen, o aerodinâmico e o de correlação de turbilhões têm sido usados para estimativa da evaporação de superfície de água livremente exposta à atmosfera, tanto em escala temporal pequena (horária, por exemplo), como para escalas diárias ou maiores.

No método de balanço de energia o saldo de radiação (R_n) é considerado como repartido entre calor sensível (H), calor latente (LE), calor no fundo do corpo de água

(G) e a taxa de variação de entalpia do corpo de água (D), equivalente à variação de armazenamento de calor, dependente inclusive da massa de água. Pode ocorrer advecção por fluxos de entrada e saída de massa de água no lago, mas tanto esses fluxos como G são considerados desprezíveis, levando a uma equação reduzida de balanço de energia desprezando-se esses dois componentes, advecção e G (SIMON; MERO, 1985; REIS; DIAS, 1998). Advecção atmosférica pode também contribuir para o aporte de calor e contribuir para o balanço de energia, mas, normalmente, quando se trabalha com corpos de água grandes, esses aportes se tornam, também, desprezíveis. Já o valor de D é difícil de ser determinado em escalas pequenas (horárias ou menores), contribuindo para grandes erros de medida ao acaso, o que pode ser minimizado quando se aumenta a escala de tempo.

Tanto o método do balanço de energia-razão de Bowen, como o de correlação de turbilhões foram usados em conjunto para entendimento do mecanismo de evaporação em um lago nos Estados Unidos (AMAYREH, 1995), levando à conclusão de que pelo menos para esse lago grande quantidade de energia foi consumida para aquecimento do corpo de água, o que levou à evaporação noturna quase na mesma taxa de evaporação diurna. O autor concluiu que equações do tipo Penman podem estimar acuradamente a evaporação do lago, desde que o saldo de radiação, armazenamento de calor e efeito aerodinâmico sejam apropriadamente avaliados, quanto a refletirem as condições sobre o lago e que outros métodos podem levar a erros inaceitáveis.

Há muitos trabalhos de comparação de métodos de base meteorológica para estimativa de evaporação de superfícies de água livre, podendo citar o de Delcalux e Coudrain (2005) para o lago Titicaca nos Andes, de Sadek, Shahin e Stigter (1997) para a represa de Assuan no Egito, de Mosner e Aulenbach (2003) no lago Seminole e de Abtew (2001) no lago Okeechobee, ambos na Flórida, e de Vardavas e Fountoulakis (1996) em quatro lagos em diferentes regiões climáticas da Austrália. Esses trabalhos envolveram desde lagos pouco extensos até aqueles com milhares de Km^2 , profundos ou rasos, a maioria com medidas em escala mensal. No trabalho de Abtew (2001), concluiu-se que os seis modelos de base meteorológica usados permitiram boas estimativas, sendo que o modelo de transferência de massa que exige diferença de

pressão de vapor e velocidade do vento foi o menos adaptado aos lagos tropicais, necessitando a determinação de um coeficiente de transferência específico para cada lago, sendo que os métodos de Penman e o de Priestley-Taylor superestimaram consistentemente a evaporação em relação aos modelos de balanço de energia. O autor concluiu que os métodos permitiram boa estimativa diária com base em estações meteorológicas sobre o lago.

Rosenberry et al. (2007) compararam 15 métodos de evaporação em um pequeno lago no nordeste dos Estados Unidos, adotando o método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB) como o padrão. Os métodos de Priestley-Taylor, de Bruin-Keijman e de Penman foram os mais comparáveis com o BERB, com erros médios entre 0,19 e 0,27 mm dia⁻¹.

Vários trabalhos de estimativa de evaporação e superfície de água livremente exposta à atmosfera por métodos de base meteorológica no Brasil têm sido realizados. Reis e Dias (1998) compararam estimativas pelo balanço de energia-razão de Bowen e pelo método de Morton (CLRE) num reservatório no estado de Minas Gerais (extensão de 8,8 km²), trabalhando tanto em escala horária como em escalas temporais maiores. Concluíram que: o uso da razão de Bowen calculada tanto a partir de valores médios diários ou mensais de temperatura e umidade do ar, resultaram em valores essencialmente iguais; que a equação de Priestley-Taylor assumida como válida para escalas iguais ou superiores a uma hora teve um desempenho muito bom, embora exija intensivas medidas de temperatura da água para tal; e que o CLRE exige melhoria na estimativa das taxas de variação da entalpia armazenada.

Roque e Sansigolo (2001) compararam as estimativas mensais de evaporação do lago de Taquaruçu (SP) calculadas com o modelo conceitual CRLE com as obtidas pelo método do tanque Classe A, no período de 1976 a 1997. Concluíram que o modelo de Morton superou as estimativas feitas pelo tanque Classe A, no caso dos valores de evaporação abaixo da média mensal, e subestimou aqueles acima da média. Considerando todas as estimativas realizadas, as medidas do tanque Classe A foram, em média, 14% superiores em relação às estimativas de evaporação pelo modelo de Morton.

Leitão, Oliveira e Leitão (2007), avaliando o desempenho dos métodos de Penman, (1948), Linacre (1993), Snyder (1992), Kohler, Nordenson e Fox (1955), Gangopahyaya et al. (1966) e do balanço de energia para duas regiões da Paraíba, indicaram que os métodos de estimativa de evaporação que utilizam a umidade relativa do ar, velocidade do vento e a radiação solar, apresentaram as melhores concordâncias com as medidas de evaporação do tanque de 20 m².

O método de Penman (1948) foi utilizado por Villa Nova (1967) para estimativa da evaporação potencial (EP) média mensal de vinte e quatro municípios do Estado de São Paulo. Em comparação com valores de evaporação do tanque Classe A (ECA) e da evaporação potencial estimada pelo método de Penman, esse autor encontrou para uma série de 6 anos, valores médios de EP/ECA variáveis entre 0,74 e 0,77, com média de 0,76 em julho, agosto e setembro, e entre 0,84 e 0,99 (média 0,92) nos outros meses.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Locais

Os dados utilizados fazem parte de série de observações realizadas em Piracicaba, SP, de julho de 1999 a dezembro de 2007, na Estação Agrometeorológica do Campus "Luiz de Queiroz" (Figura 1), da Universidade de São Paulo (latitude: 22 42' 11" S, longitude: 47 37' 17" W e altitude: 567 m) e de julho de 1999 a dezembro de 2001 em um pequeno lago artificial (latitude: 22 42' 45" S, longitude: 47 37' 54" W e altitude: 557 m), situado a 3,5 km da Estação.

Figura 1 - Estação Agrometeorológica do Campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP: a) Vista aérea (Fonte: Google Earth). b) Vista parcial com os tanques Classe A em primeiro plano e o de 20 m² ao fundo

O lago, de formato irregular (Figura 2), tem superfície de 0,78 ha, com a maior dimensão no sentido N-S de 110 m, com a borda a uma distância mínima de cerca de 40 m a oeste do Pavilhão de Engenharia no Campus da ESALQ, sendo que em parte a sua borda confronta-se com árvores de grande porte. A sua profundidade é variável (0,305 m na borda e 1,285 m no seu centro), sendo revestido no fundo e nas laterais com concreto. Esse pequeno lago, na verdade um grande tanque com finalidade ornamental, de recreação e, eventualmente, usado para pequenas irrigações do gramado em seu entorno, é alimentado periodicamente por uma tubulação e quando a

alimentação ocorria, durava, normalmente, três dias, os quais foram descartados das análises.

Figura 2 – Lago artificial em frente ao Pavilhão de Engenharia, Departamento de Ciências Exatas do Campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP. a) Vista aérea, b) Vista frontal. (Fonte: Google Earth)

Foi utilizada, também, uma série de dados da Estação Agroclimatológica do Campus de Jaboticabal (UNESP), cujas coordenadas geográficas são: 21° 14' 05" S, 48° 17' 09" W e altitude de 615 m (Figura 3).

De acordo com a classificação de Koeppen, a região de Piracicaba apresenta um clima tropical de altitude (Cwa) com temperatura média anual de 20,9 °C (mês mais quente, janeiro, com média de 24,4 °C e o mais frio, julho, com 17,7 °C). As chuvas ocorrem com predominância no verão e a seca no inverno, totalizando no ano 1276,5 mm no ano, com mês mais úmido (janeiro) de 230,3 mm. Já o clima de Jaboticabal é do tipo tropical chuvoso com inverno seco (Aw), com temperatura média anual de 22,2 °C, sendo o mês mais quente janeiro (25,0 °C) e o mais frio junho (19,4 °C), a precipitação pluviométrica anual é de 1424,6 mm, sendo dezembro o mês mais úmido (239,5 mm) e julho o mais seco (25,3 mm).

Figura 3 – Estação Agroclimatológica da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal: a) Vista aérea (Fonte: Google Earth). b) Tanques Classe A e de 20 m²

3.2 Medidas de evaporação e dos elementos meteorológicos

3.2.1 Evaporação

Os dados utilizados referem-se às leituras de evaporação d'água em um tanque de 20 m² e em três tanques Classe A, em Piracicaba (período de 1999 a 2007) e em Jaboticabal (período de 1997 a 2001) um tanque de 20 m² e um Classe A. Em cada tanque em Piracicaba (Figura 4), foi instalado um termopar de cobre-constantan dentro de um mini-abrigo de tubo de PVC branco (diâmetro de 254 mm), para proteção contra a incidência de radiação solar direta. No tanque Classe A, o termopar foi fixado a 0,10 m do fundo do tanque, aproximadamente na altura média da lâmina de água, em função da variação dessa lâmina com a evaporação. No tanque de 20 m² o termopar ficou a uma profundidade oscilante entre 0,08 m e 0,12 m, de acordo com a variação do nível d'água.

Figura 4 – Tanques evaporímetros: a) Tanque Classe A, em seu interior o poço tranquilizador com parafuso micrométrico e o mini-abrigo de tubo de PVC com termopar. b) Tanque de 20 m²

Em Piracicaba, as medidas em cada um desses tanques foram realizadas diariamente (segunda a sexta), às 7 h 30min, utilizando parafuso micrométrico em poço tranquilizador. Em cada tanque estava instalado, também, um sensor automático de nível de água Novalink Systems, para medidas contínuas. Os sinais dos sensores automáticos, tanto dos termopares para medida de temperatura da água como dos medidores de nível, foram registrados em um sistema de aquisição de dados Campbell CR10, com frequência de medidas a cada 10 segundos e médias calculadas e registradas a cada 15 minutos. Antes da instalação foram realizados procedimentos de calibração indicados pelos fabricantes dos sensores.

Na medida de evaporação, foram utilizados, prioritariamente dados obtidos com parafuso micrométrico, que, segundo Angelocci et al. (2001), se mostram mais consistentes e confiáveis do que os obtidos pelo sistema automático, os quais foram somente usados em situações excepcionais e depois devidamente filtrados. Em Jaboticabal, os dados evaporimétricos são obtidos com uso de parafuso micrométrico.

Em Piracicaba, os tanques Classe A são lavados uma vez por semana e no tanque de 20 m² é realizada limpeza periódica da sua superfície, com auxílio de produtos de decantação. Em Jaboticabal, o tanque Classe A, no período das chuvas é lavado semanalmente e no período da colheita da cultura da cana-de-açúcar naquela região, a limpeza é feita com maior frequência, sempre que se observa um acúmulo de fuligem sobre a água, já o tanque padrão passava por uma limpeza entre a borda e o nível da água e, também, próximo ao poço tranquilizador.

Os dados obtidos em Piracicaba foram filtrados para eliminar aqueles espúrios. No caso dos tanques Classe A, o uso de três repetições permitiu uma filtragem mais consistente. Quando o coeficiente de variação em relação à média foi menor do que 20%, foram calculadas as médias com os valores dos três tanques. Se maior, detectou-se na filtragem se um dos valores era muito discrepante em relação aos outros dois, sendo ele descartado e trabalhando-se com a média desses dois. Assim, todos os valores adotados nas análises foram aqueles representando médias de dois ou três tanques. Em Jaboticabal não havia repetição de tanques Classe A e a série apresentava falhas de medidas bem menores do que em Piracicaba, embora não se tivesse a mesma oportunidade de uma filtragem mais consistente.

No período de 16/05/2000 a 07/07/2001 foram realizadas medidas de evaporação no pequeno lago pelo uso de um sistema de parafuso micrométrico em poço tranquilizador instalado na borda do mesmo, com leitura as 7 h 30 min e 17 horas.

3.2.2 Observações meteorológicas

Na área da Estação Agrometeorológica do Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Figura 4), em Piracicaba, encontram-se instalados os seguintes sensores: piranômetro Li-Cor mod. LI-2000 até o ano de 2005 e, a partir desse ano, piranômetro Kipp & Zonen, mod. CM-3; saldo-radiômetro Kipp & Zonen mod. NR-lite, conjunto termo-higrométrico Vaisala HMP45C-L12, anemômetro Young modelo 12002 instalado 2,0 m acima da superfície, e pluviômetro de báscula; encontram-se instalados também equipamentos “convencionais” para medida da direção e velocidade do vento, a 10 m de altura e um heliógrafo, para medida de insolação. Eventualmente, nas falhas e dúvidas de dados da estação automática, foram utilizados dados dos equipamentos convencionais para substituição ou confirmação dos dados dos sensores automáticos. A aquisição de dados em “datalogger” Campbell CR-10 foi realizada a cada segundo, com médias armazenadas a cada 15 minutos.

