

EVAPORAÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO LÍQUIDA NO RESERVATÓRIO DE FOZ DO AREIA

Akemi Kan

SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná
Caixa Postal 318 – CEP 80001-970 Curitiba, PR
akemi@simepar.br

Nelson L. Dias

SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná e UFPR – Universidade Federal do Paraná
Caixa Postal 318 – CEP 80001-970 Curitiba, PR
nldias@simepar.br

RESUMO

Estimativas de evapotranspiração regional, evaporação em lago e evaporação líquida são calculadas para o lago de Foz do Areia. A série de evapotranspiração é determinada pelo método do balanço hídrico sazonal (BHS) e pelo modelo hidrometeorológico de evapotranspiração mensal (HEM). A série de evaporação em lago é obtida por meio do método do balanço de energia-razão de Bowen. É feita uma comparação dessas estimativas com a série obtida e utilizada pela ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras). O resultado desta comparação é que a evaporação líquida do lago de Foz do Areia pode estar superestimada. A evaporação líquida média anual estimada pela ELETROBRÁS é de +192 mm, enquanto que neste trabalho foi obtido um valor de -322 mm, significando que a evapotranspiração é maior que a evaporação em lago.

INTRODUÇÃO

Para o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos de um reservatório, no setor elétrico principalmente, é necessário ter valores representativos de evapotranspiração (E_r), evaporação em lago (E_l) e evaporação líquida ($E_l - E_r$). O termo E_r refere-se à evapotranspiração correspondente à área do lago do reservatório, sem a presença do lago, supondo que essa região alagada mantivesse as mesmas características físicas anteriores ao represamento e; E_l representa a evaporação da superfície do lago propriamente dito. A obtenção de valores de evaporação líquida permite avaliar a quantidade de água que se perde ou se ganha com a construção de um reservatório.

Atualmente, a ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras) utiliza os modelos CRAE e CRLE (Complementary Relationship Areal Evapo-

transpiration, Morton, 1983a e Complementary Relationship Lake Evaporation, Morton, 1983b para estimar E_r e E_l , respectivamente. A série resultante desses modelos são 12 valores de evaporação líquida para cada reservatório, correspondentes a uma média para cada mês do ano (ver Sipot, 1998). Esta simplificação poderia não representar valores verossímeis, em razão da própria dinâmica do meio ambiente em que os reservatórios encontram-se inseridos e, também, da desconsideração da variação inter-anual de precipitação, vazão e demais variáveis meteorológicas.

A abordagem deste estudo é quantificar a evapotranspiração média mensal ($\langle E_r \rangle$) e evaporação em lago média mensal ($\langle E_l \rangle$), para avaliar a evaporação líquida média mensal ($\langle E_l \rangle - \langle E_r \rangle$) do lago do reservatório de Foz do Areia, pertencente à Companhia Paranaense de Energia (COPEL), entre 1982 e 1997, dentro da escala "hidrológica" de tempo e espaço. Esta classificação de escalas é feita por Klemes (1983), onde a escala de tempo hidrológica corresponde a períodos entre 10 e 100 anos e, o espaço físico, a escalas entre 10 e 100 km. Dentro deste contexto, pode-se referenciar os estudos realizados por Morton (1976) que estimou a evapotranspiração média anual de bacias hidrográficas como sendo a diferença entre as médias anuais de precipitação e vazão. Daniel (1976), usando dados de vazão e modelos analíticos de análise linear de recessões estimou, com sucesso, a evapotranspiração de uma bacia hidrográfica. Os modelos CRAE e CRLE, elaborados por Morton (1983a, b), determinam a evapotranspiração regional e evaporação em lago, utilizando a relação complementar proposta por Bouchet (1963), entre a evapotranspiração regional e potencial. Reis e Dias (1998), utilizando dados de medições de temperatura do ar e umidade relativa, vento e direção do vento, insolação e radiação solar, juntamente com as medições mensais dos

perfis de temperatura do lago do reservatório de Serra Azul, de propriedade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), em Minas Gerais, calcularam a evaporação do lago com o modelo CRLE para uma série mensal de 30 valores contínuos e a compararam com estimativas pelo método do balanço de energia. A maior discrepância encontrada foram as estimativas da taxa de variação de entalpia do CRLE. Recentemente, Dias e Kan (1998 e 1999) propuseram uma nova metodologia para estimar a evapotranspiração média mensal de bacias, através do método do balanço hídrico sazonal (BHS) e do modelo hidrometeorológico de evapotranspiração mensal (HEM). A aplicação dessa metodologia à bacia do rio Jangada, tributário do reservatório de Foz do Areia, possibilitou obter estimativas de evapotranspiração que obedecem por construção ao balanço hídrico e reproduzem corretamente os padrões mensais. Neste trabalho, a evaporação em lago do reservatório de Foz do Areia foi calculada pelo método do balanço de energia-razão de Bowen, utilizando os valores da taxa de variação de entalpia, determinados por Dias e Rocha (1999), juntamente com os dados meteorológicos de temperatura do ar, umidade relativa, insolação e medições de temperatura superficial da água. A série de evaporação líquida média mensal pode ser estimada pela diferença entre a evaporação em lago média mensal e evapotranspiração média mensal.

CARACTERÍSTICAS DO RESERVATÓRIO

O reservatório José Munhoz da Rocha Neto cujo codinome é Foz do Areia, de propriedade da Companhia Paranaense de Energia (COPEL), encontra-se situado a jusante do município de União da Vitória, no rio Iguaçu, na latitude 26°S e longitude $51^{\circ}40'\text{O}$, e a uma altitude de 600 m, ao sul do Estado do Paraná. Sua operação iniciou-se em 27 de março de 1986, a área de drenagem é de 29.900 km^2 e área da superfície do lago varia entre $141,90\text{ km}^2$ (máxima) e $55,88\text{ km}^2$ (mínima). Estão instaladas 4 turbinas com capacidade de 1.676 MW de potência efetiva e 5.779 MWh de energia média. A usina tem uma queda de referência de 135 m, um rendimento de 92% e perdas hidráulicas de 1,77 m (Sipot, 1998).

