

FLUXOS TURBULENTOS DE ENERGIA SOBRE O PANTANAL SUL MATO-GROSSENSE

MARIA BETÂNIA LEAL DE OLIVEIRA¹, CELSO VON RANDOW², ANTONIO OCIMAR MANZI¹,
REGINA CÉLIA DOS SANTOS ALVALÁ³, LEONARDO DEANE DE ABREU SÁ⁴, MÁRIO DE
MIRANDA V. B. R. LEITÃO⁵, AMAURY DE SOUZA⁶

¹ INPA/LBA. Av. André Araújo, 2936, Campus II, Aleixo, CEP: 69060-001, Manaus, AM.

Fone/Fax: (0xx92) 3643 3238. E-mails: betania@inpa.gov.br, manzi@inpa.gov.br.

² Wageningen University & Research Centre. P.O.Box 47, 6700 AA Wageningen. The Netherlands.

Fone: +31 (0)317 474676. E-mail: celso.vonrandow@wur.nl.

³ CPTEC/INPE. Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP. E-mail: regina@cptec.inpe.br.

⁴ MPEG. Av. Perimetral, 1901, Terra Firme, CEP: 66077-530, Belém, PA.

Fone: (91) 332176060. E-mail: ldsa@museu-goeldi.br.

⁵ UNIVASF, Avenida Trancredo Neves, 100, centro, 56303-410, Petrolina, PE.

Fone: (87) 38621413. E-mail: mario.miranda@univasf.edu.br.

⁶ UFMS, Cidade Universitária, CP 549, CEP: 79070-900, Campo Grande, MS. E-mail: amaury@nin.ufms.br

Recebido Abril 2005 - Aceito Agosto 2006

RESUMO

Medições de longo termo de fluxos turbulentos de calor sensível e latente, saldo de radiação e fluxo de calor no solo foram realizadas continuamente no Pantanal Sul Mato-Grossense, desde setembro de 2000 a junho de 2002, utilizando a técnica da covariância dos vórtices turbulentos. Análises dos primeiros 22 meses de medidas são apresentadas. O saldo de radiação, particionado principalmente entre fluxos de calor sensível e latente, apresentou valores ligeiramente maiores na estação úmida do que na estação seca. O balanço de energia acima do Pantanal, contudo, não foi fechado. A soma dos fluxos de calor alcançou, em média, 80% da energia disponível. Análise temporal das estimativas dos fluxos turbulentos escalares fornecem valores ligeiramente maiores do que os apresentados na literatura e apresentam variação sazonal mais evidente. Durante a estação úmida o fluxo de calor latente é maior que o fluxo de calor sensível, mas durante a estação seca o fluxo de calor sensível domina a energia disponível durante horas do dia, o que é mostrado pelos valores da Razão de Bowen, que varia de 0,2 a 0,5 na estação seca, e frequentemente maior que 3 durante a estação seca. Algumas discussões físicas sobre os resultados obtidos são apresentadas.

Palavras-chave: Pantanal, fluxos turbulentos, covariância de vórtices turbulentos.

ABSTRACT: FLUXOS TURBULENTOS DE ENERGIA SOBRE O PANTANAL SUL MATO-GROSSENSE

Long-term measurements of turbulent sensible and latent heat fluxes, net radiation and soil heat flux, have been made continuously on Pantanal Sul Mato-Grossense, since September 2000 to June 2002, with the eddy-correlation method. Analyses of the first 22 months of measurements are presented. The net radiation, partitioned mainly between sensible and latent heat fluxes, has its value slightly higher in the wet season than in the drier one. The energy balance above Pantanal, however, has not been well closed. The sum of the heat fluxes reaches, on average, 80 % of available energy. Time scale analysis of scalar turbulent fluxes estimation provides values slightly higher than the ones presented in literature and they present the more evident seasonal variation. During wet season the latent heat flux is higher than the sensible heat flux, but during the dry season the sensible heat fluxes dominate the available energy during day-time, what is shown by Bowen ratio range values, from 0.2 to 0.5 on wet season, and often larger than 3 during dry season. Some physical discussion concerning the obtained results is presented.

Keywords: Pantanal, turbulent fluxes, eddy covariance.

1. INTRODUÇÃO

O Pantanal, uma imensa planície de áreas alagáveis, está incluído entre os maiores ecossistemas do planeta, ocupando uma grande parte da porção centro oeste do Brasil. Está situado, a oeste do Mato Grosso do Sul, estendendo-se ainda pelo sudoeste do Mato Grosso, pelo Paraguai e parte da Bolívia. Abrange uma área de cerca 138.183 km² (Vila da Silva e Abdon, 1998) que periodicamente é inundada pelo rio Paraguai e seus afluentes, o que faz com que a região apresente períodos de inundações alternados por épocas secas. A superfície da região do Pantanal apresenta grandes contrastes ao longo do ano, apresentando épocas muito secas, com alto risco de queimadas, até períodos chuvosos, chegando a formar uma lâmina de água sobre a superfície em alguns locais (Magalhães, 1992). Isso favorece uma modificação periódica espacial e temporal no albedo, na umidade do solo, na rugosidade e, conseqüentemente, na variabilidade dos processos físicos da atmosfera da região.

