

# UMA AVALIAÇÃO SISTEMÁTICA DAS CORREÇÕES DO MÉTODO DE COVARIÂNCIAS TURBULENTAS ATENUADAS PARA A MEDIÇÃO DE EVAPORAÇÃO EM LAGOS

*Dornelles Vissotto Jr.<sup>1</sup> Nelson Luís Dias<sup>2</sup>; Diana Maria Cancelli<sup>3</sup>;*

**RESUMO** — Este artigo descreve as correções aplicadas às medições micrometeorológicas de evaporação pelo método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA). As correções envolvidas incluem levar em conta algumas condições teóricas para a validade da teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (SMO) como pista de vento, homogeneidade espacial e estacionariedade; os tempos de resposta dos sensores utilizado no sistema de medições, e também ao efeito das flutuações de temperatura sobre a densidade do ar úmido (a correção de Webb-Pearlman-Leuning). São mostrados resultados preliminares para uma série de dados de aproximadamente 2 anos com curtas interrupções para evidenciar que as correções são medidas necessárias para a utilização dos dados horários de fluxos. Os efeitos dessas correções em medidas de longo prazo também são descritos.

**ABSTRACT** — In this paper, we address several corrections which need to be applied to the measurement of lake evaporation with the Attenuated Eddy-Covariance Method (AEC). The corrections involved include taking into account the theoretical conditions necessary for the validity of Monin-Obukhov Similarity (MOS) Theory, namely fetch, spatial homogeneity and stationarity; those that take into account the limited response time of some of the sensors; and those that take into account the density fluctuations of moist air (the Webb-Pearlman-Leuning correction). Preliminary results, for almost two years of measurements with some interruptions, show that the corrections are important for hourly flux data. The effect of those corrections on long-term measurements is also addressed.

**Palavras-chave:** Teoria de similaridade de Monin-Obukhov – evaporação em lagos – método de covariâncias turbulentas.

---

<sup>1</sup>Professor Assistente, Lemma–UFPR; E-mail [dvissotto@ufpr.br](mailto:dvissotto@ufpr.br)

<sup>2</sup>Professor Associado, Lemma–UFPR: CP 19100 Curitiba PR 81531-990. E-mail [nldias@ufpr.br](mailto:nldias@ufpr.br)

<sup>3</sup>Professora, Universidade de Passo Fundo. E-mail [cancelli@upf.br](mailto:cancelli@upf.br)

## 1 – INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios no planejamento e gerenciamento de grandes reservatórios (grandes lagos) ainda é uma correta estimativa para as variáveis do balanço hídrico. Este trabalho trata especificamente das correções que são necessárias na medição de evaporação em lagos utilizando um método específico — o método de covariâncias turbulentas atenuadas, proposto por Dias et al. (2002) e Dias et al. (2007).

A estimativa da evaporação em grandes lagos, no Brasil, está diretamente ligada ao problema de gerenciamento de energia do setor elétrico, dado que mais de 90% de nossa geração é hidrelétrica. Ela também é extremamente importante todas as vezes em que há escassez de água no sistema, ou quando *estimativas* de evaporação são usadas para o planejamento da operação do sistema, ou para decisões operativas (Kamogawa, 1989; Neto et al., 1990; Kelman et al., 2004).

Embora em períodos “normais” a evaporação em lago seja um termo pequeno do balanço hídrico de reservatórios, ela ganha importância em períodos de seca, além de ser uma variável importante no projeto e na operação de reservatórios. Nos últimos anos, o método de covariâncias turbulentas (MCT) tem se mostrado uma alternativa viável para a medição de evaporação em lagos, tanto no Brasil (Dias e Malheiros, 2003; Dias et al., 2007), quanto em outras regiões do mundo (Assouline e Mahrer, 1993; Blanken et al., 2000). Este método possibilita a utilização de instrumentação compacta, mas requer um tratamento estatístico considerável. Neste trabalho, nós abordamos algumas das etapas necessárias para a obtenção de estimativas horárias de evaporação a partir de medições de turbulência em uma torre micrometeorológica.