Em Jaboticabal, na Estação Agroclimática, encontra-se instalada uma estação automática modelo Campbell com os seguintes sensores: termistor Vaisala, mod. HPM35E; piranômetro de fotodiodo de silício Kipp & Zonen, mod. PAR; piranômetro de

termopilhas Kipp & Zonen, mod. CM3; anemômetro a 2 m de altura Met-one, mod. 014AL34; sensor capacitivo para umidade Vaisala, mod. HPM35E, termopar tipo T (cobre-constantan). O registro de dados é feito em "datalogger" Campbell, mod. CR 10 a cada segundo, sendo as médias armazenadas a cada 15 minutos. Os equipamentos convencionais utilizados foram um pluviômetro modelo Ville de Paris e um heliógrafo Fuess modelo Campbell-Stokes.

No período de maio de 1999 a julho de 2001 foram instalados no centro da área do lago da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" os seguintes sensores: dois psicrômetros de termopar de cobre-constantan aspirados, em abrigo de PVC branco, em duas alturas acima da superfície da água (0,4 m e 1,0 m), conforme modelo descrito por Marin et al. (2001); um saldo-radiômetro REBS mod. Q7 (2,0 m acima da superfície); dois anemômetros Young, modelo 12002 (0,4 m e 1,0 m); três termopares de cobre-constantan para medida da temperatura da água, mantidos nas profundidades escolhidas (0,01 m; 0,40 m e 1,00 m) por intermédio de uma bóia na superfície do lago, de modo a acompanhar a oscilação do nível d'água. O termopar na menor profundidade inicialmente foi instalado a 0,05 m de profundidade, optando-se depois para a profundidade de 0,01 m. A aquisição dos sinais desses sensores foi realizada em "datalogger" Campbell CR 10 a cada segundo, sendo as médias armazenadas a cada 15 minutos.

3.3 Determinação das relações da evaporação dos tanques Classe A e de 20 m²

Foram determinadas as relações médias para cada mês entre as leituras do tanque Classe A e do tanque de 20 m², analisando-se as relações com valores diários e com valores médios de 2 dias.

Para estabelecimento das relações foi utilizada análise de regressão linear, bem como as relações diretas médias para cada mês (E20/ECA), com uso do teste F para a significância dos coeficientes de determinação.

3.4 Modelos meteorológicos para estimativa da evaporação de água livremente exposta à atmosfera

Foram feitas estimativas de evaporação diária por métodos de base meteorológica, parte deles com uso de medidas no centro do lago, parte com dados da estação meteorológica em Piracicaba e em Jaboticabal, descritos a seguir. Os métodos foram escolhidos com base no fato de que o de balanço de energia-razão de Bowen tem seus cálculos originários de dados coletados sobre a própria superfície líquida e em muitos trabalhos é considerado como método de referência, enquanto os outros métodos são comumente usados tendo por base medidas em ambientes fora da área de influência do lago (estações meteorológicas, por exemplo), constituindo-se em modificações do método de Penman ou do método baseado na equação de Dalton.

Portanto, os métodos de balanço de energia-razão de Bowen, de Penman, de Priestley-Taylor e de Penman simplificado tiveram seus cálculos realizados com dados obtidos no ambiente do lago, enquanto para os demais foram utilizados dados obtidos nas estações meteorológicas.

3.4.1 Método do balanço de energia-razão de Bowen

A determinação da evaporação da superfície de água livre (E_L) a partir do balanço de energia simplificado, desconsiderando-se o termo de variação de armazenamento de calor no intervalo de tempo de cálculo foi feita com medidas no lago no período de final de fevereiro a final de junho de 2001, pelo uso das equações:

$$E_L = \frac{R_n}{(1 + \beta)L} \quad (2)$$

em que:

E_L – evaporação do lago (mm dia^{-1});

R_n - radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

L - calor latente de evaporação (MJ Kg^{-1} , $L=595-0,5t$);

- razão de Bowen (relação entre fluxos de calor sensível e latente, H/LE).

A razão de Bowen (β) foi calculada por (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997):

$$\beta = \left[\frac{\Delta T_u}{(1-W)\Delta T_s} - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

em que:

ΔT_u - diferença de temperatura do bulbo úmido entre os níveis de medida (°C);

ΔT_s - diferença de temperatura do ar (bulbo seco) entre os níveis de medida (°C);

Os valores de W foram estimados pelas equações (VISHWANADHAM et al., 1991):

$$W = 0,407 + 0,0145 T_u \quad \text{se } 0 < T_u < 16 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_u \quad \text{se } 16,1 < T_u < 32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Os valores de diferença de temperaturas T_s e T_u (°C) foram obtidos a partir das medidas realizadas a 0,01 m de profundidade na água e nos níveis de 0,4 m e 1,0 m acima dessa superfície. Os cálculos foram feitos a intervalos de 15 minutos e integrados tanto no período diurno como de 24 horas, para fins comparativos. À medida que β se aproxima de -1, a eq. (2) torna-se indefinida e recomenda-se não utilizar valores entre -1,0 e -0,7 ou mesmo entre -1,0 e -0,5 (TANNER, 1960), sendo este último adotado. Quando ocorreu o descarte de um valor de β , ele foi substituído por um valor médio entre o valor antecedente e o subsequente na escala temporal. Esse critério foi usado para intervalos contínuos de perda do dado de até uma hora e quando esse intervalo foi maior, todas as medidas no dia foram descartadas.

Foram realizados cálculos integrados tanto para o período diário (24 horas) como para o período diurno, para fins de comparação, a partir dos cálculos a cada 15 minutos.

3.4.2 Método de Penman

Foi utilizado o modelo proposto por Penman (1948):

$$E_L = \frac{0,408 \left(\frac{s}{\gamma} \right) R_n + E_a}{\left(\frac{s}{\gamma} \right) + 1} \quad (6)$$

em que:

E_L – evaporação da superfície de água livremente exposta à atmosfera (mm dia^{-1})

R_n - saldo diário de radiação medido sobre a superfície de água livre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

s - coeficiente angular da curva de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

E_a - poder evaporante da superfície (mm dia^{-1}).

O valor de s foi calculado pela eq. (7):

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_{ar} + 237,3)^2} \quad (7)$$

em que:

e_s - pressão saturante de vapor na temperatura média do bulbo úmido e do bulbo seco (kPa);

T_{ar} – temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$).

Segundo Villa Nova et al. (2002), a proposta de Penman para cálculo de s é de se trabalhar com a média da temperatura do bulbo úmido e do bulbo seco, embora comumente se use somente a temperatura do ar (correspondente à do bulbo seco), por esse motivo, a título de comparação foram feitos cálculos de s pelas duas formas citadas. O valor médio diário de s foi determinado a partir dos cálculos a cada 15 minutos.

O termo aerodinâmico (E_a) foi calculado por:

$$E_a = f(U) \cdot (e_s - e_a) \quad (8)$$

em que:

U – velocidade do vento à 2,0 m de altura (km dia^{-1});

e_s – pressão de saturação do ar (mm Hg);

e_a – pressão atual de vapor do ar (mm Hg);

$f(U)$ – função do vento, dada por (DOORENBOS; PRUITT, 1977):

$$f(U) = 0,35 \cdot \left(0,5 + \frac{U}{160} \right) \quad (9)$$

No caso do lago, pela inexistência da medida de vento a 2,0 m de altura, foi adotada a medida a 1,0 m, sendo as possíveis conseqüências disso discutidas na apresentação e avaliação dos resultados. Nesse ambiente aquático, na determinação do déficit de saturação, para fins de comparação foram determinados os valores de e_s a partir da temperatura da superfície da água e a partir da temperatura do ar a 1,0m de altura. No uso desse método com dados de postos meteorológicos, adotou-se o critério de somente trabalhar com valores de temperatura de bulbo seco no cálculo de s . Os cálculos da evaporação diária foram realizados de duas formas, uma delas compreendendo o período diário (24 horas) e a outra com os dados do período diurno. Para o lago, os valores de s , de e_s e de e_a foram calculados a cada 15 minutos e feitas as médias para os períodos diário e diurno, sendo que o saldo de radiação foi integrado para cada período. Como a função de vento é empírica, com coeficientes propostos

para o vento acumulado diário, ela foi usada na sua forma original tanto para o período diurno como de 24 horas.

No caso de uso dos dados dos postos meteorológicos, foram usados somente cálculos para valores de 24 horas, uniformizando o critério de cálculo nessa escala de tempo para todos os métodos. Para Jaboticabal, pela inexistência na época de medidas de saldo de radiação sobre gramado, ela foi estimada de duas formas, para fins comparativos: a) pelo uso do balanço de ondas curtas calculado com um coeficiente de reflexão do gramado igual a 0,23, com o balanço de ondas longas estimado pela equação de Brunt; b) pelo uso dos coeficientes de estimativa do saldo de radiação diário propostos por Sentelhas e Nascimento (2003) a partir de irradiância solar global diária, que foram considerados aplicáveis para essa localidade.

3.4.3 Método de Priestley-Taylor

A equação usada foi (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972):

$$E_L = 1,26 \cdot W \cdot \left(\frac{R_n}{2,45} \right) \quad (10)$$

em que:

E_L – evaporação da superfície de água livremente exposta à atmosfera (mm dia^{-1}),

R_n - saldo de radiação determinado sobre o lago ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

Neste modelo os valores de W foram estimados pela eq. (11):

$$W = \frac{s}{(s + \gamma)} \quad (11)$$

em que:

γ – coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

s – declividade da curva de variação da pressão saturante de vapor e_s (kPa °C⁻¹).

O cálculo de s na determinação de W, como empregado no método de Penman, foi realizado de duas formas, com a temperatura média do ar e com a média das temperaturas do bulbo seco e do bulbo úmido.

A variação de armazenamento de calor no lago foi considerada desprezível.

3.4.4 Método de Penman simplificado

Villa Nova et al. (2006) propuseram uma simplificação do método de Penman para estimar a evapotranspiração potencial, que leva à equação:

$$ETP = \frac{(R_n - G)}{[2,45 \cdot (2 - W)]} \quad (12)$$

em que:

G - fluxo de calor no solo durante o período diurno (MJ m⁻² dia⁻¹);

R_n - saldo diurno de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹)

W - s/ , sendo s a declividade da curva de pressão saturante de vapor na temperatura do ar e o coeficiente psicrométrico.

Nas condições de evaporação de uma superfície extensa de água livremente exposta à atmosfera, o valor de G seria substituído pelo armazenamento de calor no lago, mas assumiu-se que ele é desprezível na escala diária, de modo que a eq. (12) transforma-se em:

$$E_L = \frac{R_n}{[2,45 \cdot (2 - W)]} \quad (13)$$

sendo E_L a evaporação do lago (mm dia⁻¹) e os demais termos possuem o mesmo significado da eq. (12). Esse método será denominado como de Penman-Villa Nova.

3.4.5 Método de transferência de massa baseado na equação de Dalton

Neste caso foi utilizada a equação apresentada por Gangopadhyaya et al.(1966):

$$E_L = K \cdot [1 + (1,07 \cdot U_2)] \cdot (e_o - e_a) \quad (14)$$

em que:

EL – evaporação da superfície de água livremente exposta à atmosfera (mm dia⁻¹);

U₂ – velocidade média diária do vento a 2,0 m de altura (m s⁻¹);

e_o – pressão média diária de vapor d'água na temperatura da superfície da água (hPa);

e_a - pressão média diária de vapor d' água a 2,0 m acima da superfície (hPa).

O coeficiente empírico de ajuste K (mm hPa⁻¹ dia⁻¹) foi adotado como 0,15, conforme proposto para pequenos corpos d'água. Os valores de e_o e e_a médios diários foram calculados a partir dos valores médios obtidos a cada 15 minutos. A pressão de vapor na temperatura da água foi obtida pela medida desta última no tanque de 20 m², conforme descrito no item 3.2.1.

3.4.6 Método de Linacre

A equação usada foi (LINACRE, 1993):

$$E_L = 0,015 + (0,00042 \cdot T) + (10^{-6} \cdot Z) \cdot [(0,8 \cdot R_s) - 40] + [2,5 \cdot F \cdot U \cdot (T - T_d)] \quad (15)$$

em que:

EL – evaporação da superfície de água livremente exposta à atmosfera (mm dia⁻¹);

T - temperatura média diária do ar (°C) obtida pela média dos valores extremos diários;

Z - altitude do local (m);

Rs - irradiância solar média diária (W m⁻²);

U - velocidade média do vento a 2,0 m de altura da superfície (m s⁻¹);

Td - temperatura do ponto de orvalho (°C)

F - fator de correção devido à altitude z (m) do local.