O clima da região do Pantanal está classificado entre sub-úmido e semi-árido. A precipitação média anual varia de 1000 a 1400 mm, com a maior parte da precipitação ocorrendo no período denominado chuvoso, que ocorre nos meses de novembro a março. Nos demais meses tem-se o período seco. A temperatura no verão chega a atingir 40°C enquanto que no inverno cai até os 0°C, como resultado da atuação de frentes frias que penetram nessa região. Quanto à vegetação, devido às suas características ambientais, não há homogeneidade, podendo ser encontradas desde gramíneas até árvores de grande porte que chegam a atingir alturas superiores a 20 metros (Magalhães, 1992).

Todos os parâmetros que caracterizam a superfície de uma determinada região alteram a estrutura de ar diretamente acima da superfície, a qual é chamada de Camada Limite Atmosférica (CLA). Essa camada tem como principal característica a resposta rápida às mudanças nas condições de superfície. Os fluxos nessa camada de ar são quase sempre turbulentos e, devido a isso, tem-se uma variação irregular das variáveis tais como temperatura e velocidade, no tempo e no espaço. Dessa forma, tem-se troca de momentum, de massa e de calor entre a superfície e o ar adjacente, o que irá produzir variação do clima da região (Arya, 1988).

A Camada Limite Superficial (CLS) corresponde à região da CLA mais explorada por pesquisas micrometeorológicas, pela facilidade de realização das medições e, por constituir o local onde a maioria das atividades humanas é realizada. É nesta camada onde ocorre uma forte variação das grandezas micrometeorológicas com a altura e, conseqüentemente, mudanças significativas de quantidade de movimento, calor e massa. Essas propriedades são, então, transferidas para toda a Camada Limite Atmosférica através de mecanismos de transferência turbulenta. Considerando-se as propriedades de homogeneidade

horizontal, os fluxos nesta camada são considerados constantes com a altura. Contudo, eles podem apresentar uma variabilidade espacial em vista de heterogeneidades horizontais, o que gera circulações locais, assim como foi verificado por Kubota et al. (2002), ao simularem numericamente a CLA sobre o Pantanal Matogrossense utilizando o modelo RAMS.

O fluxo de vapor de água para a atmosfera é um importante componente para avaliação do balanço de energia em uma determinada região e este é condicionado pela partição da energia disponível, pela disponibilidade de água no solo, pelas propriedades físicas da superfície, pela umidade do ar adjacente, pelas características dinâmicas da camada atmosférica justaposta àquela superfície. Uma vez gerado, o vapor de água mistura-se ao ar da camada limite superficial por difusão turbulenta e, posteriormente, é transportado por correntes advectivas e convectivas por toda a Camada Limite Atmosférica.

O estudo das trocas de energia e massa na interface superfície/atmosfera é uma importante forma de identificar as interações existentes entre elas, na região em estudo e, dessa forma, tomar conhecimento das variações do tempo e do clima da região, assim como medir e identificar os efeitos que as atividades antropogênicas, ou fatores naturais, possam ter sobre as diferentes questões ambientais da região. Esse tipo de estudo é fundamental no que se refere a regiões que abrangem importantes ecossistemas, como é o caso do Pantanal Sul Mato-Grossense que, além de apresentar uma grande variedade de fauna e flora, fornece uma quantidade significativa de umidade para a atmosfera. Porém, são muito escassas as informações científicas acerca deste ecossistema, especialmente do ponto de vista meteorológico. Por esta razão, foi elaborado um extenso projeto de pesquisa multidisciplinar, denominado Experimento Interdisciplinar do Pantanal Sul Mato-Grossense (Projeto IPE), que vem realizando campanhas de medidas de superfície e camada limite desde 1998 na Base de Estudos do Pantanal, da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Assim, diante da realização de experimentos como este, torna-se possível identificar o comportamento das mais diversas variáveis que governam o clima de uma região, além de possibilitar determinar de que forma as características da região influenciam nas trocas turbulentas. O principal objetivo desse trabalho é estimar os fluxos turbulentos de energia acima do Pantanal Sul Mato-Grossense, utilizando o método das covariâncias, e estudar as variações sazonais destes fluxos. São calculados os valores médios e caracterizada a variabilidade dos componentes do balanço de energia para um período de aproximadamente 22 meses de dados. Dentro desse período de dados, foram selecionados quatro dias representativos das estações seca, chuvosa e em épocas de cheia, para a região do Pantanal Sul Mato-Grossense, visando uma melhor comparação do comportamento das componentes do balanço de energia ao longo do ano.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Descrição da área experimental