Os dados analisados neste trabalho resultaram da aplicação do método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) sobre o lago de Furnas, no município de Guapé (20°44'S, 45°58'O, 771.8 m). Durante a operação normal o reservatório apresenta uma profundidade média de 13m e máxima de 90 m. Aproveitando a seca de 2000–2001, foi erguida uma torre metálica de 25 m no meio do lago, que com o nível do reservatório reestabelecido proporcionou a montagem de um sistema medições estável em uma “ilha” artificial. O *fetch* disponível é de cerca de 1000 m norte da torre e mais de 3000 m ao leste, com as condições menos favoráveis de 420 m nordeste e 440 m sudoeste.

Um ponto importante na aplicação do MCT é que tem sido cada vez mais comum a utilização de rotação de coordenadas (Finnigan et al., 2003; Finnigan, 2004), e a agora bem-estabelecida correção de Webb-Pearman-Leuning para as flutuações de densidade (Webb et al., 1980) no cálculo de  $E$ ; a aplicação simultânea de ambas, entretanto, é inconsistente (Massman e Lee, 2002; Dias et al., 2007) e as implicações destas correções para medições em lagos precisam ser mais bem estudadas. Neste trabalho, nós começamos a fazer isto.

## 2 – O MÉTODO DE COVARIÂNCIAS TURBULENTAS ATENUADAS

Neste trabalho utilizou-se o Método de Covariâncias Turbulentas Atenuadas de Dias et al. (2002) e Dias et al. (2007). Entretanto, além das correções para tempo de resposta descritas neste último trabalho, aplicou-se também correções para a direção do vento e para as flutuações de densidade do ar úmido. Um resumo de outras metodologias disponíveis, e de suas vantagens e desvantagens, pode ser encontrado em Dias et al. (2008).

Para o melhor aproveitamento do *fetch* de medição, o anemômetro sônico, que é o cerne do sistema de medição de flutuações turbulentas de velocidade para posterior cálculo dos fluxos turbulentos de calor latente e de calor sensível, foi alinhado com a direção norte e colocado a uma altitude total de 771.8 m, uma altura de 4.55 m (em média) acima do nível d'água em 03 de junho de 2003.

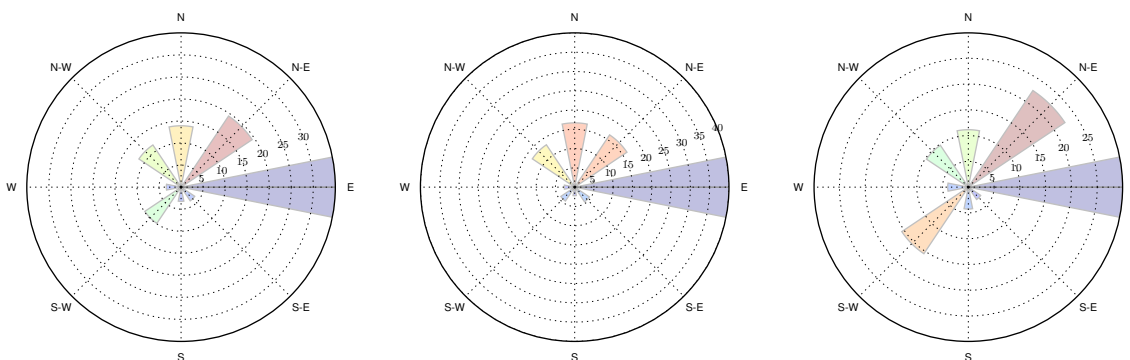
### 2.1 – Caracterização do *fetch* de medição

O *fetch* de medição é um dos pontos mais críticos na aplicação do MCT, pois a própria teoria que embasa o método contém uma série de hipóteses sobre o mesmo, entre elas uma superfície

Tabela 1: Tabela com frequência de ventos nas direções cardinais

Direção	Frequência
E	34%
NE	13%
N	12%
NO	9%
O	5%
SO	18%
S	3%
SE	6%

Figura 1: Rosa dos ventos no verão (Todo o período - Diurnos - Noturnos)