O fator de correção (F) é calculado pela expressão:

$$F = 1,0 - (8,7 \cdot 10^{-5} \cdot Z) \quad (16)$$

3.4.7 Método de Penman adaptado

A equação básica é uma modificação da equação de Penman (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997):

$$E_L = \frac{(s \cdot R_n) + (\gamma_L \cdot E_a)}{(s + \gamma_L)} \quad (17)$$

na qual os termos tem o mesmo significado da eq. (7) de Penman, sendo agora R_n expresso em mm de lâmina diária de água evaporada, E_a é o poder evaporante do ar e γ_L é a constante psicrométrica modificada.

A equação original do cálculo da constante psicrométrica é (KOHLE; PARMELE, 1965):

$$\gamma_L = \gamma + \left(\frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3}{f(U)} \right) \quad (18)$$

em que:

- constante psicrométrica (kPa);

ε - emissividade igual a 0,92;

σ - constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

$f(U)$ - função de vento dada por:

$$f(U) = 0,136 + (0,095 \cdot U_4) \quad (19)$$

em que:

U_4 - velocidade média diária do vento a 4,0 m acima da superfície do solo (m s^{-1}).

Pereira (2004) utilizou a seguinte expressão para o coeficiente psicrométrico corrigido, forma também utilizada por Leitão, Oliveira e Leitão (2007), que acabou sendo utilizada no presente estudo:

$$\gamma_L = 0,000661 \cdot P \quad (20)$$

em que:

γ_L - constante psicrométrica modificada ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

P - pressão atmosférica média do local (kPa).

O poder evaporante do ar foi calculado por:

$$E_a = f(U) \cdot (e_s - e_2) \quad (21)$$

em que:

e_s - pressão saturante (kPa);

e_2 - pressão parcial de vapor d' água do ar (kPa),

ambas determinadas a 2,0 m acima do gramado .

Visto que o método prevê o uso de velocidade do vento a 4,0 m acima da superfície e na estação meteorológica a medida é feita a 2,0 m acima da superfície, para se manter o cálculo o mais próximo possível da proposta original de Kohler, Norenson e Fox (1955), foi utilizada a conversão para velocidade do vento a 4,0 m de altura proposta por Allen et al. (1998), adotando a seguinte equação:

$$\text{fator de conversão} = \frac{4,87}{\ln[(67,8 \cdot z) - 5,42]} \quad (22)$$

em que:

z - altura (4,0 m).

3.4.8 Método do Tanque Classe A

O método, usado originariamente para estimativa de evapotranspiração de referência, foi aplicado por Leitão, Oliveira e Leitão (2007) no estudo de evaporação de superfície de água livre em duas regiões do estado da Paraíba, fazendo uso de coeficiente de ajuste do tanque K_p , sendo portanto as equações usadas:

$$E_L = K_p \cdot E_p \quad (23)$$

em que:

E_p - evaporação diária do tanque Classe A.

O valor de K_p foi calculado com a equação proposta por Snyder (1992):

$$K_p = 0,482 + [0,024 \cdot \ln(F)] - (0,000376 \cdot U) + (0,0045 \cdot UR) \quad (24)$$

em que:

F - tamanho da área de bordadura vegetada do tanque (m);

U - velocidade do vento (Km dia^{-1});

UR - umidade relativa média diária (%).

Foram realizadas simulações do efeito de vários tamanhos de bordadura vegetada em torno do tanque (10 m, 50 m, 100 m, 200 m, 400 m), visto que a definição do valor dessa bordadura é difícil de ser definido exatamente.

3.5 Relação entre variáveis medidas sobre o lago e na estação meteorológica

Com exceção dos métodos da razão de Bowen, Penman, Priestley-Taylor e Penman-Villa Nova cujas variáveis de entrada foram medidas no lago no período de março a junho de 2001, para os outros métodos foram utilizados valores médios diários das variáveis medidas na estação meteorológica, permitindo o uso de um período de análise maior do que aquele usado para esses métodos no lago.

Para auxiliar a avaliação do desempenho desses métodos, foram construídas relações entre as medidas de saldo de radiação, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento sobre o lago e sobre o gramado, para o período acima citado.

3.6 Análise dos dados de relações entre evaporação de tanques e estimada por métodos meteorológicos

As relações entre as medidas do tanque Classe A e do tanque de 20 m² foram obtidas pelo uso de análise de regressão entre as duas variáveis e, também, pelas relações médias E20/ECA.

No caso do teste dos modelos meteorológicos de estimativa da evaporação, os valores estimados foram comparados com a evaporação do tanque de 20 m², sendo estes tomados como referência, por duas formas: a) uso de regressão linear, verificando-se os valores e a significância dos coeficientes de determinação (R^2) e o desvio em relação à linha 1:1; b) pelo índice de exatidão, proposto por Willmott et al., (1985):

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum [(P_i - O) + (O_i - O)]^2} \quad (25)$$

em que:

Pi - valor estimado;

Oi - valor observado;

O - média dos valores observados.

O índice de exatidão varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo da unidade, maior a exatidão do modelo em prever a variável dependente. Robinson e Hubbard (1990) consideraram valores de **d** acima de 0,75 como satisfatórios.

O índice **c** (CAMARGO e SENTELHAS, 1997) também foi utilizado na comparação do desempenho dos métodos, pois ele leva em conta o índice de precisão dado pelo coeficiente de correlação (**r**) e o de exatidão (**d**), sendo expresso da seguinte forma:

$$c = r \cdot d \quad (26)$$

O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice “c”, para as medidas de evaporação está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa de evaporação pelo índice **c**

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Além desses índices, foram também calculados o desvio relativo percentual (D%) e o desvio médio (D_{med}) em mm dia⁻¹:

$$D\% = \frac{100 \cdot (P_i - O_i)}{O_i} \quad (27)$$

$$D_{med} = P_i - O_i \quad (28)$$

sendo que, os termos possuem o mesmo significado da eq. (25).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relações entre as variáveis meteorológicas medidas em ambiente terrestre (posto meteorológico) e sobre o lago

Visto que alguns métodos de estimativa da evaporação da superfície de água livremente exposta às condições atmosféricas foram testados somente com dados obtidos sobre o lago artificial e outros métodos com dados obtidos sobre superfície gramada, foram verificadas as relações entre as variáveis meteorológicas obtidas nos dois ambientes, fazendo-se a comparação dos valores médios diários das variáveis: temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), medidas em Piracicaba nos anos de 1999 a 2001, que são mostradas na Figura 5.

Figura 5 - Relações entre médias diárias de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar global e saldo de radiação sobre a superfície gramada e sobre o lago artificial. Piracicaba, SP

Observa-se uma excelente relação linear entre as medidas nos dois ambientes para essas variáveis, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,90 e coeficiente angular das retas muito próximo de 1,0.

Considerando que a superfície de água em princípio tem valores de emissividade, reflexão e absorção para ondas curtas diferentes de uma superfície gramada, a relação do saldo de radiação diário (R_n) medido sobre gramado e sobre o lago, muito próxima de 1:1, não era esperada. Não se encontrou dados comparativos desse tipo na literatura, mas como a radiação solar global é praticamente igual nos dois ambientes e como o balanço de radiação é a soma de dois componentes, o balanço de ondas curtas (BOC) e o de ondas longas (BOL), pode-se procurar nesses dois componentes os motivos dessa igualdade de R_n entre os ambientes.

No caso do BOC, o fator a se considerar é o albedo. Para água pura, ele é adotado como 0,05, mas o albedo de uma superfície é dependente do ângulo de incidência da radiação, o qual por sua vez depende da proporção entre radiação difusa e direta, da turbidez da água que afeta, também, a própria penetração da radiação de onda curta no corpo de água (GATES, 1980). Nunez, Davies e Robinson (1972) encontraram valores médios de albedo entre 0,07 e 0,11 ao longo do ano para o lago Ontário, o que está muito abaixo do valor médio assumido para um gramado (0,23).

Assim, infere-se que o BOC para o lago é maior do que para o gramado, entretanto, a diferença do BOC favorável ao lago pode ser compensada pelo maior valor negativo do BOL noturno sobre o lago, fazendo com que os valores de R_n se aproximem na escala diária.

A possibilidade de que o BOL no lago seja maior foi verificada, comparando-se a medida do saldo de radiação noturno (18:00h a 6:00h) nos dois ambientes, conforme pode ser observado na Figura 6, a qual indica que o balanço noturno de ondas longas é, em média, cerca de duas vezes maior sobre o lago do que sobre o gramado, pelo fato de que a temperatura noturna da água mantém-se superior à temperatura do gramado.

A medida da velocidade do vento sobre o lago foi feita em dois níveis em relação a superfície da água (0,4 m e 1,0 m) e na estação meteorológica a 2,0 m acima do gramado. Observa-se na Figura 7, que a diferença entre as médias de velocidade do

vento, na escala de 15 minutos, e as medidas realizadas entre os dois níveis acima do lago é muito pequena, provavelmente motivada pela pequena distância entre os níveis e porque a rugosidade da superfície não é grande. Por outro lado, as velocidades médias diárias tendem a ser similares a 2,0 m acima do gramado e a 1,0 m acima do nível de água, conforme se verifica na Figura 7b. Embora haja uma dispersão razoável nos dados, essa relação próxima de 1:1, também, não era esperada, mesmo porque além das diferenças de níveis de medida e do tipo de superfície, cerca de metade do perímetro do lago encontra-se circundado por árvores e por três edifícios com altura entre 7,0 m e 12,0 m, afastados de 30 m a 50 m da margem do lago e com certa distância entre os prédios.

Figura 6 - Saldo de radiação noturno no gramado e no lago. Piracicaba, SP

Figura 7 - Relações entre a velocidade média do vento: a) em períodos de 15 minutos, a 0,4 m e 1,0 m sobre lago. b) diária a 2,0 m sobre gramado e a 1,0 m sobre o lago

4.2 Temperatura da água nos evaporímetros e no lago

Em vista da importância da temperatura da água na evaporação e considerando a possibilidade dos diferentes corpos apresentarem regimes térmicos diferentes, fez-se a comparação da temperatura medida em Piracicaba, no período de 1999 a 2007, nos evaporímetros e em 2001 no lago, sendo adotada nesse último a profundidade mais superficial (Figuras 8 e 9).

Apesar das diferentes profundidades de medida nos três corpos (0,01 m e 0,05 m no lago; 0,05 a 0,10 m no tanque Classe A e 0,08 m a 0,12 m no tanque de 20 m²), para cada par de corpos foi encontrada uma relação com valores elevados de coeficiente de determinação, principalmente para a relação do tanque de 20 m² com o lago. Pelo fato do tanque Classe A ser exposto, a dispersão dos dados torna-se maior e o coeficiente angular se afasta do valor unitário, quando se força a passagem da reta de ajuste pela origem dos eixos.

Figura 8 – Relações de temperatura média diária da água dos tanques Classe A e 20 m². Piracicaba, SP

Figura 9 – Relações entre a temperatura média diária da água do lago e água dos tanques: a) 20 m²; b) Classe A. Piracicaba, SP

Apesar da relação próxima de 1:1 obtida ao se trabalhar com temperatura média diária, com altos valores de R^2 , é importante verificar que a dispersão dos dados da relação com o tanque Classe A é relativamente grande, com diferenças entre esse evaporímetro e os outros corpos acima de 5 °C, em consequência das características da maior exposição à radiação e aos ventos e do menor tamanho desse evaporímetro. Na Figura 10 observa-se dados de variação da temperatura da água dos corpos para períodos de 5 a 6 dias em três meses no primeiro semestre de 2001. As Figuras 10

(a, b, c) demonstram a variação da temperatura nos tanques Classe A, 20 m² e em duas profundidades no lago (0,05 m e 0,40 m). Na Figura 10d verifica-se o comportamento da temperatura da água no tanque padrão e nas duas profundidades do lago.

Na comparação envolvendo os dois evaporímetros e as duas profundidades no lago, observa-se a grande amplitude de variação térmica no tanque Classe A, abrangendo de 14 °C a 16 °C em qualquer um dos períodos analisados, somente variando o nível médio de aquecimento, com diminuição entre fevereiro e junho. Isso mostra a diferença muito grande do regime térmico ao longo de dias sem nebulosidade entre esse evaporímetro e os outros corpos d'água, o que contribui para sua maior evaporação. Já as flutuações diárias do lago e do tanque de 20 m² são bem mais concordantes, evidenciando não existir um regime térmico acentuadamente diferenciado entre as camadas de água mais próximas à superfície nos dois corpos. Na Figura 10d é possível verificar as diferenças que podem ocorrer ao longo das estações do ano entre a temperatura do lago nas duas profundidades e no tanque de 20 m². As diferenças na flutuação da temperatura ao longo dos dias e do ano entre as duas profundidades no lago são coerentes com as observadas por Angelocci e Villa Nova (1995) nesse mesmo lago, com defasagem entre a ocorrência das temperaturas extremas nas duas profundidades, de acordo com o processo de transporte de calor e seu armazenamento no lago no dia, sendo que na época mais fria observa-se uma tendência da profundidade de 0,40 m ficar mais quente do que a temperatura da superfície. Por outro lado, quando se compara a temperatura da água do lago com a do tanque de 20 m², observa-se que a do evaporímetro tende a ser um pouco maior no período quente e um pouco menor no período frio.