DADOS HISTÓRICOS

Para o cálculo da evapotranspiração e evaporação líquida para a região do lago do reserva-

tório de Foz do Areia, faz-se necessário dispor de dados hidrológicos e meteorológicos confiáveis. Na Tabela 1 são apresentados a localização e o período de funcionamento de cada estação que forneceu dados necessários para a elaboração deste trabalho.

A série de vazão natural do posto fluviométrico de União da Vitória (65310000) foi utilizada para a verificação da existência da relação entre vazão afluente do reservatório e evaporação líquida. Este posto abrange uma área de drenagem de 24.211 km^2 , onde as características físicas do tipo de solo e cobertura vegetal são mais heterogêneas quando comparadas com a bacia do rio Jangada, que corresponde a pouco menos de 5% dessa área. O rio Jangada é um afluente do rio Iguaçu e suas águas deságuam na margem esquerda do reservatório de Foz do Areia. A bacia do rio Jangada apresenta características similares às da região do reservatório, devido à contiguidade entre elas. Estes fatos permitem avaliar a evapotranspiração média mensal de Foz do Areia pelo cálculo da evapotranspiração da bacia do rio Jangada. Na Figura 1, pode-se observar que o comportamento das vazões médias mensais medidas nos postos Jangada (65370000) e União da Vitória (65310000), entre os períodos de 1982 a 1992, é muito parecido. Isto aponta para a similaridade dos processos físicos nas escalas hidrológicas, e reforça a hipótese de trabalho de utilizar a evapotranspiração mensal do rio Jangada como sucedâneo da evapotranspiração original da região alagada.

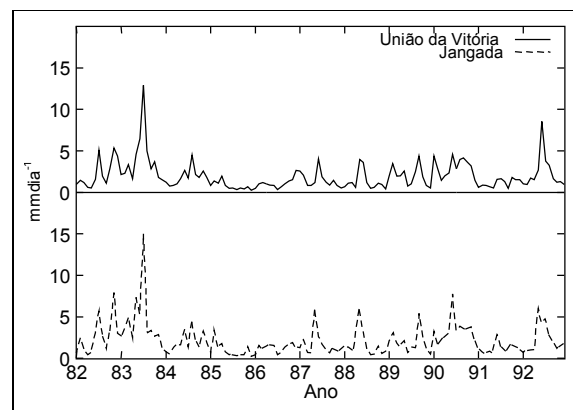


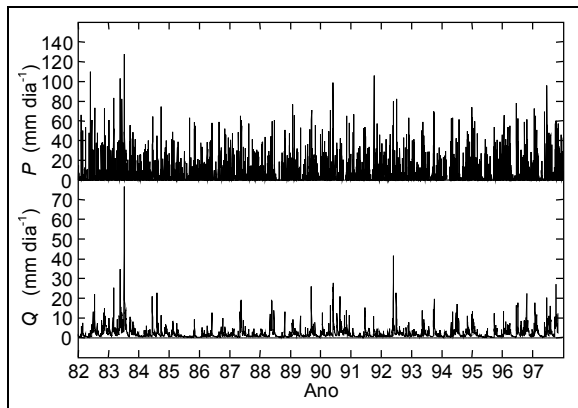
Figura 1. Comparação das vazões médias mensais das medições dos postos fluviométricos de União da Vitória (65310000) e Jangada (65370000) entre 1982 e 1992.

As séries diárias de precipitação e vazão referentes à bacia do rio Jangada foram utilizadas no cálculo de evapotranspiração média mensal

Tabela 1. Localização e período de funcionamento das estações meteorológicas, pluviométrica e fluviométricas estudadas.

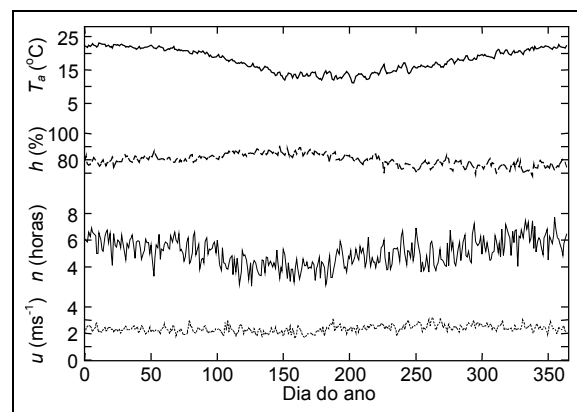
Estação	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Início e fim de funcionamento
Meteorológica de:					
- Foz do Areia (COPEL)	02651046	26° 05' S	51° 39' O	728	Mai/1981-Jul/1997
- Foz do Areia (SIMEPAR)	26055139	26° 00' S	51° 39' O	728	Abr/1997-em func.
- Palmas (IAPAR)	02651006	26° 29' S	51° 59' O	1091	Jan/1979-Dez/1996
Pluviométrica de:					
- Serraria São Sebastião (SUDERHSA)	02651010	24° 14' S	51° 20' O	950	Fev/1976-em func.
Fluviométrica de:					
				Área de drenagem (km ²)	
- Jangada (ANEEL)	65370000	26° 22' S	51° 15' O	1055	Nov/1945-em func.
- União da Vitória (COPEL-SUDERHSA)	65310000	26° 14' S	51° 04' O	24211	Mai/1930-em func.

pelo método BHS ($\langle E_{rb} \rangle$). Os dados de precipitação adotados são do posto pluviométrico de São Sebastião (02651010), situado dentro da bacia do rio Jangada, com uma série contínua e sem falhas, entre 1982 e 1997. Para este mesmo período, foi usada a vazão do rio Jangada, medida no posto Jangada (65370000). Estes dados hidrológicos estão plotados na Figura 2.