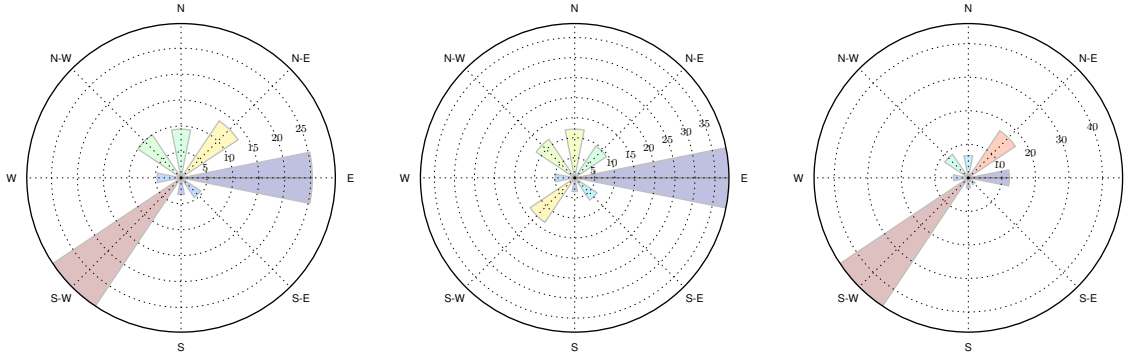


homogênea, plana e sem obstáculos. Para a aplicação do método sobre lagos, são necessárias medições desobstruídas no “meio” da superfície do lago. Neste ponto a torre metálica construída favorece enormemente o *fetch* de medição, e dadas as grandes distâncias das margens praticamente elimina os efeitos da interferência dos fluxos terrestres de energia nas medições dos mesmos fluxos sobre o lago. Entretanto, devido ao alinhamento dos sensores ao norte, a própria torre cria um efeito de esteira turbulenta sobre as medições realizadas quando o vento vem do lado oposto (sul-oeste), devido a arraste provocado pelo obstáculo aerodinâmico que a própria torre apresenta, influenciando o comportamento da dinâmica da turbulência nas medições para estas direções opostas. Este comportamento foi avaliado em detalhe por Bernardes e Dias (2005) e Dias et al. (2005) onde se mostra que, por exemplo, as medições de velocidade de atrito  $u_*$  ficam consideravelmente prejudicadas. Sendo assim, é necessário “filtrar” os dados disponíveis em função da direção do vento.

As rosas dos ventos para todos os dados de medição mostram que na maioria das vezes as direções do vento são favoráveis às medições (Tabela 1). Note que a preponderância das direções E, NE e N significa que a maior parte dos fluxos é corretamente medida. Mesmo assim, uma análise mais criteriosa sobre os períodos de medição foi realizada, separando-se os dados por estação do ano e em dados diurnos e noturnos. Os resultados para o verão e para o outono são mostrados nas figuras 1 e 2.

A análise destas figuras mostra que durante o dia os ventos sopram quase que exclusivamente de leste, enquanto que o comportamento noturno é muito diferente dependendo da estação do ano. No verão, os ventos sopram de nordeste à noite, o que ainda é uma direção muito favorável do ponto de vista da orientação do anemômetro sônico. Já no outono, há uma mudança visível, com os ventos

Figura 2: Rosa dos ventos no outono (Todo o período - Diurnos - Noturnos)



noturnos soprando majoritariamente de sudoeste. Nesta direção, as medições com o MCTA não são confiáveis devido ao efeito da esteira da torre comentado acima, e devem ser descartadas ou substituídas por outras estimativas.

### 3 – CORREÇÕES NAS MEDIÇÕES

Neste trabalho adota-se uma decomposição de Reynolds para as variáveis da forma

$$A = \bar{A} + a, \quad (1)$$

onde  $A$  é o valor instantâneo de uma variável,  $\bar{A}$  é a sua média, e  $a$  é a sua flutuação turbulenta. Estritamente falando,  $\bar{A}$  é uma média probabilística ou de conjunto, e em micrometeorologia ela é costumeiramente estimada por uma média amostral no tempo, via a hipótese de que o escoamento é estacionário e ergódico. As 3 componentes do vento são denotadas  $U$ ,  $V$  e  $W$ .