Figura 10 – Variação da temperatura da água nos evaporímetros e no lago: a) DJ 53 a 57, b) DJ 115 a 120, c) DJ 165 a 170; d) DJ 53 a 178

4.3 Temperatura do ar e da água

Outro aspecto de interesse no estudo da evaporação é a comparação entre a temperatura do ar e da água, visto que nem vários métodos usam a temperatura do ar como representativa da superfície evaporante. Como essa relação interessa para discutir o uso de dados meteorológicos terrestres (estação meteorológica) na estimativa da evaporação da superfície de água livremente exposta, discute-se a relação encontrada entre a temperatura do ar medida na estação meteorológica automática (EMA) e a temperatura da camada superficial de água do lago.

Na Figura 11 observa-se a boa relação linear encontrada entre os valores médios diários, com a confirmação de que a temperatura da água tende a ser maior em

média cerca de 14% que a do ar, sendo que em alguns dias ocorreram diferenças médias de até 8 °C entre os dois corpos.

Figura 11 - Relação da temperatura média diária da água do lago e do ar. Piracicaba, SP

Trabalhando no mesmo lago, Angelocci e Villa Nova (1995) observaram que em dias de alta irradiância solar a temperatura da água mostrou-se superior à do ar na maior parte do dia, sendo que em dias nublados esse fato ocorreu nas 24 horas. Na madrugada, no momento da ocorrência da temperatura mínima do ar, a temperatura da água a 0,1 m e 0,4 m de profundidade chegou, em noites frias, a ser cerca de 14 °C maior que a do ar e, mesmo no verão, as diferenças máximas foram da ordem de 10 °C. Nos dias de alta irradiância, aconteceu de em algumas horas no meio do dia a temperatura do ar ser maior que a das camadas mais superficiais, chegando num caso extremo a ser 8 °C superior. Mas, a temperatura média diária da água do lago chegou em média, a ser cerca de 3 °C maior que a do ar, com extremos no inverno de cerca de 8 °C.

4.4 Relações entre evaporação do tanque de 20 m² e do lago artificial

A evaporação medida no tanque de 20 m² foi adotada como próxima da evaporação de um lago. Determinou-se, então a correlação entre essas duas medidas realizadas no tanque de 20 m² e no lago em estudo no período de maio de 2001 e

junho de 2002 (Figura 12). Os resultados mostraram uma tendência de se encontrar uma relação 1:1 entre as duas medidas, embora com grande dispersão. Mesmo se controlando os períodos de fornecimento de água ao lago e das saídas eventuais por irrigação, quando as medidas não eram realizadas, deve-se considerar que o lago pode ter pequenas infiltrações no seu fundo e vazamentos na parede lateral, difíceis de serem detectadas e que podem ser fonte de erro na medida.

Figura 12 - Evaporação do lago comparada a do tanque de 20m²: a) medidas diárias; b) média para o período de dois dias

A dispersão mostrou-se grande na escala de um dia, inclusive, com R^2 negativo (teóricamente não justificável) quando se forçou a reta a passar pela origem na Figura 12a. Quando se comparou as medidas pela média de 2 dias, a dispersão ficou menor, levando a R^2 em torno de 0,85, tanto para o ajuste passando pela origem dos eixos (linha tracejada), como pelo ajuste sem passagem (linha cheia). Por outro lado, a evaporação do lago mostrou uma tendência média de ser 6 a 12% maior que a do evaporímetro, podendo ser consequência de várias fontes de erros nas duas medidas, inclusive por vazamentos no lago.

Apesar da dispersão, pode-se considerar que a evaporação do tanque de 20 m² representa, razoavelmente, bem a evaporação do lago mesmo na escala diária, comprovando as observações, desde o trabalho de Sleight (1917) de que a evaporação observada nesse tipo de tanque é bastante representativa de um grande espelho de água, mesmo que profundo (RAMOS et al., 1989). Por esse motivo, inexistindo uma série longa de medidas diretas de evaporação do lago, a evaporação do tanque de

20 m² foi tomada como referência para o estudo de comparação com o tanque Classe A e, também, para o de desempenho dos métodos meteorológicos em todo o período de estudo.

4.5 Relações entre evaporação do tanque Classe A e do tanque de 20 m² em Piracicaba, SP

As equações lineares mensais obtidas a partir de dados de evaporação medida no tanque de 20 m² e no tanque Classe A, no período de 1999 a 2007, estão apresentadas na Figura 13.

Para todos os meses, os valores de R² foram significativos e superiores aos obtidos nos estudos de Oliveira (1971) em Piracicaba e no de Volpe e Oliveira (2003), em Jaboticabal, nos quais foram observados alguns meses em que esses coeficientes não foram significativos.

Figura 13 - Relações mensais entre evaporação dos tanques Classe A e 20 m². Piracicaba, SP (continua)

Figura 13 - Relações mensais entre evaporação dos tanques Classe A e 20 m². Piracicaba, SP (conclusão)

No presente estudo, a possibilidade de se trabalhar com três repetições de tanques Classe A e de se fazer um filtro mais adequado dos dados observados, para eliminar os espúrios, provavelmente é uma das causas de se ter encontrado valores significativos do teste F para as regressões (Tabela 2), ao contrário do observado nos trabalhos de Oliveira (1971) e de Volpe e Oliveira (2003).

Tabela 2 - Teste F, a 5% de significância, obtido para as equações lineares de regressão entre a evaporação dos tanques de 20 m² e Classe A

Mês	Valor do Teste F
Janeiro	73,64 ^{**}
Fevereiro	93,58 ^{**}
Março	128,89 ^{**}
Abril	151,79 ^{**}
Maio	168,88 ^{**}
Junho	191,20 ^{**}
Julho	60,70 ^{**}
Agosto	69,03 ^{**}
Setembro	124,57 ^{**}
Outubro	67,34 ^{**}
Novembro	105,02 ^{**}
Dezembro	142,77 ^{**}

A Figura 14 apresenta uma equação de regressão única, estabelecida para os dados dos 9 anos de medidas, independente do mês, uma boa relação linear foi obtida, com valor de R² igual a 0,769 e de Teste F igual a 2083,88.

Figura 14 - Equação de regressão linear entre a evaporação dos tanques de 20 m² e Classe A. Piracicaba, SP

É muito comum, também, que ao invés das equações de regressão, determine-se a razão média mensal e anual entre a evaporação dos dois tanques, para cada mês, cujos valores obtidos neste estudo podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios diários de evaporação medida nos tanques de 20 m² e Classe A para cada mês e a razão entre a evaporação dos mesmos, 1999 a 2007, Piracicaba, SP

Mês	Evaporação (mm dia ⁻¹)		E20 / ECA
	20m ² (E20)	Classe A (ECA)	
JAN	4,6	5,4	0,79
FEV	4,7	6,3	0,83
MAR	4,4	5,3	0,84
ABR	4,0	4,5	0,87
MAI	3,5	3,4	0,80
JUN	3,3	3,1	0,84
JUL	3,0	3,4	0,82
AGO	3,9	4,5	0,79
SET	4,7	5,8	0,77
OUT	5,1	6,1	0,82
NOV	5,0	6,5	0,81
DEZ	4,6	5,9	0,84
Média	4,2	4,8	0,83

O valor médio obtido para o ano foi de 0,83, constatado tanto pela equação de regressão da Figura 14, como pela média da Tabela 3. Os valores mensais mostram uma tendência de variação ao longo do ano, similar à encontrada por Oliveira (1971) para Piracicaba e por Volpe e Oliveira (2003) para Jaboticabal, com os menores valores obtidos nos meses de agosto e setembro. No presente estudo, a flutuação dos valores ao longo do ano foi menos acentuada do que nos outros dois trabalhos, variando de 0,87 a 0,77, contra 0,89 a 0,67 no primeiro trabalho em Piracicaba, e 0,83 a 0,64 em Jaboticabal. Os valores tenderam a ser maiores no presente estudo, sendo que o valor médio anual (0,83) é cerca de 6% e 9% maior do que os obtidos, respectivamente, nos outros dois trabalhos citados. Os valores médios da relação entre os dois tanques obtidos em dois locais na antiga União Soviética, envolvendo o período de maio a outubro, também foram menores que os encontrados no presente estudo, sendo de 0,75 para um dos locais e 0,68 para o outro, com variação dos valores mensais de 0,53 a 0,85 (HOUNAM, 1973). Esse mesmo autor relata valores mensais (excluídos maio, junho e julho) para um local da Índia, variáveis entre 0,71 e 0,92, com média de 0,82, portanto mais próximos dos encontrados no presente estudo.

Comparando os resultados nos dois trabalhos em Piracicaba, há pequena discrepância (menor do que 3%) entre os valores da relação mensal em seis meses (fevereiro a junho e novembro), aumentando para cerca de 10 a 15% nos outros meses. Algo parecido ocorre na comparação com os resultados de Jaboticabal, com a diferença de que as discrepâncias muito baixas ocorreram de janeiro a maio e no mês de dezembro.

As maiores diferenças entre os valores obtidos nos trabalhos, que ocorreram nos meses mais secos, podem ser consequência, em primeiro lugar, das diferenças climáticas prevaletes entre as duas localidades, mas como também ocorreram entre os dois estudos feitos em Piracicaba, pode ter havido um efeito da extensão das séries de dados utilizadas, já que no estudo de Oliveira (1971) foi empregada uma série de um ano. A série longa usada no trabalho de Jaboticabal representa ponto favorável à maior representatividade dos resultados obtidos naquela localidade, embora o fato de se ter trabalhado com três repetições de tanque Classe A, no presente estudo, possa ter

levado à minimização dos erros com coeficientes de determinação das equações lineares significativos, em todos os meses, ao contrário do estudo de Jaboticabal.

4.6 Relações entre a evaporação medida em tanque de 20 m² e estimada por métodos meteorológicos

4.6.1 Com emprego de variáveis meteorológicas observadas no ambiente do lago

Os cálculos pelos quatro métodos testados com medidas meteorológicas no lago foram realizados de diferentes formas. No método da razão de Bowen, foram calculados valores de evaporação a partir de gradientes de temperaturas de bulbo seco e úmido determinados na superfície d'água (0,01 m de profundidade), adotada como representativa da temperatura e da pressão saturante de vapor no nível 0,0 m, 0,4 m e 1,0 m acima dessa superfície. No caso do método de Penman, foram feitos cálculos usando a média da temperatura do bulbo úmido e do bulbo seco na determinação de s (tangente à curva de pressão saturante de vapor em função da temperatura), conforme preconizado por Penman e, como alternativa, com uso somente da temperatura do ar (bulbo seco) sobre a superfície líquida.

Com exceção do método de Penman simplificado por Villa Nova et al. (2006), para o qual esses autores deixam claro o critério de se trabalhar somente com dados diurnos, nos demais métodos foram calculados valores derivados tanto do período diário (24 h), como somente do período diurno (período em que o saldo de radiação é positivo), para comparação com os valores de evaporação do tanque de 20 m². Deve-se considerar que é comum a determinação de estimativas pelos métodos de Penman e de Priestley-Taylor com dados médios diários (24 h) das variáveis, mas no caso deste estudo os valores das variáveis de entrada puderam ser calculados a partir de medidas a cada 15 minutos, permitindo trabalhar tanto com o período de 24 horas como somente o diurno.

Foram estabelecidas, também, relações entre as medidas evaporimétricas e estimativas meteorológicas com valores de períodos de dois dias subsequentes, para verificar se os erros ao acaso tenderiam a minimizar a dispersão entre os pontos

representativos dos pares de valores. Pela disponibilidade de dados, tanto do tanque de 20 m², como por perda de dias de medida nos métodos de estimativa, principalmente no método da razão de Bowen pelos critérios de exclusão de dados usados, ficou disponível somente um número pequeno de períodos com três ou mais dias subsequentes, para estabelecer relações consistentes. Deve-se ressaltar, também, que embora a evaporação do tanque de 20 m² fosse tomada como base de comparação, trata-se de uma medida com várias fontes de erro (de observação, presença de chuvas, representatividade do tanque como uma superfície extensa, etc,) e de variabilidade temporal, não podendo ser considerada exatamente como uma medida padrão.

Devido ao grande número de combinações de formas de cálculo, abstém-se de mostrar todas as figuras das relações entre a evaporação do tanque de 20 m² e a estimada pelos métodos meteorológicos nas diferentes formas de cálculo, sendo mostrados na Figura 15 gráficos de relações de valores diários para os métodos de balanço de energia-razão de Bowen (BERB), Penman, Priestley-Taylor e Penman simplificado por Villa Nova et al. (2006). Para o método de balanço de energia escolheu-se mostrar as relações obtidas quando foram usadas medidas psicrométricas nos níveis de 0,0 m e 1,0 m acima do nível da água, por terem sido obtidas em um grande número de dias de medida, no período de 24 horas. Para os outros três métodos foram escolhidos gráficos representativos das relações obtidas com valores do período diurno.