**Figura 2. Precipitação (P) e vazão (Q) para a bacia do rio Jangada entre 1982 e 1997.**

Falhas nas séries de medições das variáveis meteorológicas de temperatura do ar (T_a), umidade relativa (h), insolação (n) e vento (u), das estações meteorológicas de Foz do Areia (convencional - 02651046 - e telemétrica - 26055139) foram preenchidas com regressões com os dados da estação de Palmas (02651006 - Jan/79 a Dez/96). O resultado da média diária para o dia do ano des-

sas variáveis é mostrado na Figura 3. Estas séries de dados meteorológicos foram utilizadas nos cálculos das evapotranspirações médias mensais pelo modelo HEM ($\langle E_{rm} \rangle$) e, adicionando a elas as estimativas de temperatura da superfície da água (T_o), foi possível obter os valores de evaporação em lago média mensal ($\langle E_l \rangle$) pelo método do balanço de energia-razão de Bowen. Os dados de medições esporádicos de T_o entre 1982 e 1987, possibilitaram obter uma série razoável da mesma, através de um método de regressão não linear, com base na temperatura do ar e no dia do ano. A Figura 4 mostra os valores de T_o medidos no lago, bem como a sazonalidade existente.

**Figura 3. Climatologia diária da temperatura do ar (T_a), umidade relativa (h), insolação (n) e vento (u) da estação meteorológica de Foz do Areia.**

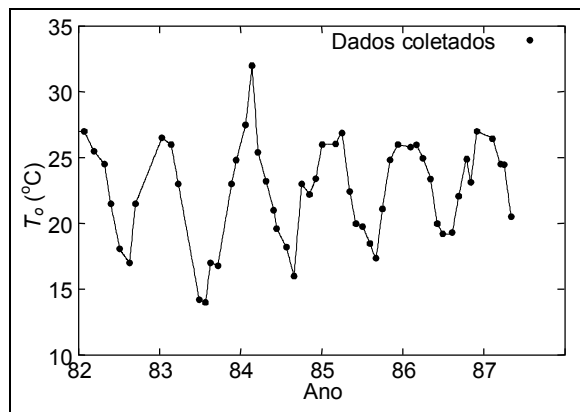


Figura 4. Temperatura da superfície da água do reservatório de Foz do Areia.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO (E_r)

Ao contrário da precipitação e vazão, a evapotranspiração é um dado de difícil mensuração, principalmente, quando se refere a uma bacia hidrográfica, mesmo para as de pequeno porte (1000 a 10000 km²). A sua determinação para a região do lago de Foz do Areia, fez-se mediante considerações entre as similaridades existentes com a bacia do rio Jangada. Por exemplo, a barragem e a bacia estão dentro de uma região onde prevalece a mata secundária, com alguns reflorestamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, e uma porção de floresta remanescente de *Araucaria angustifolia*. Tal fato, permite supor que, em regiões com características semelhantes e muito próximas umas das outras, as médias mensais de evapotranspiração sejam equivalentes; e a sua estimativa, para a bacia, represente satisfatoriamente a evapotranspiração média mensal desta região do reservatório sem o lago.

Os valores mensais de evapotranspiração, deste trabalho, foram calculados pelo método do balanço hídrico sazonal e um modelo hidrometeorológico de evapotranspiração. A descrição detalhada do método pode ser encontrada em Dias e Kan (1998 e 1999); na seqüência será feito um resumo.

A equação básica de balanço hídrico para uma bacia hidrográfica é:

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - E \quad (1)$$

onde S é o armazenamento da bacia, P é a precipitação, Q é a vazão na seção exutória, E é a evapotranspiração e t é o tempo. A principal restrição à aplicação da Equação (1) é a hipótese de que não

há perdas ou ganhos subterrâneos consideráveis. A qualidade das estimativas de evapotranspiração que se seguem, portanto, está necessariamente ligada à validade dessa hipótese. No rio Jangada, não há evidências baseadas no conhecimento geológico da região de que perdas ou ganhos subterrâneos sejam significativos.

Segundo Brutsaert (1982), durante uma longa recessão a precipitação é nula, permitindo que a Equação (1) seja escrita sob a seguinte forma:

$$\frac{dS}{dt} = -(Q + E) \leq -Q \quad (2)$$

Considerando que durante a recessão a bacia se comporte como um reservatório linear, pode-se dizer que o armazenamento é uma função de uma constante de tempo característica (T_r) e da vazão:

$$S = T_r Q \quad (3)$$

Dias e Kan (1998) obtiveram $T_r = 17$ dias para o rio Jangada por meio de análise linear de recessão, plotando $Q_{t+1} \times Q_t$, onde o índice t indica o dia. A análise de recessão do rio Jangada, que não é mostrada aqui, corrobora o modelo linear previsto pela Equação (3). Esta simplificação permite que se obtenha os valores de S ao fim das recessões da hidrógrafa. É possível então calcular a evapotranspiração média de períodos irregulares Δt entre os fins das recessões (vide Figura 5). De fato, integrando-se a Equação (1), obtém-se:

$$\frac{S_f - S_i}{\Delta t} = \langle P \rangle_{\Delta t} - \langle Q \rangle_{\Delta t} - \langle E_{rb} \rangle_{\Delta t} \quad (4)$$

onde o índice rb indica que a estimativa de evapotranspiração é feita pelo método do balanço hídrico sazonal, e $\langle \cdot \rangle_{\Delta t}$ indica uma média sobre Δt . Esta equação calcula o valor de evapotranspiração média do período Δt ($\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t}$), onde $\langle P \rangle_{\Delta t}$ e $\langle Q \rangle_{\Delta t}$ são as médias da precipitação e vazão do período Δt e, S_f e S_i são calculados pela Equação (3). Como Δt é irregular, os valores mensais de ($\langle E_{rb} \rangle$) foram obtidos pela média ponderada com valores sobre períodos adjacentes ao mês. A Figura 6 mostra o procedimento para o cálculo de $\langle E_{rb} \rangle_i$, referente ao mês i, conforme (5):