#### 3.1 – Rotação de coordenadas

O objetivo da rotação de coordenadas é alinhar o eixo  $x$  das medidas tridimensionais do anemômetro com o vetor médio do vento para o período de medição. Esta é uma medida necessária para garantir que as componentes  ${}_1\bar{V} = 0$  e  ${}_1\bar{W} = 0$  na média (ver definição de  ${}_1\bar{U}$ ,  ${}_1\bar{V}$  e  ${}_1\bar{W}$  abaixo), adequando a medição à teoria SMO.

O esquema para rotação de coordenadas 3D alinha o eixo cartesiano  $x$  com o vetor médio do vento. Esta rotação pode ser realizada através de uma rotação no plano  $xy$ , em torno do eixo  $z$ , e outra rotação no plano  $xz$ , em torno do eixo  $y$ .

Consideramos o sistema coordenado inicial do anemômetro rígido em  $(x, y, z)$ . O próximo passo é identificar o ângulo de rotação no plano horizontal através da expressão:

$$\alpha_x = \arctg(\bar{V}/\bar{U}), \quad (2)$$

onde  $\alpha_x$  é o ângulo entre  $x$  e o vetor médio do vento nas componentes  $x, y$ .

Rotacionando o plano  $xy$  em torno de  $z$  um ângulo de  $\alpha_x$  orientamos o eixo cartesiano  $x$  com o vetor médio do vento  $xy$  em um novo sistema coordenado  ${}_1x, {}_1y, {}_1z$ . Note que com esta rotação  ${}_1\bar{U} = \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2}$ ,  ${}_1\bar{V} = 0$  e  ${}_1\bar{W} = \bar{W}$ . Algebricamente, esta rotação se dá na forma do produto matricial:

$${}_1\bar{U} = {}_1\mathbf{C}\bar{U}, \quad (3)$$

onde  ${}_1\mathbf{C}$  é a matriz de rotação:

$${}_1\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x & \text{sen } \alpha_x & 0 \\ -\text{sen } \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

O próximo passo é identificar o ângulo de rotação no plano vertical, analogamente ao horizontal, usando a expressão:

$$\alpha_z = \arctg(\overline{W}/\overline{U}), \quad (5)$$

onde  $\alpha_z$  é o ângulo entre  ${}_1x$  e o vetor médio do vento nas componentes  ${}_1x, {}_1z$ .

Rotacionando o plano  ${}_1x, {}_1z$  em torno de  ${}_1y$  de um ângulo de  $\alpha_z$  orientamos o vetor médio do vento com o eixo  ${}_{11}x$  em um novo sistema coordenado  ${}_{11}x, {}_{11}y, {}_{11}z$ . Note que com esta rotação  ${}_{11}\overline{U} = \sqrt{\overline{U}^2 + \overline{V}^2 + \overline{W}^2}$ , e  ${}_{11}\overline{V} = 0$ ,  ${}_{11}\overline{W} = 0$ . Algebricamente, esta rotação é expressa por:

$${}_{11}\overline{U} = {}_{11}\mathbf{C}_1 \overline{U}, \quad (6)$$

onde  ${}_{11}\mathbf{C}$  é a matriz de rotação:

$${}_{11}\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & 0 & \sin \alpha_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_z & 0 & \cos \alpha_z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Outra via é usar a equação 3 em 6:

$${}_{11}\overline{U} = {}_{11}\mathbf{C}_1 \mathbf{C} \overline{U} = \mathbf{C} \overline{U}, \quad (8)$$

onde a matriz de rotação 3D  $\mathbf{C}$  pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= {}_{11}\mathbf{C}_1 \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & 0 & \sin \alpha_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_z & 0 & \cos \alpha_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_x \cos \alpha_z & \sin \alpha_x \cos \alpha_z & 0 \\ -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ -\cos \alpha_x \sin \alpha_z & -\sin \alpha_x \sin \alpha_z & \cos \alpha_z \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Os resultados obtidos são os mesmos, seja realizando-se duas rotações simples em sucessão, seja realizando-se uma única rotação de acordo com (9). Da mesma forma, é possível obter o tensor de Reynolds rotacionado, que será muito útil na análise das propriedades das escalas da turbulência. Os detalhes, entretanto, não serão dados aqui.