Para uma análise conjunta e comparativa dos quatro métodos e das formas de cálculo, foram inseridos na Tabela 4 os valores dos coeficientes linear e angular das equações de regressão, com os respectivos coeficientes de determinação R^2 , bem como os coeficientes angulares de retas forçadas a passar pela origem dos eixos, nesse caso como uma forma de se visualizar mais facilmente a relação entre as variáveis de cada eixo. Estão inseridos, também, os indicadores estatísticos de concordância e desempenho para cada método em relação ao evaporímetro: o índice de concordância de Wilmott et al. (1988), o índice c de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997), os desvios relativos (%) e os médios em relação aos valores do tanque de 20 m² e a relação média entre a evaporação estimada e a medida (Eest/E20).

Figura 15 - Relação entre evaporação estimada pelos métodos de BERB, Penman, Priestley-Taylor, Penman-Villa Nova e medida pelo tanque de 20 m². Piracicaba, SP

Embora o índice de concordância seja bastante usado em comparações de métodos, somente o seu emprego não é suficiente para a melhor interpretação sobre o desempenho dos métodos em relação às medidas evaporimétricas, levando Camargo e Sentelhas (1997) a proporem o uso de um índice de confiança e desempenho composto pelo índice **d** e o coeficiente de correlação **R**, pois assume-se que o primeiro (**d**) indica a exatidão da medida e **R** (ou mesmo o coeficiente de determinação R^2) é uma indicação da precisão da estimativa. Os valores dos desvios relativos e a relação entre a evaporação estimada e a medida (que se aproxima do valor do coeficiente angular **b** quando se força a passagem da reta pela origem dos eixos) ajudam a definir melhor o desempenho dos métodos.

A análise tanto da Figura 15 quanto da Tabela 4 indica a grande dispersão dos dados, principalmente quando se trabalha com valores diários, pois os valores de R^2

para o método de Penman e os dele derivados variam de 0,505 a 0,579, não sendo muito diferentes entre os métodos. Valores um pouco maiores para os dados diários são observados para o método de balanço de energia, com exceção dos obtidos a partir das medidas psicrométricas nos níveis 0,4 m e 1,0 m. Os cálculos com períodos de dois dias subsequentes tenderam a diminuir a dispersão dos pontos, ainda que em grau não muito elevado, aumentando, consequentemente, o índice de confiança (ou desempenho c). Deve-se ressaltar que o período de cálculo foi diferente entre o método BERB e os outros três, e que para os cálculos envolvendo medidas a 0,4 m acima da superfície da água para esse método, o número de dados foi pequeno, diminuindo ainda mais quando os cálculos foram realizados com valores de dois dias subsequentes.

Verifica-se na Tabela 4 que na maioria dos casos os valores de d foram relativamente elevados, sendo sempre superiores a 0,80, indicando uma boa exatidão das estimativas por todos os métodos, visto que Robinson e Hubbard (1990) consideram valores superiores a 0,75 como satisfatórios. Mas quando são analisados os desvios percentuais e os absolutos médios, além da relação média entre valores estimados pelos métodos e os medidos no evaporímetro, nota-se que o método BERB apresenta valores mais elevados de desvios em relação ao tanque de 20 m² quando realizados cálculos com dados somente do período diurno, ocorrendo superestimativas entre 14,7% e 29,7% em relação aos dados evaporimétricos, com desvios médios entre 0,83 a 1,26 mm dia⁻¹, enquanto que com os dados do período de 24 horas, verifica-se superestimativa entre 3,3 e 12,3% e desvios médios diários de 0,10 a 0,49 mm.

Deve-se lembrar, que o número de dados aproveitáveis no método BERB com valores originários das medidas psicrométricas a 0,4 m acima do nível de água foi pequeno, devido a problemas apresentados cerca de um mês após o início das medidas pelo psicrômetro instalado nesse nível. Pelo maior número de valores consistentes de β obtidos com o gradiente de temperatura de bulbo seco e úmido entre os níveis de 0,0 m e 1,0 m, levando ao maior número de dias utilizados nesses níveis de medida, os resultados desse caso serão considerados mais consistentes nas análises.

Tabela 4 - Coeficientes **a**, **b**, **R²** das equações entre valores de evaporação estimados pelos métodos (E_{est}) e medidos (E_{20}). **d** e **c** = índices de concordância e de desempenho. Formas de cálculo: níveis de medida de T_s e T_u (Bowen); uso de T_u e/ou T_s para cálculo de s (Penman)

Método	Formas de cálculo	a	b	R ²	b origem	d	c	Desv med mm/dia	Desv %	E_{est}/E_{20}
Bowen 1 dia 24h	0,0-0,4 m	-0,499	1,149	0,663	1,038	0,872	0,710	+ 0,10	+3,3	1,02
	0,0-1,0 m	1,033	0,825	0,616	1,090	0,860	0,665	+0,39	+12,3	1,12
	0,4-1,0 m	0,134	0,977	0,839	0,920	1,008	0,955	+0,04	+2,0	1,01
Bowen 2 dias 24h	0,0-0,4 m	-0,231	1,078	0,804	1,140	0,851	0,763	+0,49	+11,1	1,11
	0,0-1,0 m	0,912	0,835	0,746	1,051	0,804	0,694	+0,30	+8,1	1,08
	0,4-1,0 m	0,670	0,812	0,511	0,970	0,652	0,466	+0,07	+8,0	1,08
Bowen 1 dia Diurno	0,0-0,4 m	-0,259	1,247	0,633	1,190	0,804	0,640	+0,83	+17,2	1,21
	0,0-1,0 m	1,029	0,978	0,585	1,470	0,784	0,600	+0,96	+29,7	1,30
	0,4-1,0 m	0,834	0,910	0,505	1,121	0,800	0,569	+0,57	+14,7	1,15
Bowen 2 dias Diurno	0,0-0,4 m	0,474	1,200	0,814	1,309	0,751	0,677	+1,26	+31,6	1,31
	0,0-1,0 m	1,081	0,96	0,768	1,227	0,854	0,704	+0,95	+27,0	1,27
	0,4-1,0 m	1,509	0,869	0,859	1,204	0,826	0,766	+0,96	+23,0	1,23
Penman 1 dia 24h	T_u e T_s ;	0,638	0,761	0,505	0,919	0,820	0,623	-0,25	-6,7	0,93
	T_s	0,537	0,761	0,522	0,894	0,815	0,590	-0,36	-10,5	0,91
Penman 2 dias 24h	T_u e T_s ;	-0,260	1,000	0,689	0,942	0,893	0,738	-0,25	-6,0	0,94
	T_s	0,653	0,779	0,700	0,929	0,986	0,856	-0,28	-7,0	0,94
Penman 1 dia Diurno	T_u e T_s ;	1,056	0,791	0,548	1,052	0,840	0,623	+0,36	+7,2	1,07
	T_s	1,22	0,817	0,523	1,118	0,800	0,575	+0,53	+12,4	1,14
Penman 2 dias Diurno	T_u e T_s ;	0,530	0,944	0,662	1,066	0,963	0,784	+0,30	+7,2	1,07
	T_s	0,403	1,039	0,676	1,132	0,816	0,671	+0,57	+13,6	1,14
Pries- tley 24h	diários	0,220	0,874	0,534	0,930	0,828	0,605	-0,25	-6,7	0,93
	2 dias	-0,232	1,019	0,665	0,965	0,897	0,731	-0,15	-3,0	0,96
Pries- tley Diurno	diários	0,523	0,905	0,563	1,034	0,849	0,637	+ 0,17	+4,5	1,05
	2 dias	0,391	0,962	0,586	1,052	0,884	0,667	+0,24	+5,7	1,06
Villa Nova	diários	0,560	0,875	0,579	1,013	0,863	0,657	+0,10	+2,7	1,03
	2dias	0,369	0,945	0,632	1,030	0,879	0,700	+0,14	+3,3	1,03

Teoricamente, deve-se determinar a evaporação pelo BERB com os valores de calor latente que expressam a evaporação ocorrente no período diurno (valores positivos). Como à noite aparecem valores negativos de R_n , esse fato gera valores de LE negativos nesse período, significando que houve condensação de água. Recomenda-se, portanto, somar apenas os valores do período diurno. Contudo, observa-se que o uso somente de dados diurnos levou aos valores de evaporação mais superestimados em relação aos do evaporímetro. Uma hipótese que poderia explicar o melhor desempenho ao se trabalhar com os valores de 24 horas é que a contabilização dos valores noturnos provavelmente compensa o fato de se desprezar o valor de armazenamento de calor na água ou as perdas de calor no fundo do lago, mas isso necessita ser melhor estudado, mesmo porque na escala diária, poderia se questionar a importância desses dois processos.

As perdas no fundo de um corpo de água normalmente são pequenas, tendo sido da ordem de 7% da evaporação anual num lago nos Estados Unidos (ROSENBERRY; STURROCK; WINTER, 1993). A desconsideração do termo armazenamento é muito comum (SIMON; MERO, 1985; VALLET-COULOMB et al., 2001), sendo que num lago pequeno em Minas Gerais, Reis e Dias (1999), verificaram que na escala mensal foi uma ordem de grandeza menor que o saldo de radiação. Entretanto, há autores (FINCH, 2001; ROSENBERRY, 2007) que consideram significativo esse componente, principalmente em escala sazonal.

Se tomados os valores obtidos a partir de períodos de 24 horas para o método BERB, seus desvios em relação ao evaporímetro de 20 m^2 são relativamente comparáveis, em termos absolutos, aos observados para os métodos de Penman e Priestley-Taylor, pois os desvios relativos (ou a relação E_{est}/E_{20}) indicam subestimativas desses métodos nos valores diários entre 6% a 10,5%.

Para os casos em que foram contabilizados somente os valores diurnos, da mesma forma que o método de balanço de energia, os outros três métodos usados tenderam a dar valores superestimados em relação ao tanque de 20%, sendo que o método simplificado de Penman por Villa Nova et al. (2006) foi o que forneceu valores menos superestimados, da ordem de 3%, sendo que o desvio máximo encontrado no método de Penman com 14%.

Embora pelo método original de Penman a velocidade do vento deva ser medida a 2,0 m acima da superfície evaporante e no presente trabalho ela foi medida a 1,0 m acima da superfície do lago, demonstrou-se no item 4.1 que em média as diferenças entre os valores dessa variável obtidas a 0,4 m e a 1,0 m de altura sobre a água foram pequenas, podendo-se supor que não ocorreram diferenças ponderáveis entre as medidas a 1,0 m e 2,0 m, sem introdução de erro apreciável. Além disso, o termo aerodinâmico na equação de Penman tem menor efeito sobre a estimativa do que o termo energético. Para o método de Priestley-Taylor e de Penman simplificado por Villa Nova et al.(2006), a determinação do valor de s a partir tanto da temperatura do bulbo seco, como da média entre esta e a do bulbo úmido, as diferenças foram insignificantes, de modo que somente os resultados obtidos com a média das duas temperaturas são mostradas.

4.6.2 Com emprego de variáveis meteorológicas observadas sobre superfície de posto meteorológico

Nas Figuras 16, 17, 18, 19 e 20 são mostrados exemplos de relações entre as estimativas diárias (para período de 24 horas) de evaporação pelos métodos meteorológicos e as medidas do tanque de 20 m², com variáveis de entrada observadas nas estações meteorológicas em Piracicaba e Jaboticabal. Para os métodos de Penman, Penman modificado (KHOLER; PARMELE, 1967), Linacre e de Snyder são mostradas as relações encontradas em ambas as localidades, enquanto que para o baseado na equação de Dalton (GANGOPADHYAYA et al., 1966) foram feitos cálculos somente para a primeira localidade. A linha cheia indica que os dados não passaram pela origem e a linha tracejada indica que os dados tiveram a passagem forçada pela origem.

Figura 16 - Relação entre evaporação estimada pelo método de Penman modificado por Kohler e Parmele e medida pelo tanque de 20 m². Piracicaba e Jaboticabal, SP

Figura 17 - Relação entre evaporação estimada pelo método de Linacre e medida pelo tanque de 20 m². Piracicaba e Jaboticabal, SP

Figura 18- Relação entre evaporação estimada pelo método de Snyder e medida pelo tanque de 20 m². Piracicaba e Jaboticabal, SP

Figura 19 - Relação entre evaporação estimada pelo método de Penman e medida pelo tanque de 20 m². Piracicaba e Jaboticabal, SP.

Figura 20 – Relação entre evaporação estimada pelo método de Dalton adaptado por Gangopadhyaya, et al. e medida pelo tanque de 20 m². Piracicaba, SP.

Na Tabela 5 são mostrados os valores dos coeficientes das equações lineares e os índices de concordância e desempenho já utilizados no item anterior. Como as séries de dados terrestres eram bem mais longas do que as do ambiente do lago, foram determinadas relações com períodos de dados de 2 e 3 dias subsequentes, bem como para todos os dias com dados disponíveis em cada mês, mesmo não subsequentes (indicado como “mês” na Tabela). Nesse caso, foram comparados valores médios

mensais independente do número de dias disponíveis em cada mês, já que há muitas falhas de medidas do tanque de 20 m², principalmente em Piracicaba.