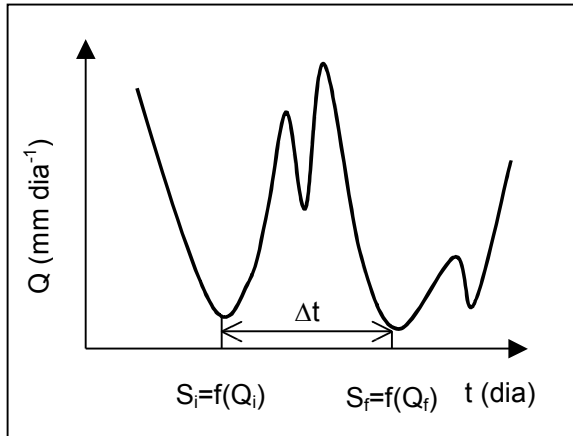


Figura 5. Determinação do início de um período e fim de uma recessão através de um hidrograma.

$$\langle E_{rb} \rangle_i = \frac{n_e \langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_e} + n_c \langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_c} + n_d \langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_d}}{n_e + n_c + n_d} \quad (5)$$

onde $\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_e}$, $\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_c}$ e $\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_d}$ são as estimativas sazonais sobre os períodos situados à esquerda, no centro e à direita dos limites do mês i , e n_e , n_c e n_d são os números de dias dentro do mês i de $\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_e}$, $\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_c}$ e $\langle E_{rb} \rangle_{\Delta t_d}$. As estimativas de E pelo método BHS, inevitavelmente, apresentam um padrão de variação temporal atenuado, como se fossem “médias móveis” dos reais valores mensais, devido à ocorrência de períodos Δt relativamente longos entre as recessões. Para solucionar este problema, Dias e Kan (1999) propuseram o uso de uma família de modelos hidrometeorológicos de evapotranspiração do tipo:

$$\frac{\langle E_{rm} \rangle_i}{\langle E_{sup} \rangle_i} = a + b(\langle P \rangle_i - \langle Q \rangle_i) + c(\langle e_a^* \rangle_i - \langle e_a \rangle_i) \quad (6)$$

onde $\langle \cdot \rangle$ indica uma média mensal, $\langle E_{sup} \rangle_i$ pode ser a radiação líquida, a evaporação potencial de Penman ou a evaporação potencial de Priestley-Taylor, a , b e c são obtidos por regressão múltipla com valores de $\langle E_{rb} \rangle_i$ sobre períodos $\Delta t \leq 45$ dias, e $\langle e_a^* \rangle_i - \langle e_a \rangle_i$ é o déficit de pressão de vapor d'água. Neste trabalho, utilizou-se a evaporação Penman com base no critério de melhor ajuste da Equação (6). A Tabela 2 mostra os valores de a , b

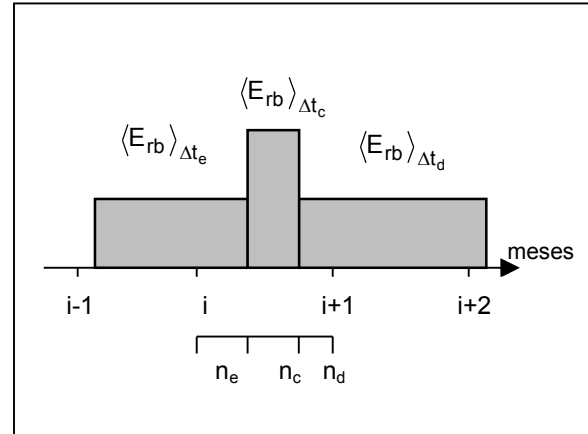


Figura 6. Determinação de $\langle E_{rb} \rangle_i$.

e c obtidos. As séries mensais de $\langle E_{rb} \rangle_i$ e $\langle E_{rm} \rangle_i$ são mostradas na Figura 7. Finalmente, para que as estimativas de evapotranspiração atendessem por construção ao balanço hídrico de longo curso da bacia, os valores de $\langle E_{rm} \rangle_i$ foram ligeiramente corrigidos por:

$$\langle E_r \rangle_i = \frac{\sum_{j=1}^n \langle E_{rb} \rangle_j}{\sum_{j=1}^n \langle E_{rm} \rangle_j} \langle E_{rm} \rangle_i \quad (7)$$

onde i, j é o número do mês e n número total de meses para o período de 1982 a 1997. Observe que a Equação (7) produz estimativas mensais de evapotranspiração que obedecem por construção ao balanço hídrico de longo período. O resultado final da evapotranspiração ($\langle E_r \rangle$) está apresentado na Figura 8, juntamente com as médias mensais da precipitação e vazão da bacia do rio Jangada.

Tabela 2. Coeficientes de regressão múltipla da Equação (6).