Para os fluxos dos escalares  $S$ , onde  $S$  pode ser a temperatura ou a densidade de vapor d'água, a rotação de coordenadas é dada por

$$\overline{{}_{11}w_{11}s} = \overline{u}s(-\cos \alpha_x \sin \alpha_z) + \overline{v}s(-\sin \alpha_x \sin \alpha_z) + \overline{w}s(\cos \alpha_z). \quad (10)$$

No caso da densidade de vapor d'água  $\rho_v = \overline{\rho}_v + \rho'_v$ , o fluxo escalar correspondente, de calor latente, é

$$LE = L\overline{w\rho'_v}. \quad (11)$$

Um exemplo das diferenças entre  $LE$  antes da rotação e após a rotação de coordenadas pode ser visto na figura 3. A característica mais proeminente é verificada para os períodos noturnos.

#### 4 – Correções para o tempo de resposta do sensor

Dias et al. (2007) mostraram que é possível medir as flutuações de densidade de vapor d'água  $\rho_v$  utilizando um sensor capacitivo adaptado. Embora o tempo de resposta do sensor capacitivo seja muito maior do que os dos sensores de resposta rápida que utilizam radiação ultra-violeta ou infra-vermelha, o sensor capacitivo possui a vantagem de ser muito mais barato e relativamente robusto. As correções necessárias dependem criticamente da temperatura do ar (para maiores detalhes, ver Dias et al. (2007)). As correções envolvidas são muito significativas: um exemplo pode ser observado na figura 4, onde se nota que as principais correções ocorrem de dia.

Figura 3: Efeito da rotação de coordenadas sobre o fluxo medido de calor latente.

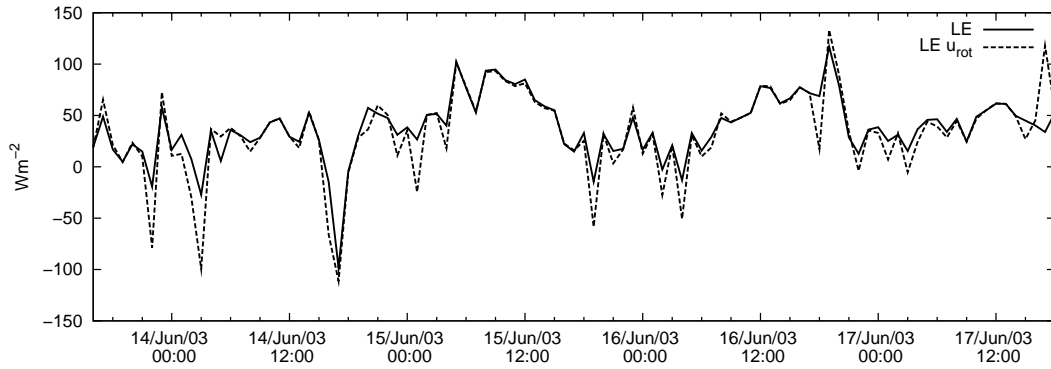
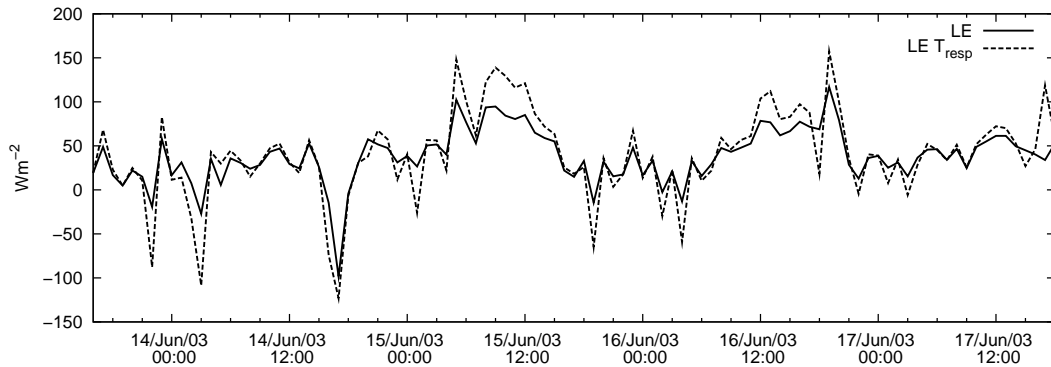


Figura 4: Efeito da correção para o tempo de resposta sobre o fluxo medido de calor latente.