Para valores de um dia, tanto as Figuras 16 a 20, como a Tabela 6 indicam a grande dispersão dos dados em todos os métodos, com valores de R^2 variando entre 0,375 (métodos Linacre para Jaboticabal e Dalton-Gangopadhyaya para Piracicaba) e 0,746 para o método Snyder em Piracicaba. Na grande maioria dos casos, os valores de R^2 foram superiores para Piracicaba nessa escala de tempo e o método de Snyder foi o que levou à menor dispersão dos pontos em ambas as localidades. Os cálculos para períodos maiores que um dia fez aumentar sistematicamente o valor de R^2 , diminuindo a dispersão dos dados para todos os métodos e locais. Para valores mensais os dados de Jaboticabal mostraram uma dispersão pequena, com valores de R^2 elevados (próximos de 0,90), enquanto que para Piracicaba os valores de R^2 , nessa escala de tempo, podem ser considerados elevados para os métodos de Linacre e Snyder. A diminuição da dispersão dos dados para os meses em Jaboticabal, provavelmente seja consequência do maior número de dias em cada um deles, aumentando a possibilidade de compensação de desvios com sentidos (sinais) opostos nessa escala de tempo.

Com exceção para os valores de até 3 dias no método de Dalton-Gangopadhyaya e no de 3 dias para o método de Penman, nos quais o índice de concordância d apresentou valores inferiores a 0,8, para os outros métodos e formas de cálculo eles estiveram acima de 0,8, atingindo valores acima de 0,9, com o máximo de 0,976 para o método de Penman modificado na escala “mensal”.

Analisando os desvios médios e a relação média entre os valores estimados e medidos, observa-se que o método de Dalton-Gangopadhyaya, embora com os menores índices de desempenho c , apresentou pequenos desvios, com superestimativas médias entre 2,1% a 8,1%, indicando uma tendência de boa exatidão quando tomada a evaporação do tanque de 20 m² como referência, mas havendo necessidade de se tomar cuidado com a variabilidade das estimativas nas escalas de tempo usadas.

Tabela 5 - Coeficientes a, b e R^2 das equações, índices d, c, e desvios médios e relativos entre valores de evaporação estimados (E_{est}) e medidos (E_{20}). Piracicaba e Jaboticabal, SP.

Método	Local	Nº Dias	a	b	R^2	b (origem)	d	c	Desv med mm/dia	Desv %	E_{est}/E_{20}
Kohler	Piracicaba	1	0,611	0,782	0,511	0,926	0,832	0,593	-0,211	-5,5	0,94
		2	0,119	0,863	0,600	0,892	0,862	0,668	-0,39	-10,6	0,89
		3	-0,143	0,911	0,668	0,875	0,874	0,715	-0,47	-12,7	0,87
		mês	-0,949	1,135	0,668	0,879	0,833	0,680	-0,48	-14,1	0,88
	Jaboticabal	1	1,815	0,577	0,482	0,955	0,816	0,567	+0,04	+1,0	1,01
		2	1,435	0,670	0,593	0,977	0,870	0,670	+0,04	+1,0	1,01
		3	1,175	0,731	0,670	0,987	0,899	0,736	+0,04	+1,0	1,01
		mês	0,363	0,927	0,910	1,009	0,976	0,931	+0,04	+1,0	1,01
Dalton	Piracicaba	1	0,801	1,107	0,297	1,052	0,688	0,380	+0,32	+8,1	1,08
		2	0,195	0,974	0,453	1,040	0,786	0,529	+0,09	+2,3	1,02
		3	-0,202	1,556	0,646	1,080	0,750	0,603	+0,08	+2,1	1,02
		mês	0,094	1,051	0,523	1,074	0,798	0,577	0,28	+7,2	1,07
	Jaboticabal	1	0,638	0,751	0,635	0,902	0,877	0,700	-0,36	-9,4	0,91
		2	0,134	0,879	0,794	0,912	0,929	0,727	-0,31	-8,4	0,92
		3	-0,049	0,925	0,833	0,912	0,935	0,897	-0,33	-8,9	0,91
		mês	-0,030	0,951	0,880	0,944	0,956	0,900	-0,23	-2,31	0,94
Linacre	Piracicaba	1	0,638	0,751	0,635	0,902	0,877	0,700	-0,36	-9,4	0,91
		2	0,134	0,879	0,794	0,912	0,929	0,727	-0,31	-8,4	0,92
		3	-0,049	0,925	0,833	0,912	0,935	0,897	-0,33	-8,9	0,91
		mês	-0,030	0,951	0,880	0,944	0,956	0,900	-0,23	-2,31	0,94
	Jaboticabal	1	1,766	0,482	0,375	0,837	0,790	0,480	-0,52	-13,8	0,96
		2	1,392	0,573	0,475	0,865	0,802	0,553	-0,43	-10,1	0,90
		3	1,035	0,058	0,586	0,878	0,841	0,643	-0,44	-10,2	0,90
		mês	0,125	0,863	0,931	0,890	0,911	0,874	-0,49	-11,2	0,89
Snyder	Piracicaba	1	0,906	0,823	0,746	1,020	0,904	0,781	+0,16	+3,9	1,04
		2	0,930	0,814	0,753	1,027	0,923	0,868	0,18	+4,5	1,04
		3	0,690	0,870	0,803	1,035	0,911	0,816	+0,18	+4,6	1,04
		mês	0,100	1,019	0,815	1,042	0,939	0,845	+0,17	+4,3	1,04
	Jaboticabal	1	1,233	0,846	0,669	1,105	0,862	0,705	+0,59	+14,0	1,14
		2	0,878	0,929	0,743	1,125	0,881	0,759	+0,59	+14,4	1,14
		3	0,503	1,020	0,822	1,136	0,907	0,822	+0,58	+14,5	1,14
		mês	0,615	0,995	0,888	1,134	0,889	0,838	+0,59	+14,0	1,14
Penman	Piracicaba	1	0,623	0,751	0,532	0,896	0,834	0,608	-0,35	-9,0	0,91
		2	0,559	0,760	0,443	0,892	0,781	0,520	-0,40	-10,0	0,90
		3	0,526	0,747	0,375	0,871	0,700	0,429	-0,51	-12,3	0,88
		mês	-0,162	0,942	0,572	0,902	0,772	0,584	-0,34	-8,9	0,91
	Jaboticabal	1	1,386	0,552	0,527	0,842	0,808	0,587	-0,48	-11,5	0,89
		2	1,043	0,640	0,637	0,865	0,858	0,681	-0,45	-10,8	0,89
		3	0,858	0,687	0,710	0,874	0,879	0,740	-0,44	-10,6	0,89
		mês	0,316	0,810	0,897	0,882	0,902	0,854	-0,48	-11,5	0,89

O método de Penman adaptado apresentou desempenho diferenciado para os dois locais de estudo. Ele tendeu a fornecer valores subestimados para Piracicaba entre 5,5% e 14,1%, dependendo da escala de tempo, curiosamente numa proporção inversa à diminuição da dispersão, mas para Jaboticabal apresentou desvio mínimo em relação ao tanque de 20 m² em todas as escalas de tempo, com desvios de 1,0%, equivalente a um desvio médio de 0,04 mm dia⁻¹. Desempenho também diferenciado ocorreu com o método de Snyder, que mostrou desvios positivos pequenos em relação ao evaporímetro para Piracicaba, mas superestimativa relativamente grande, de 14% nas diferentes escalas de tempo para Jaboticabal. Já o método de Penman apresentou homogeneidade quanto a esses índices, tanto nas escalas de tempo como entre as localidades, mas levou a uma subestimativa média em torno de 11% em relação à medida do evaporímetro.

Comparando-se os resultados aqui obtidos com os encontrados por Leitão, Oliveira e Leitão, (2007) em estudo similar, com os mesmos métodos e variáveis meteorológicas medidas em ambiente terrestre, durante 11 meses em duas localidades no Estado da Paraíba, a dispersão na localidade de Boqueirão para as estimativas diárias foi menor (valores de R² entre 0,69 para o método de Penman e 0,91, para o de Snyder), enquanto que para Patos a dispersão foi maior (R² entre 0,48 para o método de Penman e 0,86 para o de Snyder). Os valores de *d* foram maiores na primeira localidade, entre 0,855 para Penman e 0,958 para Snyder, contra valores entre 0,776 e 0,957 para esses respectivos métodos na outra localidade.

O método de Snyder apresentou a melhor concordância média com o tanque de 20 m² nas duas localidades, com desvio médio de +4,2% numa localidade e -3,3% na outra, com desempenho próximo do encontrado neste estudo. O método de Penman apresentou índices próximos dos encontrados no presente estudo, com desvios médios de -9,8% e -10,7%. Embora o de Dalton-Gangopadhyaya resultasse em desvios de -5,9 % e -4,1% em cada localidade, pode-se considerar os desvio não acentuados em relação aos valores de tanque de 20 m², como ocorreu em Piracicaba, com a diferença de que os valores de R² e de *d* foram maiores na Paraíba. O método de Linacre apresentou, em Patos, dispersão parecida com a de Piracicaba e menos acentuada em Boqueirão, mas em compensação, seu desvio negativo em relação aos valores

evaporimétricos foram mais acentuados (-16,9% e -18,2%) do que em Piracicaba e Jaboticabal.

O desempenho dos métodos de Penman modificado e de Penman original nesse estudo merecem uma discussão adicional. Como o primeiro representa uma pequena modificação do segundo, esperava-se desempenho similares entre eles. Mas, os desvios muito pequenos entre os valores estimados e observados em Jaboticabal não são facilmente explicáveis.

O método de Penman foi o único usado com dados do lago e do posto meteorológico. Observa-se que os resultados obtidos com períodos de 24 horas e cálculo de s com dados de temperatura do ar (usados nos cálculos do ambiente terrestre) são muito próximos em Piracicaba. Isso pode ser explicado pelo fato de que as diferenças entre as variáveis de entrada no método não foram muito diferentes entre si nos dois ambientes, como discutido no item 4.1. Em Piracicaba, com um ano de dados, Oliveira (1971) encontrou um desvio médio da evaporação estimada pelo método de Penman de +4,9% em relação à evaporação do tanque de 20 m², mas com variação acentuada dos desvios em cada mês sendo baixos (2,2% a 8,7%) em sete meses do ano, mas altos (19,2% a 33,3%) nos outros cinco meses.

Os valores subestimados pelo método de Penman provavelmente seriam minimizados se o balanço de radiação fosse calculado com o coeficiente de reflexão da água para ondas curtas, igual a 0,05, na forma proposta por Penman. Entretanto, esse valor é menor do que os determinados por Nunez, Davies e Robinson (1972) em lagos, entre 0,07 a 0,11. Essas observações mostram a relativa complexidade envolvendo aspectos teóricos e práticos da estimativa da evaporação por métodos meteorológicos.

4.7 Discussão final

Este trabalho foi centralizado em duas maneiras de se estimar a evaporação de superfícies de água livremente exposta à atmosfera, como uma ferramenta para estudos hidrológicos e climatológicos. Na primeira forma, estabeleceram-se relações entre medidas de dois tipos de evaporímetros para estimar a evaporação de superfície de água livre, a partir do tanque Classe A, considerando-se o de 20 m² como bom

indicador da evaporação de uma superfície extensa. As relações obtidas dessa forma são úteis no sentido de que pode se usar um tanque pequeno para essas estimativas. Mas há alguns problemas nesse procedimento: primeiro, as relações normalmente são específicas para o clima da região; segundo, embora sejam instrumentos simples, os evaporímetros apresentam problemas de manejo e de observação, com várias fontes de erro e em muitos dias não permitem leituras devido às chuvas. Independente desses fatos, os resultados aqui obtidos para as relações em Piracicaba podem substituir os já existentes na literatura, pela consistência estatística observada pela representatividade da série temporal usada e pelo uso de repetições de medidas de tanque Classe A.

O uso de métodos meteorológicos pode superar o problema de relações específicas entre os tipos de evaporímetros, tornando as estimativas universais mas também apresenta problemas, como o desempenho dos métodos e a necessidade de medidas meteorológicas, que podem ser realizadas tanto em ambiente aquático como terrestre, formas usadas nesse trabalho. A dificuldade é definir qual ou quais métodos são mais adequados ou quais são possíveis de serem usados. Há trabalhos de literatura nos quais muitos métodos foram testados. No Brasil, citam-se os trabalhos de Gukovas (1981) e de Sartori (2000), além do emprego de métodos como o BERB, de Priestley-Taylor e complementar de Morton, usados por Reis e Dias (1998) num pequeno lago em Minas Gerais, ou o de Morton e de Penman em lagos do Pontal do Paranapanema, fazendo-se comparações com o tanque Classe A (ROQUE, 2000). Há vários trabalhos realizados no exterior, como os de Abdulai et al. (1990), de Abtew (2001), Finch (2001) e de Rosenberry et al. (2007), mas as aproximações empregadas, bem como os diferentes métodos usados nos trabalhos de literatura e os diferentes critérios de medida ou estimativa de referência (tanques de 20 m², Classe A, ou métodos meteorológicos como o de BERB) tornam complicada a comparação dos resultados obtidos com os de literatura.