Coeficiente	Valor
verão (outubro a março)	
a	0.76393
b	0.10831
c	-0.00046
inverno (abril a setembro)	
a	2.39735
b	0.10291
c	-0.00383

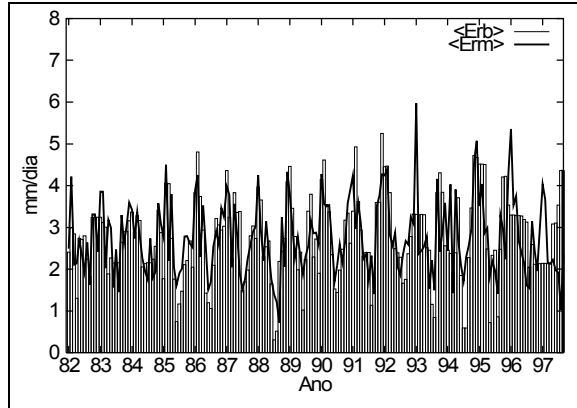


Figura 7. Estimativas de evapotranspiração pelo método BHS ($\langle E_{rb} \rangle$) e modelo HEM ($\langle E_{rm} \rangle$) para o período de 1982 a 1997.

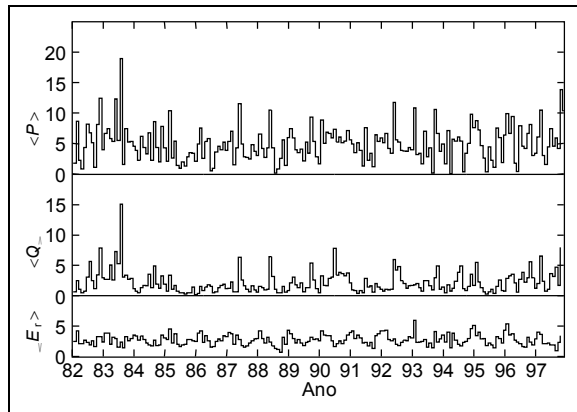


Figura 8. Precipitação, vazão e evapotranspiração médias mensais para o período de 1982 a 1997 em mm.dia⁻¹.

EVAPORAÇÃO EM LAGO (E_l)

O fluxo de calor latente médio mensal do lago de Foz do Areia é estimado pelo método do balanço de energia-razão de Bowen. A equação do balanço de energia é:

$$\langle R_{lo} \rangle = \langle LE_l \rangle + \langle H \rangle + \langle D \rangle \quad (8)$$

onde: $\langle R_{lo} \rangle$ é a média mensal da radiação líquida na superfície da água; $\langle LE_l \rangle$ é a média mensal do fluxo calor latente; $\langle H \rangle$ é a média mensal do fluxo calor sensível e; $\langle D \rangle$ é a taxa de variação da entalpia do lago. A razão de Bowen (B_o) é dada por:

$$B_o = \frac{\langle H \rangle}{\langle LE_l \rangle} \quad (9)$$

Utilizando as Equações (8) e (9):

$$\langle LE_l \rangle = \frac{\langle R_{lo} \rangle - \langle D \rangle}{1 + B_o} \quad (10)$$

onde

$$B_o = \frac{c_p p}{0,622L} \frac{\langle T_o \rangle - \langle T_a \rangle}{\langle e_a^* \rangle - \langle e_a \rangle} \quad (11)$$

c_p é o calor específico a pressão constante do ar ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); p é a pressão atmosférica na região do reservatório, considerando uma altitude média de 600 m, e L é o calor latente de evaporação expresso em função de T_o (ver Brutsaert, 1982 p.41); $\langle T_o \rangle$ é a média mensal da temperatura da superfície da água estimada; $\langle T_a \rangle$ é a média mensal da temperatura do ar medida na estação meteorológica; $\langle e_a^* \rangle$ é a média mensal dos valores diários da pressão de saturação do vapor d'água à temperatura T_a e; $\langle e_a \rangle$ é a média mensal dos valores diários da pressão de vapor d'água à temperatura T_a . A estimativa de T_o foi feita utilizando a série de dados existentes da temperatura da superfície do lago, em períodos esparsos entre 1982 e 1987, no reservatório de Foz do Areia. Plotando esses dados para cada dia do ano, conforme mostra a Figura 9, verificou-se que existe uma relação cossenoidal dentro do ano e cíclica ao longo dos anos; o mesmo ocorre em relação à média mensal de T_a plotada no último dia de cada mês, como pode ser observado na Figura 10. A equação básica que ajusta tanto T_o quanto T_a é dada por:

$$T = f(i_a) = c_a \cos \left[(i_a + c_b) \frac{2\pi}{365} \right] + c_c \quad (12)$$

onde c_a , c_b e c_c são coeficientes de regressão e i_a é o dia do ano (varia de 1 a 365). A análise estatística do ajuste de regressão está apresentada na Tabela 3, onde r^2 é o coeficiente de determinação e s é o erro padrão de estimativa. A utilização da temperatura média mensal deve-se ao fato da oscilação térmica do ar ser muito grande de um dia para o outro, enquanto que a temperatura da superfície da água mantém-se praticamente constante. Para a utilização das Equações (10) e (11), em princípio seria necessário dispor de dados médios diários de temperatura da superfície do lago.

Na ausência de medições diárias rotineiras de T_o , procurou-se construir uma equação empírica, baseada nos valores diários de temperatura do ar e com boa capacidade de prever os valores medidos disponíveis (vide Figura 4):

$$T_o = \frac{f_o(i)}{f_a(i)} \langle T_a \rangle_{23} \quad (13)$$

onde $f_o(i)$ e $f_a(i)$ são as temperaturas da superfície da água e do ar, respectivamente, calculadas pela Equação (12) para o dia i_a , e $\langle T_a \rangle_{23}$ é a temperatura média do ar medida dos últimos 23 dias, onde o período de 23 dias foi obtido por tentativa e erro. O modelo final resultante para T_o tem um coeficiente de determinação (r^2) igual a 0,7921 e o erro padrão de estimativa (s) igual a 1,54°C. A Figura 11 mostra o resultado do modelo para o período de 1982 a 1987.