#### 4.1 – A correção WPL

A correção para os fluxos superficiais de calor latente devido às flutuações de densidade de ar úmido (via a separação de Reynolds  $\rho = \bar{\rho} + \rho'$  para a densidade total do ar) foi estudada e implementada por Webb et al. (1980) e é comumente denominada correção WPL, em homenagem a seus proponentes. A correção é da forma

$$LE = L(1 + \mu \bar{R}) (\overline{w' \rho'} + (\overline{\rho' / \Theta}) \overline{w' \theta}) \quad (12)$$

onde  $\mu = R_v / R_s$  é a razão entre as constantes de gás para o vapor d'água e o ar seco, e  $\bar{R} = \overline{\rho' / \rho_s}$  é a razão de mistura média do ar.

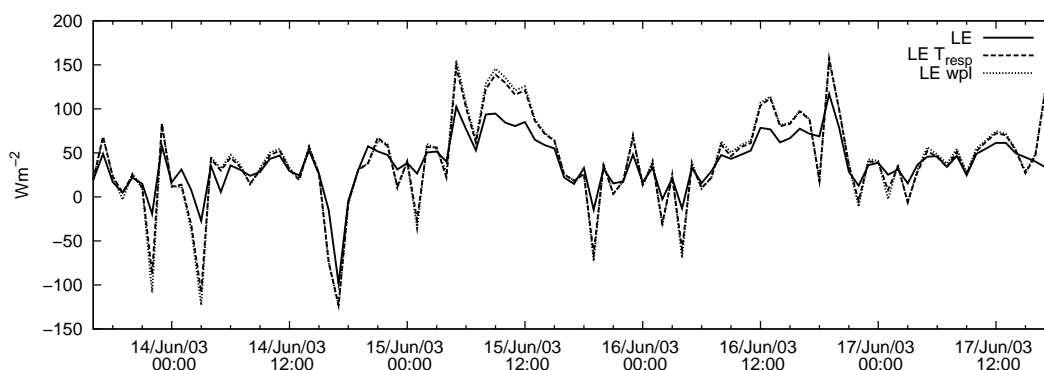
A figura 5 mostra (em verde) o efeito da aplicação da correção WPL sobreposta à correção para o tempo de resposta mencionada anteriormente. Verifica-se que a correção WPL aplicada em medições sobre um lago modifica muito pouco os valores de  $LE$  calculados, produzindo correções mais acentuadas também para os períodos diurnos.

## 5 – CONCLUSÕES

As correções que se aplicam ao método MCT minimizam os efeitos da dependência da resposta dos equipamentos de medição às próprias variáveis do ambiente, e aumentam a acurácia dos valores obtidos. Neste trabalho, nós demonstramos a importância da aplicação destas correções para a obtenção de valores confiáveis. A primeira variável a ser considerada em uma medição usando o MCT ou o MCTA é a própria direção do vento, devendo-se descartar — ou utilizar estimativas alternativas — medições quando a direção do vento não for apropriada devido aos efeitos de produção de esteira turbulenta e distorção do escoamento pela própria estrutura de medição.

Todas as correções melhoram as estimativas da Evaporação, minimizando os efeitos da subestimativa (horária, de médio e longo prazo) associados ao MCT e ao MCTA. Das demais correções

Figura 5: Efeito da correção WPL (em pontilhado). A linha tracejada mostra  $LE$  corrigido para o tempo de resposta do sensor capacitivo, cujo efeito no fluxo calculado é muito maior.



analisadas, a mais importante continua a ser a correção para o tempo de resposta, no caso aplicada utilizando a metodologia proposta por Dias et al. (2007). A correção produzida por duas rotações de coordenadas sucessivas mostrou-se relativamente pequena, mas capaz de atenuar alguns picos do fluxo de calor latente  $LE$ . Já a correção WPL mostrou-se praticamente desprezível para o caso das nossas medições de evaporação em lago.