O BERB é muitas vezes tomado como padrão na análise comparativa de desempenho de métodos de estimativa de evaporação (WINTER; ROSENBERY; STURROCK, 1995; DALTON; AULENBACH; TORAK, 2004; ROSENBERY et al., 2004, 2007), por se tratar de um método micrometeorológico para determinação do fluxo de vapor para a atmosfera, em situações nas quais a medida direta (balanço de

massas por exemplo) é complicada, principalmente no caso de grandes superfícies de água. Embora haja outros métodos micrometeorológicos, como o de covariância de turbilhões, que representa uma forma mais direta de medida micrometeorológica, mas exige instrumental mais caro, ou o método aerodinâmico, o BERB muitas vezes é preferido por ser considerado um dos mais robustos e mais precisos métodos de estimativa de evaporação, mas ele necessita muita cautela quanto às suas fontes de erro, de ordem instrumental ou decorrentes de fatos como a exigência das medidas psicrométricas serem feitas dentro da camada limite ajustada da superfície, de preferência na subcamada inercial, ou do possível efeito de ocorrência de fluxos advectivos de calor, que afetam a pressuposição de similaridade dos coeficientes de transferência turbulenta no ar. É, portanto, um método mais com finalidades de pesquisa e no presente estudo verificou-se como o seu desempenho variou de acordo com a forma de cálculo, resultando em valores muito discordantes daqueles obtidos pelo tanque de 20 m² quando foram contabilizados somente os valores diurnos.

Os outros métodos, utilizados neste estudo, têm a vantagem de exigirem medidas meteorológicas mais simples, que podem ser realizadas no próprio ambiente aquático ou, na maioria das vezes, em ambiente terrestre. Os resultados obtidos, ainda que se possa questionar o uso do tanque de 20 m² como referência, indicam que todos os métodos usados levaram à resultados concordantes, em diferentes graus, com a evaporação desse tanque, sendo que cada um não mudou essencialmente a tendência média de desvios em relação aos dados evaporimétricos, nas escalas de tempo usadas, embora tendessem na maioria dos casos a diminuir a dispersão e aumentar o índice de desempenho *c* com o aumento do período de cálculo.

Como esses métodos podem ter os cálculos de suas variáveis de entrada realizados de várias formas, como ocorre no método de Penman, o desempenho de cada um frente ao tanque de 20 m² podem mudar, numa mesma localidade. No método de Penman, isso foi observado quando os valores foram calculados para o período diurno ou diário (24 horas), nos quais ocorreram, respectivamente, subestimativas ou superestimativas em relação às medidas de evaporação do tanque de 20 m². Outro aspecto é que o uso somente da temperatura do bulbo seco nos cálculos de variáveis como o déficit de pressão de vapor e da declividade da curva de pressão saturante de

vapor em função da temperatura (s), em conjunto com o período (dias) de cálculo, afetou o desvio em relação ao evaporímetro, chegando para o período diurno a promover diferenças médias da ordem de 14%. Deve-se observar que os desvios médio e relativo desse método com os dados de uma série longa de medidas a partir das estações meteorológicas, levaram a resultados similares de concordância nas duas localidades com os obtidos no lago.

Para o ambiente do lago, os métodos de Priestley-Taylor e o de Penman simplificado por Villa Nova et al. (2006) revelaram-se excelentes opções, por não exigirem medidas de vento e por terem apresentado desvios médios menores que o método de Penman original, sendo que o simplificado resultou em valores um pouco mais próximos aos dos evaporímetros.

Dos métodos com uso de variáveis medidas em posto meteorológico, o do tanque Classe A mostrou bom desempenho comparativo com o tanque de 20 m² em Piracicaba, confirmando o observado em duas regiões da Paraíba. Entretanto, em Jaboticabal os desvios médios foram da ordem de 14%, indicando uma diferença sistemática elevada. Esse método, originariamente usado para estimativa da evapotranspiração de referência, é bastante empírico e é surpreendente que tenha dado bons resultados para estimativa da evaporação de superfície de água livre. Outro aspecto é o valor de K_p, baseado nas equações propostas por Snyder (1992), que além de exigir a medida de velocidade do vento e da umidade relativa, necessitam do tamanho da bordadura vegetada em torno do tanque, o que pode ter sido uma causa importante do desempenho diferenciado nas duas localidades. O fato de se estar comparando duas medidas de base evaporimétrica pode ter causado a menor dispersão dos dados estimados e medidos. Portanto, a recomendação do seu uso com base nos resultados desse trabalho exige cautela.

Dos outros métodos usados com cálculo a partir de observações em postos meteorológicos nas duas localidades, o de Linacre mostrou desvios médios baixos e semelhantes em ambas, enquanto que os calculados pelo método de Kholer, Noredenson e Fox (1955) tiveram desvios maiores (subestimativas de 5,5% a 14,1%) em Piracicaba, e muito baixos em Jaboticabal (+1%). Como são métodos similares as discrepâncias entre as localidades poderia ser explicada pelas diferentes formas de

determinação do saldo de radiação, estimado em Jaboticabal e medido em Piracicaba. Contudo em ambos os métodos foram empregados os mesmos valores de R_n em cada localidade, sendo que o de Penman apresentou desvios médios próximos aos obtidos por Kohler em Piracicaba, contradizendo a idéia de que o termo energético das equações seja a causa da diferença de desempenho para esse método em Jaboticabal. Provavelmente a causa das diferenças de comportamento deve ser buscada no termo aerodinâmico.

O método derivado da equação de Dalton (GANGOPADHYAYA et al., 1966) somente foi estudado em Piracicaba, tendo apresentado desvio médio pequeno em relação ao tanque de 20 m², mas uma dispersão muito grande em todas os períodos de tempo usados.

Considerando os critérios de classificação de desempenho com base no índice c , propostos por Camargo e Sentelhas (1997), o BERB seria classificado como de bom desempenho para a escala diária e período de 24h e também para dois dias, mas seria classificado apenas como mediano ou sofrível para período diurno e para um dia. O de Penman seria considerado como mediano e sofrível na escala de um dia, sendo que para períodos de dois dias, dados diurnos, seria considerado muito bom (com T_u e T_s) e bom (com uso somente de T_s). Enquanto, o método de Priestley-Taylor seria classificado como mediano para valores de um dia (períodos diurnos e 24h) e bom para períodos de dois dias, o de Penman modificado por Villa Nova et al. (2006) seria classificado como bom em ambas as escalas de tempo.

Para os testados com dados de ambiente terrestre, os de Snyder e de Linacre teriam classificação de bom ou muito bom desde períodos de um dia ou maiores, o de Gangopadhyaya et al. (1966) alcançaria um nível máximo de mediano a partir de 3 dias nas duas localidades, o de Kohler seria considerado como bom a partir de dois dias em ambas e o de Penman seria classificado como bom somente para a escala de dois dias em Piracicaba e a partir do segundo dia em Jaboticabal.

Entretanto, deve-se considerar a subjetividade e as aproximações dessa classificação, na qual valores próximos podem levar a classes de desempenho diferentes ou a classificações elevadas mesmo com desvios médios também elevados como aconteceu com o BERB para dois dias e período diurno.

De acordo com o exposto, pode-se concluir que entre os métodos testados com dados do lago, os de Priestley-Taylor e de Penman simplificado por Villa Nova et al. (2006) podem ser recomendados por terem apresentado melhores índices de comparação com a evaporação do tanque de 20 m² e por apresentarem uma simplificação metodológica em relação aos outros dois métodos,

Para os métodos testados com dados do posto meteorológico, o do tanque Classe A-Snyder pode ser recomendado, com a ressalva de que em Jaboticabal há necessidade de correção para o desvio sistemático de +14% em relação ao tanque de 20 m². Tanto o método original de Penman, como a sua adaptação por Kholer e Parmele (1967) mostraram índices de comparação e desempenho inferiores ao de Snyder, mas podem ser recomendados com a ressalva de que em ambas as localidades para o primeiro e em Piracicaba para o segundo seja feita correção para o desvio sistemático médio em torno de + 10%.

5 CONCLUSÕES

5.1 Referentes às relações entre medidas dos tanques Classe A e de 20 m²:

- Foram observadas relações lineares significativas entre os valores da evaporação dos tanque Classe A (ECA) e 20 m² (E20) em todos os meses do ano em Piracicaba, SP;
- A razão mensal entre as medidas dos evaporímetros apresentou variação ao longo do ano, com superestimativa pequena (em torno de 3%) de fevereiro a junho e em novembro, e grande (entre 10 a 15%) nos outros meses, em relação aos dados de Oliveira (1971) para a mesma localidade;
- A maior consistência estatística e a maior representatividade da série de 9 anos de medidas, com 3 repetições de observações no tanque Classe A, indicam que os fatores mensais de relações entre os dois evaporímetros obtidos neste estudo podem substituir com vantagem os obtidos por Oliveira (1971) para Piracicaba.

5.2 Referentes às relações entre as estimativas por métodos meteorológicos e medidas pelo tanque de 20 m²:

- Todos os métodos utilizados, seja com o uso de dados do ambiente aquático ou com o uso de dados do posto meteorológico, apresentaram boa concordância em termos médios com os observados no tanque de 20 m², mas sempre com dispersão muito grande dos pares de valores, a qual diminuiu com o aumento do número de dias de contabilização;
- A forma de cálculo de cada método usado no lago afetou as estimativas, principalmente no método BERB, no qual a contabilização da evaporação em escala diurna resultou os maiores desvios em relação às medidas quando comparado aos outros três métodos;
- O método BERB e o de Penman original mostraram maiores desvios relativos médios na escala de 24h, em relação ao de Priestley-Taylor e ao de Penman-Villa Nova; considerados esse e os outros critérios de análise, os dois últimos mostraram

resultados mais comparáveis com a evaporação do tanque de 20 m² que os primeiros;

- O método de Dalton-Gangopadhyaya, testado em Piracicaba, apresentou os piores índices de comparação com as medidas do tanque de 20 m²;
- Dentre os outros métodos testados com dados do posto meteorológico, o do tanque Classe A-Snyder foi o que apresentou melhores índices de comparação com a evaporação do tanque de 20 m², com a ressalva de que em Jaboticabal mostrou desvio sistemático;
- Tanto o método original de Penman, como a sua adaptação por Kholer e Parmele (1967) apresentaram índices de comparação e desempenho inferiores ao de Snyder, mas podem, também, ser recomendados desde que corrigidos para os desvios sistemáticos observados em ambas as localidades para o de Penman e em Piracicaba para o Penman adaptado.

REFERÊNCIAS

ABDULAI, B.I., STIGTER, C.J., IBRAHIM A.A., ADEEB, A.M., ADAM, H.S., Evaporation calculations from Lake Sennar (Sudan); a search for a meteorological minimum input approach for shallow lakes. **Netherlands Journal of Agricultural Science**. Wageningen, v. 38, p 725-730, 1990.

ABTEW, W. Evaporation estimation for Lake Okeechobee in South Florida, **Journal Irrigation Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.127, p. 140-147, 2001

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., **Crop evapotranspiration**. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 299 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56)

AMAYREH, J.A. **Lake evaporation**: A model study. 1995. 178p. Ph.D. Dissertation, Utah State University, Logan, Utah:1995.

AMBRUS, L., ANTAL, E., KARSAI, H.A., New electronic evaporation and rain measuring equipment. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 25, p. 35-43, 1981.

AMORIM NETO, M. da S. **Análise preliminar do desempenho de um sistema de medidas de evaporação para o tanque Classe A**. 1981. 75p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

ANA, A implementação da cobrança pelo uso de recursos hídricos e agência de água das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, SAG 2007, Disponível em [http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20080627143422_A implementação da cobrança.PCJ.pdf](http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20080627143422_A%20implementa%C3%A7%C3%A3o%20da%20cobran%C3%A7a.PCJ.pdf) , Acesso em 20 maio 2008.

ANA, Água: fatos e tendências, Brasília: ANA; CEBDS 2006, Disponível em: <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/Água,%20fatos%20e%20tendências.pdf> , Acesso em: 25 maio 2008.

ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. Variações da temperatura da água de um pequeno lago artificial ao longo do ano em Piracicaba-SP. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n.3, p. 431-438, 1995.

BLOEMEN, G.W. A high-accuracy recording pan-evaporimeter and some of its possibilities. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 39, p. 159-173, 1978.

BOWEN, I. S., The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface, **Physical Review**, New York, v. 27, p.779-787, 1926.

BRUIN, H. A. R. de, A Simple Model for Shallow Lake Evaporation, **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 17, p.1132-1134, 1978.

BRUTSAERT, W.; YEH, GT. Implications of a type of empirical evaporation formula for lakes and pans. **Water Resources Research**, Washington, v.6, n.4, p.1202-1208, 1970.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Dordrecht: D. Reidel Publishing , 1988. 299 p.