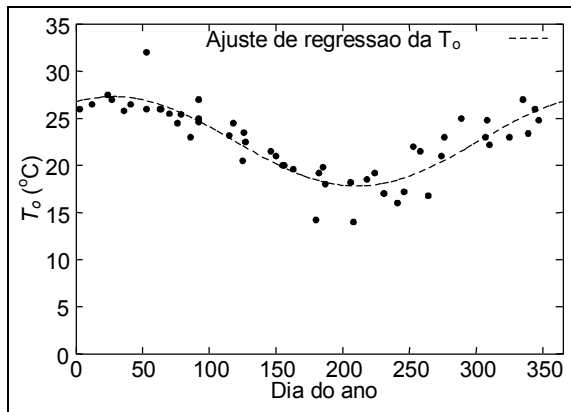


Figura 9. Temperatura da água (T_o) observada para o dia do ano no período de 1982 a 1987 no reservatório de Foz do Areia.

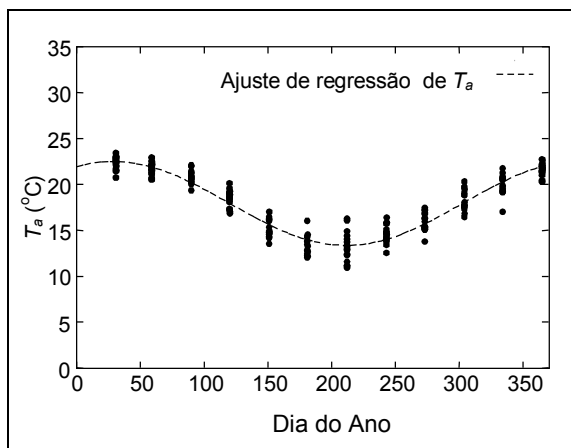


Figura 10. Temperatura média mensal do ar (T_a) observada para o mês do ano no período de 1982 a 1997 na estação de Foz do Areia.

Tabela 3. Análise estatística de T_o e T_a .

Temperatura (°C)	r^2	$s(^{\circ}\text{C})$
T_a	88,43	1,3
T_o	79,15	1,9

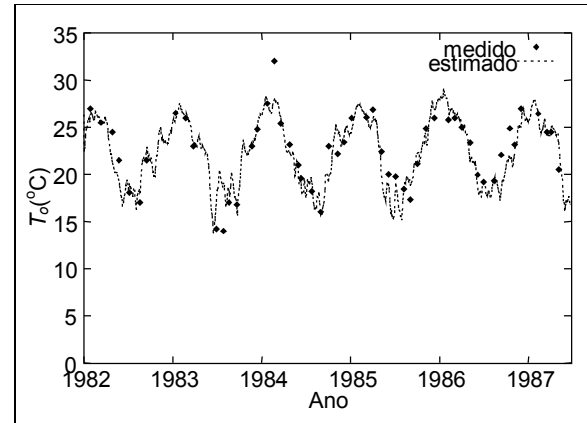


Figura 11. Temperatura d'água (T_o) observada e calculada para o período de 1982 a 1987 no reservatório de Foz do Areia.

A entalpia do lago de Foz do Areia foi calculada por Dias e Rocha (1999). A taxa de variação de entalpia do lago de Foz do Areia foi obtida com análise dos perfis de temperatura do lago e, os valores médios do período de 1984 a 1986 referentes a cada mês encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Taxa de variação da entalpia média mensal em Wm^{-2} .

Mês	Valor
Janeiro	70,74
Fevereiro	38,36
Março	-5,55
Abril	-93,38
Maio	-118,46
Junho	-92,75
Julho	-53,21
Agosto	-20,27
Setembro	63,30
Outubro	58,57
Novembro	70,55
Dezembro	85,38
Soma	3,28

Utilizando a Equação (11), calcula-se B_o . As médias mensais do fluxo de calor latente são calculadas com a Equação (10). Os resultados de

$\langle E_l \rangle$ apresentam valores negativos nos meses de setembro, pois $\langle R_{lo} \rangle - \langle D \rangle$ é negativo nesse mês. Valores mensais negativos de $\langle E_l \rangle$ são pouco prováveis, e com o intuito de eliminar esses valores, fez-se a interpolação com os valores dos meses de agosto e outubro. Finalmente, o fluxo de calor sensível ($\langle H \rangle$) é calculado pela Equação (8). Na Figura 12 estão plotados os valores de $\langle R_{lo} \rangle$ e $\langle D \rangle$, e as estimativas de $\langle LE_l \rangle$ e $\langle H \rangle$. Observa-se que nos períodos de primavera ocorre, freqüentemente, a inversão do fluxo de calor sensível ($\langle H \rangle < 0$).

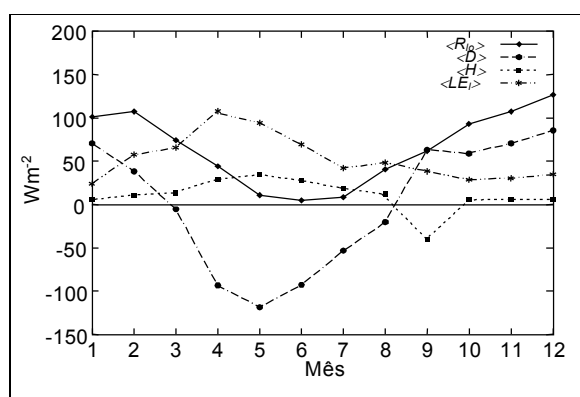


Figura 12. Radiação líquida da superfície ($\langle R_{lo} \rangle$), taxa de variação da entalpia ($\langle D \rangle$), fluxo de calor sensível ($\langle H \rangle$) e fluxo de calor latente ($\langle LE_l \rangle$) do lago de Foz do Areia entre 1982 e 1997.

CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO LÍQUIDA E ASSOCIAÇÃO COM A VAZÃO AFLUENTE

O cálculo da evaporação líquida média baseia-se na diferença entre $\langle E_l \rangle$ e $\langle E_r \rangle$. O método do balanço de energia foi utilizado para obter a evaporação em lago por ser o único suficientemente preciso para este fim. De fato, as dificuldades do balanço hídrico de reservatórios são notórias, enquanto que existem inúmeros casos de aplicações bem sucedidas do balanço de energia em lagos. Já no caso da evapotranspiração, ocorre o oposto: o balanço de energia sobre uma região de florestas é extremamente complexo e requer instrumentação especial, não podendo ser realizado com dados

meteorológicos convencionais. Por outro lado, o balanço hídrico é bastante robusto, mesmo em escalas temporais inferiores a um ano, desde que o armazenamento da bacia seja devidamente levado em consideração, ao mesmo tempo em que a Equação (6) é uma forma conveniente de obter valores confiáveis de evapotranspiração mensal (Dias e Kan, 1999). Portanto, embora metodologias diferentes tenham sido utilizadas para obter $\langle E_l \rangle$ e $\langle E_r \rangle$, elas são em cada caso, as mais apropriadas ao problema.

A evaporação líquida está plotada, juntamente com $\langle E_l \rangle$ e $\langle E_r \rangle$, na Figura 13. A natureza da vegetação e o clima da região fazem com que a evapotranspiração seja maior que evaporação em lago durante a maior parte do ano, produzindo uma evaporação líquida negativa. A figura mostra ainda que a evapotranspiração máxima ocorre no período de verão e a mínima, no inverno. Observa-se que há uma defasagem da evaporação em lago em relação à evapotranspiração. A evaporação em lago atinge o seu máximo no outono e o seu mínimo na primavera. Os resultados da evaporação líquida apresentam os máximos nos outonos e mínimos nos verões.

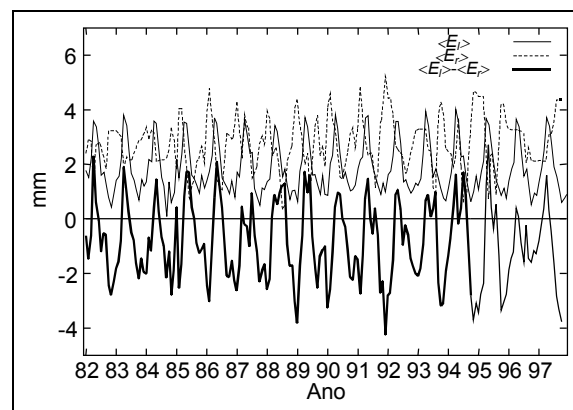


Figura 13. Evaporação do lago, evapotranspiração e evaporação líquida do reservatório de Foz do Areia entre 1982 e 1997.

A escassez de informação meteorológica sobre períodos mais longos do passado e a complexidade de algumas simulações energéticas, fizeram com que se propusesse calcular a evaporação líquida em função da vazão afluente. Um modelo matemático simples foi proposto originalmente por F. L. S. Gomide, e alguns resultados foram apresentados em um *Workshop* da

ELETROBRÁS (1997) sobre evaporação, realizado em Curitiba em outubro de 1997. Se fosse possível estabelecer uma relação entre evaporação líquida e vazão afluyente, isso simplificaria as simulações energéticas do sistema elétrico brasileiro (Kamogawa, 1998, comunicação pessoal). Visando investigar essa relação, foi plotada na Figura 14 a vazão afluyente medida na estação de União da Vitória contra a evaporação líquida do reservatório de Foz do Areia. A figura mostrou que não existe nenhuma relação aparente entre elas. Portanto, não é possível fazer estimativas de evaporação líquida com dados de vazão afluyente ao reservatório.

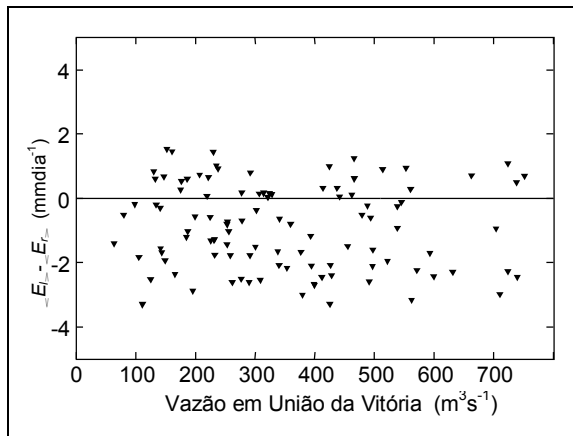


Figura 14. Relação entre a vazão de União da Vitória e a evaporação líquida de Foz do Areia para período o de 1982 a 1992.

Na Figura 15 estão plotadas as evaporações líquidas aqui estimadas e as adotadas pela ELETROBRÁS (uma série de apenas 12 valores, correspondente à média mensal). A figura mostra que a evaporação líquida calculada neste estudo é sempre inferior em relação à série adotada pela ELETROBRÁS e a área hachurada é a diferença entre elas.