A base experimental desta pesquisa situa-se na Fazenda São Bento (19°34' S; 57°01' W), localizada próximo à Base de Estudos do Pantanal da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, no distrito de Passo do Lontra, município de Corumbá, MS, às margens do Rio Miranda. Essa é uma área plana, constituída de gramíneas e ipês espaçados com alturas de 8 a 10 metros. A escolha desta localidade deu-se em função das boas condições de infra-estrutura disponíveis, e também por constituir uma amostra típica do Pantanal.

Nesta região os ventos predominantes são de noroeste, havendo modificação quando da passagem de sistemas sinóticos de grande escala, quando torna-se de sul. Essa área caracteriza-se por apresentar uma vegetação de cerrado consistindo de um tipo de ipê (*Tabebuia aurea*) que possui altura de aproximadamente 10 metros. Ao sul da torre, a uma distância de 500 metros, encontra-se um extenso cinturão da mata ciliar do Rio Miranda. Na face norte e oeste da torre, a vegetação é marcada pela presença de arbustos de diferentes tamanhos e árvores de médio porte, situadas no interior de grandes áreas de gramíneas. A leste predominam as gramíneas.

2.2. Instrumentação e Dados

Todos os dados aqui utilizados foram coletados em experimentos do Projeto IPE, os quais correspondem a um período de vinte e dois meses de dados, de setembro de 2000 até junho de 2002. Para coleta dos dados utilizou-se uma torre micrometeorológica, com 21m de altura, na qual encontravam-se dispostos sensores de resposta rápida para medidas de turbulência, e instrumentos eletrônicos de baixa frequência utilizados na determinação de perfis verticais de velocidade do vento, temperatura e umidade específica, direção do vento, e componentes de radiação. Além desses, também foram utilizados instrumentos instalados no solo visando completar as medidas para a obtenção do balanço de energia na região.

Um computador foi utilizado para gravar os dados dos instrumentos de alta frequência (até abril de 2001 a frequência das medições foi de 16Hz e, após, foi de 8Hz) enquanto os demais dados obtidos na torre e no solo foram armazenados em sistemas de aquisição de dados (dataloggers), os quais foram programados para efetuar leituras a cada minuto e médias a cada 30 minutos.

2.3. Balanço de Energia

O balanço de energia à superfície é um componente fundamental para todos os modelos de interação solo-superfície-atmosfera. Dessa forma, visando caracterizar as trocas entre

a superfície e a atmosfera do Pantanal Sul Mato-Grossense nos períodos seco, úmido e alagado, fez-se uma análise do balanço de energia à superfície nas diferentes épocas do ano. Segundo este balanço, o saldo de radiação é particionado em energia para aquecer o ar (H), energia usada para evaporar água (LE) e energia usada para aquecer o solo (G). O fluxo de calor sensível (H) na superfície e acima dela varia como resultado da diferença de temperatura entre a superfície e o ar acima dela; o calor latente ou fluxo de vapor de água resulta da evaporação, evapotranspiração ou condensação na superfície; e o fluxo de calor no solo resulta da diferença de temperatura entre a superfície e o solo abaixo dela.

Dependendo da região em estudo, outros termos podem ser acrescentados, como o efeito da advecção (Gielow et al., 2000), energia armazenada na biomassa (Galvão & Fisch, 2000; Moore & Fisch, 1986) e energia utilizada no processo fotossintético (Leitão, 1989), ou substituídos, como é o caso do fluxo de calor no solo que substitui o armazenamento de calor na lâmina de água em condições de cheias (Burba et al., 1999).

Nesse experimento, as componentes Rn e G foram obtidas através de medições diretas utilizando, respectivamente, um saldo radiômetro (REBS) instalado a 21 metros de altura, e uma placa de fluxo de calor no solo (CAMPBELL) instalada próximo à torre em uma profundidade de 5 cm. Já os componentes H e LE foram determinadas utilizando-se o método das covariâncias (eddy-covariance).

2.4. Método das covariâncias

Esse método foi proposto por Swinbank em 1951, e consiste no princípio de determinação direta dos fluxos, calculando-se as covariâncias entre as flutuações temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento e as flutuações temporais da temperatura (fluxo de calor sensível) e da umidade (fluxo de calor latente). Assim, o fluxo de uma grandeza escalar (F_c) é definido como a quantidade do escalar (c) por unidade de tempo por unidade de área e é dado pelo produto entre as flutuações da velocidade vertical do vento (w') e da concentração escalar (c') somado com um termo de correção (ϵ).

$$F_c = \overline{w'c'} + \epsilon \quad (1)$$

Os termos de correção representam as contribuições aos fluxos que não são levadas em conta devido às limitações do sistema (Moncrieff, 1997).