## AGRADECIMENTOS

A FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. pelo financiamento do Projeto “Delta-F — Estudos de evaporação e evapotranspiração no reservatório de FURNAS” do Fundo Setorial ANEEL de P&D.

A nossos colegas de Lemma Leocádio Grodzki, Selma R. Maggiotto, Sandro Sanchez, e Sandro Vissotto pelo apoio de campo indispensável.

## BIBLIOGRAFIA

- ASSOULINE, S. e MAHRER, Y. (1993). *Evaporation from lake Kinneret 1. Eddy correlation system measurements and energy budget estimates*. Water Resour Res, 29(4), pp. 901–910.
- BERNARDES, M. e DIAS, N. L. (2005). *Comparação dos métodos de obtenção da velocidade de atrito a partir de dados de turbulência*. Em DE SANTA MARIA, U. F., editor, *Revista Ciência e Natura – IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, número Edição Especial Dezembro 2005, pp. 221–224.
- BLANKEN, P. D., ROUSE, W. R., CULF, A. D., SPENCE, C., BOUDREAU, L. D., JASPER, J. N., KOCHTUBAJDA, B., SCHERTZER, W. M., MARSH, P., e VERSEGHY, D. (2000). *Eddy covariance measurements of evaporation from Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada*. Water Resour Res, 36(4), pp. 1069–1077.
- DIAS, N. L., BERNARDES, M., NOCKO, H. F., e REKSIDLER, R. (2005). *Influência de obstáculos aerodinâmicos na medição de variáveis micrometeorológicas : medições de velocidade de atrito no lago de Furnas*. Em CD-ROM, *XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- DIAS, N. L., CANCELLI, D. M., e JR., D. V. (2008). *Desafios e lições da medição moderna de evaporação em grandes lagos*. Em CDROM *Anais II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- DIAS, N. L., DUARTE, H. F., MAGGIOTTO, S. R., e GRODZKI, L. (2007). *An attenuated eddy covariance method for latent heat flux measurements*. Water Resour Res, 43, pp. W04415.

- DIAS, N. L., KAN, A., GRODZKI, L., SANCHEZ, S. D., e VISSOTTO, D. (2002). *O método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 7(1), pp. 143–160.
- DIAS, N. L. e MALHEIROS, A. L. (2003). *Resultados de 2 anos de medição de evaporação no lago de Itaipu com o método de covariâncias turbulentas atenuadas: comparação com o balanço de energia, sazonalidade e episódios de evaporação intensa*. Em CD-ROM, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, volume Livro de Resumos (artigo completo no CD — full article in CD), p. 260, Curitiba. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- FINNIGAN, J. J. (2004). *A Re-Evaluation of Long-Term Flux Measurement Techniques Part II: Coordinate Systems*. Boundary-Layer Meteorology, 113(1), pp. 1–41.
- FINNIGAN, J. J., CLEMENT, R., MALHI, Y., LEUNING, R., e CLEUGH, H. A. (2003). *A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: averaging and coordinate rotation*. Boundary-Layer Meteorol, 107, pp. 1–48.
- KAMOGAWA, L. F. (1989). *Influência da evaporação nos reservatórios na geração da cascata do rio Iguaçu*. Relatório Técnico SPE/VPLE-26/89, COPEL, Curitiba.
- KELMAN, J., KELMAN, R., e PEREIRA, M. V. F. (2004). *Energia Firme de Sistemas Hidrelétricos e Usos Múltiplos dos Recursos Hídricos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 9(1), pp. 189–198.
- MASSMAN, W. J. e LEE, X. (2002). *Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges*. Agric For Meteorol, 113, pp. 121–144.
- NETO, J., KAMOGAWA, L., BORN, P., e AVILA, W. (1990). *Impacto das taxas de evaporação dos reservatórios nos valores de contrato de suprimento entre empresas (E1)*. Relatório Técnico SPE/VPLE-023/90, COPEL.
- WEBB, E. K., PEARMAN, G. I., e LEUNING, R. (1980). *Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer*. Q J Roy Meteorol Soc, 106, pp. 85–100.