CONCLUSÃO

As estimativas mensais de evapotranspiração, evaporação em lago e evaporação líquida são importantes não só para o entendimento do ciclo hidrológico, como também para auxiliar o planejamento energético do sistema elétrico e a operação dos reservatórios. A área de inundação do reservatório de Foz do Areia é muito pequena, variando de 55,88 km² a 141,90 km², correspondendo a menos de 0,5% da área total de drenagem

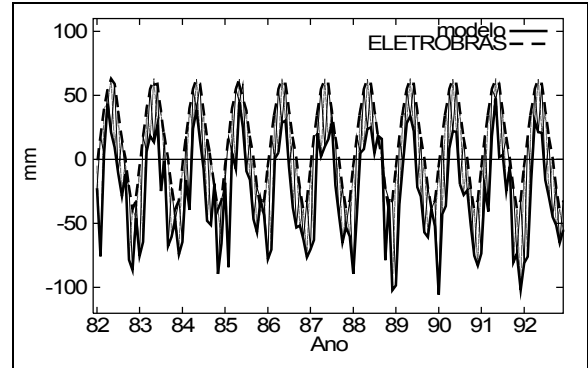


Figura 15. Comparação entre as evaporações líquidas estimada pelo modelo e utilizada pela ELETROBRÁS.

(29.900 km²). Em razão disso, quando os resultados deste trabalho são convertidos para unidades de energia, a energia perdida pela evaporação deste reservatório nunca é superior a 1% da energia afluyente. A utilização do método BHS e do modelo HEM permite estimar taxas de evapotranspiração que obedecem ao balanço hídrico da bacia, e reproduzem os padrões mensais. De acordo com os resultados deste trabalho, a região do lago de Foz do Areia apresenta características físicas e climáticas tais que a evapotranspiração é quase sempre superior à evaporação em lago, resultando em uma evaporação líquida negativa, cujo valor médio anual é -322 mm. Enquanto isso, a evaporação líquida média anual utilizada pela ELETROBRÁS é de +192 mm. Nossos resultados foram obtidos com base no balanço hídrico da bacia do rio Jangada e no balanço de energia do lago de Foz do Areia, a partir de dados diários meteorológicos e hidrológicos, enquanto que os modelos CRAE/CRLE utilizados pela ELETROBRÁS usam apenas dados meteorológicos médios mensais de longo período. Supondo que nossos resultados estejam corretos, o valor da ELETROBRÁS pode estar superestimado. Tanto os resultados deste trabalho quanto os da ELETROBRÁS utilizam apenas dados rotineiramente medidos em estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas. Estimativas mais precisas de evapotranspiração e evaporação em lago poderiam ser obtidas pela aplicação de medições diretas com o método de covariâncias turbulentas; note-se entretanto que isto exigiria um considerável esforço experimental e de processamento de dados. Constatou-se também que na época da primavera, ocorre a inversão do fluxo de calor sensível no lago de Foz do Areia. Por fim, foi testada a dependência entre a evapora-

ção líquida e vazão afluente ao reservatório. Os resultados indicaram que não existe nenhuma relação aparente entre elas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao engenheiro Luís Kamogawa, da COPEL, pelas informações fornecidas sobre evaporação líquida do reservatório de Foz do Areia, bem como pelos esclarecimentos sobre custo marginal de operação. Os comentários e sugestões de dois revisores anônimos ajudaram a melhorar a versão original do texto.

REFERÊNCIAS

- BOUCHET, R. J., (1963). *Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle, et production agricole*. Ann. Agron., v.14, p743-824.
- BRUTSAERT, W., (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. D. Reidel, Dordrecht.
- DANIEL, J. F., (1976). Estimating groundwater evapotranspiration from streamflow records. *Water Resources Research*, v.12, p360-364.
- DIAS, N. L. & KAN, A., (1998). *Um modelo hidrológico-meteorológico para estimativa da evapotranspiração em bacias hidrográficas*. Relatório Técnico 004, Simepar, Curitiba.
- DIAS, N. L. & KAN, A., (1999). A hydrometeorological model for basin-wide seasonal evapotranspiration. Submetido para *Water Resources Research*.
- DIAS, N. L. & ROCHA, L. S., (1999). Cálculo da taxa de variação da entalpia para os lagos de Itaipu e Foz do Areia. Submetido para *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.
- KLEMES, V., (1983). Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology*, v.65, p1-23.
- MORTON, F. I. (1976). Climatological estimates of evapotranspiration. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, v.102 (HY3), p275-291.
- MORTON, F. I. (1983a). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, v.66, p1-76.
- MORTON, F. I. (1983b). Operational estimates of lake evaporation. *Journal of Hydrology*, v.66, p77-100.
- REIS, R. J. & DIAS, N. L. (1998). Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. *Journal of Hydrology*, v.208, p135-147.
- SIPO (1998). *Sistema de informação do potencial hidrelétrico brasileiro*. Versão 3.2, ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras).

Evaporation, Evapotranspiration and Net Evaporation in the Foz do Areia Reservoir

ABSTRACT

Estimates of lake evaporation, evapotranspiration and net evaporation are calculated for the Foz do Areia Reservoir. The methodology used to calculate the evapotranspiration was the seasonal water budget (SWB) method and the hydrometeorological evapotranspiration monthly (HEM) model. Lake evaporation was computed by energy budget-Bowen ratio method. Taking net evaporation as the difference between lake evaporation and regional evapotranspiration, these results can be compared with the ELETROBRÁS (The Brazilian Electricity Company) estimates for the same site. Our estimates are -322 mm year⁻¹, as compared with the ELETROBRÁS' estimate of +192 mm year⁻¹, showing the considerable uncertainty involved. Our results also show that the construction of dams in temperate regions may very well increase water availability.