BURMAN, R.D.; POCHOP, L.O., **Evaporation, evapotranspiration and climatic data**, New York: ELSEVIER , 1994. 278p.(Developments in a Atmospheric Science, 22)
CAMARGO, A. P; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CHIN, D.A.; ZHAO, S. Evaluation of evaporation-pan networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.121, n.5, p.338-346, 1995.

CHOW, T.L. Design and performance of a fully automated evaporation pan. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.68, n 3/4, p.187-200, 1994.

DALTON, M.S.; AULENBACH, B.T.; TORAK, L.J., **Ground-water and surface-water flow and estimated water budget for Lake Seminole, northwestern Georgia and northwestern Florida**. Atlanta: Scientific Investigations Report, US Geological Survey,. 2004-5073, 2004.

DELCLAUX F., COUDRAIN, A., Optimal evaporation models for simulation of largelake levels: application to lake Titicaca, South America. **Geophysical Research Abstracts**, Katlenburg-Lindau, v. 7,p.166-172 , 2005

DELCLAUX, F.; COUDRAIN, A.; CONDOM, T., Evaporation estimation on Lake Titicaca: a synthesis review and modeling, **Hydrological Processes**, Chichester, v. 21, n°13, p.1664-1677, 2007.

DIAS, N.L.C.; KELMAN, J. Comparações entre modelos climatológicos e o uso de tanque classe A para estimar a evaporação no reservatório de Sobradinho. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador, BA. **Anais...** São Paulo: ABRH, v. 2, p. 162-169,1987.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for prediction of crop water requirements.**, 2nd .ed., Rome: FAO, 179p,1977. (FAO Irrigation and drainage Paper, 24)

EDINGER, J. E., DUTTWEILER, D. W., GEYER, J. C., The response of water temperature to meteorological conditions. **Water Resources Research**, Saint Louis, v. 4, p. 1137-1143, 1968.

FAO, Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/>, Acesso em: 25 jun. 2008

FINCH, J. W. A comparison between measured and modeled open water evaporation from a reservoir in south-east England, **Hydrology Processes**, Chichester, v. 15, p174-189, 2001

FU, G.; LIU, C. CHEN, S. HONG, J. .Investigation the conversion coefficients for free water surface evaporation of different evaporation pans, **Hydrological Processes**, Chichester, v. 18, p. 2247-2262, 2004.

GANGOPADHYAYA, M.; HARBECK, G.E.; NORDENSON, T.J.; OMAR, M.H.; URYVAEV, V.A. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**, 121p. Technical Note n. 83, World Meteorological Organization-WMO, Geneva, n.201, TP 105, 1966.

GATES, D. M. **Biophysical Ecology**. Springer-Verlag, New York, 1981. 610 p.

GUKOVAS, M., **Estudo comparativo da evaporação potencial estimada por evaporímetro tipo tanque “Classe A” e calculada por métodos empíricos no Estado de São Paulo**. 1981. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1981.

HANEREN, B. P. van, Na automated recording system for evaporation pans. **Water Resources Bulletin**, v.18, p.533- 536, 1982.

HOUNAM, C.E. **Comparison between pan and lake evaporation**. Geneva: WMO., 1973. 52 p. (Technical Note, 126)

IKEBUCHI, S., SEKI, M., OHTOH, A. Evaporation from Lake Biwa. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 102, p. 427-449, 1988.

KOHLER, M.A.; NOREDENSON, T.J.; FOX, W.E. Evaporation from pans and lakes. Boston, Weather Bureau Research, 1955. 21p. (Paper, 38)

KOHLER, M. A., PARMALE, L. H., Generalized estimates of free-water evaporation. U.S. **Wather Resources Research**, Saint Louis ,v. 3, n.4, p.997-1005, 1967.

LEITÃO, M. De M. V.B.R., OLIVEIRA, G.M de, LEITÃO,T.J.V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.6, p.585–593, 2007.

LINACRE, E.T. Climate and evaporation from crops. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Reton, v.93 (IR 4), p.61-79, 1967.

LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.64, n.3/4, p.237-256, 1993.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A.,
Construção e Avaliação de Psicrômetro Aspirado de Termopar. **Scientia Agricola**,
Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 839-844, 2001.

MORTON, F.I. Catchment evaporation and potencial evaporation - further development
of a climatologic relationships. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v.12 , p. 81-99, 1971.

MORTON, F.I. Operational estimates of areal evaporation and their significance to the
science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 66, p. 1-76,
1983a.

MORTON, F.I. Operational estimates of lake evaporation. **Journal of Hydrology**,
Amsterdam, v.66, p.77-100, 1983b.

MORTON, F.I. Practical estimates of lake evaporation . **Journal of Climate and Applied
Meteorology**, Boston, v. 25, p. 371-387, 1986.

MOSNER, M.S., AULENBACH, B.T. Comparison of methods used to estimate lake
evaporation for a water budget of lake Seminole, southwestern Georgia and
northwestern Florida In: GEORGIA WATER RESOURCES CONFERENCE, 2002
Georgia, **Proceedings...**Georgia, 2002. 45p.

NUNEZ, M.; DAVIES, J.A.; ROBINSON, P.J, Surface albedo at a tower site in Lake
Ontario. **Boundary Layer Meteorology**, Boston, v.3, p.77-86. 1972.

OLIVIER, M. **Irrigation and climate**. London: Edward Arnold, 1961. 262p.

OLIVEIRA, A.S. de, **Estudos comparativos da evaporação potencial estimada por
tanques e pelo método de Penman**. 1971. 112p. Tese (Livre Docência na área
de Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade
de São Paulo, Piracicaba, 1971.

OLIVEIRA, G.M. **Estudo da evaporação nas microrregiões do Cariri e Sertão da
Paraíba**. 2003. 203p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande,
Campina Grande, PB, 2003.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings
of the Royal Society**. A - Series, London, v.193, p.120-145, 1948.

PEREIRA, A.R. ; NOVA, N.A.V. Analysis of the Priestley-Taylor parameter.
Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v. 61, p. 1-9, 1992.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**.
Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A.; SHOCK, C.C. Estimation of reference evapotranspiration by a modified Bowen method. In: ANNUAL INTERNATIONAL IRRIGATION SHOW – THE IRRIGATION ASSOCIATION, 25.,2004. Tampa Bay, Florida. **Proceedings...** Omnipress, 2004. p.325-339.

PEREIRA, S.B., **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no Rio São Francisco**. 2004. 123p. Tese (Doutorado na área de Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

PHENE, C.J., CAMPBELL, R.B., Automating pan evaporation measurements for irrigation control. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 15, p. 181-191, 1975.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR R. J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, p. 81- 92, 1972.

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A.G.; VILLA NOVA, N.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH/Editora UFRJ, 1989, 404 p.

ROBINSON, J.M.; HUBBARD, K.G. Soil water assessment model for several crops in high plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 1141-1148, 1990.

ROQUE, R. O. ; SANSIGOLO, C. A. Estimativas de Evaporação do Lago de Taquaruçu, SP, pelo Modelo Conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 21-28, 2001.

ROQUE, R. O. **Estimativas de evapotranspiração espacial e evaporação de lagos no Pontal do Paranapanema pelo modelo conceitual de relação complementar de Morton**. 2000. 63 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

ROSENBERRY, D.O.; STURROCK, A. M.; WINTER, T.C. Evaluation of the energy budget method to determining evaporation at Williams lake, Minnesota, using alternative instrumentation and study approaches. **Water Resources Research**, Saint Louis, v. 29, n. 8, p.2473-2483, 1993.

ROSENBERRY, D. O.; STANNARD, D. I.; WINTER, T.C.; MARTINEZ, M.L. Comparison of 13 equations for determining evapotranspiration from a prairie wetland, Cottonwood Lake area, North Dakota, USA. **Wetlands**, Athens, v. 24, p. 483-497, 2004.

ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C.; BUSO, D. C.; LIKENS, G.E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 340, p. 149-166, 2007.

ROHWER, C. Evaporation from free water surfaces. **Technical Bulletin.**, Dublin: OCLC Online Computer Library Center, 1931.p32-39 (U.S. Department Agriculture, n. 271)

ROHWER, Carl, Evaporation from Salt Solutions and from Oil-covered Water Surfaces, **Journal of Agricultural Research**, Lahore, Pakistan, v. 46, p. 715-729, Jan-Jun 1933,

REIS, R. J.; DIAS, N. L., Multi-season lake evaporation: energu-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.208, n.3/4, p.135-147, 1998.

SADEK, M.F., SHAHIN, M.M., STIGTER, C.J., Evaporation from the reservoir of the High Aswan Dam, Egypt: a new comparison of relevant methods with limited data, **Theoretical and Applied Chmatorogy**, Austria, v. 56, p.57-66, 1997.

SARTORI, E. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. **Solar Energy**, Amsterdam, v.68, n.1, p.77-89, 2000.

SCHWINGEL, F.;ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Comparação de medidas de evaporação do tanque classe A com parafuso micrométrico e com sistema automático, In:CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA,12., 2001. Fortaleza. **Anais...**Fortaleza:Editora da SBago, 2001. p. 415-416,

SENTELHAS, P.C. ; NASCIMENTO, A.L.C. . Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global.. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 71-77, 2003.

SILANS, A.M.B.P.; Diminuição da evaporação em açudes do Nordeste através de plantas aquáticas. In: TUNDISI, J.G. (Org.). **Limnologia e manejo de represas**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 1988. v. 1 p. 344-370.

SIMON, E.; MERO F. A simplifield proceedure for the evaluation of the Lake Kinneret evaporation. **Journal of Hidrology**, Amsterdam, v.78, p.291-304, 1985.

SLEIGHT, R.B., Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural Research**, Lahore, Pakistan, v. 7, p.209-261, 1917.

SNYDER, R.L. Equation for evaporation pan to evapotranspiratin conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Jerusalem, v.118, n.6, p.977-980, 1992.

STEWART, R. B., ROUSE, W. R., A Simple Method for Determining the Evaporation from Shallow Lakes and Ponds, **Water Resources Research**, Saint Louis, v. 12, p. 623-628, 1976.

TAN, C.S.; FULTON, J.M. Ratio between evapotranspiration of irrigated crops from floating lysimeters and Class A pan evaporation, **Canadian Journal of Plant. Science**, Ottawa, v. 60, p. 197-201, 1980.

TAN, S.B.K., SHUY, E.B., CHUA, L.H.C., Modelling hourly and daily open-water evaporation rates in areas with an equatorial climate, **Hydrology Processes**, Chichester, v. 21, p. 486–499, 2007

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. **Meteorologia descritiva**. São Paulo: Nobel, 1981. 174p.

TROVATI, L.R. . Estimativas da evaporação do Lago de Ilha Solteira através do modelo de relação complementar In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987. Salvador, **Anais...** São Paulo: ABRH, 1987. v. 2 p. 162-167.

VALLET-COULOMB, C.; LEGESSE, D.; GASSE, F.; TRAVI, Y.; CHERNET, T. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 245, p. 1-18, 2001.

VARDAVAS, I.M., FOUNTOULAKIS, A. Estimation of lake evaporation from standart meteorological measurements: application to four Australian lakes in different climatic regions, **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.84, p. 139-150, 1996.

VILLA NOVA, N.A. **A estimativa da evaporação potencial no Estado de São Paulo**. 1967. 66p. Tese (Doutorado de Agrometeorologia - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1967

VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A. B.; PEREIRA, A.R. Ajustes de S e W da equação de Penman em função da média entre as temperaturas do psicrômetro. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n.3, p. 241-253, 2002.

VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A. B., Evapopluviômetro: Novo sistema de medida da evaporação em tanque classe A. **Irriga**, Botucatu, SP, v. 10, n. 1, p. 76-81, 2005.

VILLA NOVA, N.A.; MIRANDA, J.H.; PEREIRA, A.B; OLIVEIRA, K. Estimation of evapotranspiration by a simplified Penman-Method. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 713-721, 2006

VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V.P.; ANDRE, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter for the Amazon Forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.38, n.3/4, p.211-225, 1991.

VOLPE, C.A.; OLIVEIRA, A.D. de, Relações entre a evaporação medida em diferentes evaporímetros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 245-252, 2003.

VOLPE, C.A.; ANDRÉ, R.G.B.; VALARELLI, J.P. Comparação da evaporação medida em diferentes evaporímetros e em tanque padrão (20 m²). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 1983. Campinas, **Anais...**Campinas: IAC, 1983. p. 191-203.

WHITE, W.N., A method of estimating groundwater supplies based on discharge by plants and evaporation from soil: results of an investigation in Escalante Valley, Utah. USGS, **Water Supply Paper**, 659-A, 105 p., 1932.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, C. M.; O'DONNELL, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995-9005, 1985.

WINTER, T.C.; ROSENBERRY, D.O; STURROCK, A. M. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United States. **Water Resources Research**, Saint Louis, v. 31, p. 983-993, 1995.

WMO – World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation. Geneva: WMO, 1996. cap.10, p.1-7.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guide to meteorological instrument and observing practices. Geneva: WMO, 1971. 355 p. (WMO nº 8, TP,3).

YOUNG, A.A. Some recent evaporation investigations. **Transactions of the American Geophysical Union**, Houston, v. 28, p. 279-284, 1947.