Assim, a determinação do fluxo vertical de vapor de água ou evapotranspiração reduz-se à determinação da covariância do produto entre as flutuações da componente vertical da velocidade do vento e umidade do ar, enquanto que o fluxo vertical de calor sensível é dado em função da covariância das flutuações da componente vertical da velocidade do vento e de

temperatura do ar. Para a determinação das medidas de velocidade do vento nas três direções (u , v e w) e da temperatura virtual, foi utilizado um anemômetro sônico tridimensional (Campbell, modelo CSAT3). No caso das medidas de umidade, utilizou-se um higrômetro infravermelho, também chamado de Krypton (Campbell, modelo KH2O) e um analisador de gás por infravermelho (IRGA) (LI-COR, modelo LI-6262), que medem a densidade de vapor (umidade) do ar também em alta frequência. O anemômetro sônico, o Krypton e o tubo que leva o ar até o IRGA encontram-se instalados no centro da torre a uma altura de 22,5 metros. Até abril de 2001 a frequência das medições era de 16 Hz e, após, foi de 8 Hz.

Os fluxos foram estimados para o período de setembro de 2000 a junho de 2002, utilizando-se um programa escrito em linguagem FORTRAN, EDDYINPE, que foi desenvolvido no Alterra, Holanda, e adaptado no CPTEC/INPE para o sistema instalado no Pantanal. O programa calcula as flutuações turbulentas em intervalos de 30 minutos, utilizando um filtro recursivo digital, conforme a metodologia sugerida por Aubinet et al. (2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variações sazonais dos fluxos

De acordo com a Figura 1, tem-se a variação sazonal dos componentes do balanço de energia, para o período de setembro de 2000 a junho de 2002, com H e LE estimados pelo método das covariâncias. Verificam-se maiores médias diárias do saldo de radiação nos meses de novembro a fevereiro, quando atinge cerca de 231 W.m^{-2} , enquanto que estes valores foram em torno de 130 W.m^{-2} nos meses de inverno no hemisfério sul.

Apesar de a região frequentemente se alagar durante as estações chuvosas, a estação chuvosa de 2000/2001 foi relativamente anômala, não tendo sido observados muitos pontos de alagamento próximo à torre de medidas neste período de estudo. Porém, em 04 de dezembro de 2001 verificou-se a formação de uma lâmina de água, com 2 cm de profundidade, sobre a superfície do solo, a qual foi aumentando até atingir no dia 19/12 um pouco mais do que 40 cm de altura. Depois continuou subindo até alcançar no final do mês 74 cm. No início de janeiro do ano seguinte a lâmina começou a decrescer, atingindo cerca de 35 cm no final de fevereiro, a partir de então permaneceu praticamente com a mesma altura até o mês de abril de 2002.

O fluxo de calor sensível diário manteve valores de até 75 W.m^{-2} no período de setembro de 2000 a agosto de 2001. Porém, de setembro a novembro de 2001 observou-se um pequeno aumento nas médias diárias de H , as quais atingiram valores próximos de 100 W.m^{-2} , com a razão de Bowen tendo um acréscimo neste período, quando os fluxos de calor sensível podem chegar a apresentar valores até três vezes maiores que a

evaporação, em alguns dias. Este aspecto está relacionado com a diminuição da precipitação em períodos antecedentes, associado com o aumento da energia disponível na região, em função da maior incidência de raios solares. A partir da segunda quinzena de dezembro de 2001, quando se estabelece a formação de uma lâmina de água nesta área, o fluxo de calor sensível reduz, passando a ter valores máximos da ordem de 30 W.m^{-2} . À medida que a lâmina de água foi diminuindo, o fluxo de calor sensível teve pequeno acréscimo. Para o período com lâmina de água cobrindo a superfície, o fluxo de calor sensível representou em média 32% do fluxo de calor latente.

No caso do fluxo de calor latente, a variação sazonal concorda com o comportamento do saldo de radiação, bem como com os padrões de precipitação da região. Nos meses com maior energia disponível na região, os quais correspondem aos meses mais chuvosos, o fluxo de calor latente chegou a superar 150 W.m^{-2} , enquanto que nos meses mais secos e com menos energia disponível os totais diários são da ordem de 50 W.m^{-2} . Verificou-se uma queda acentuada nos valores entre os dias 17 de fevereiro e 22 de abril de 2001. Isso ocasionou

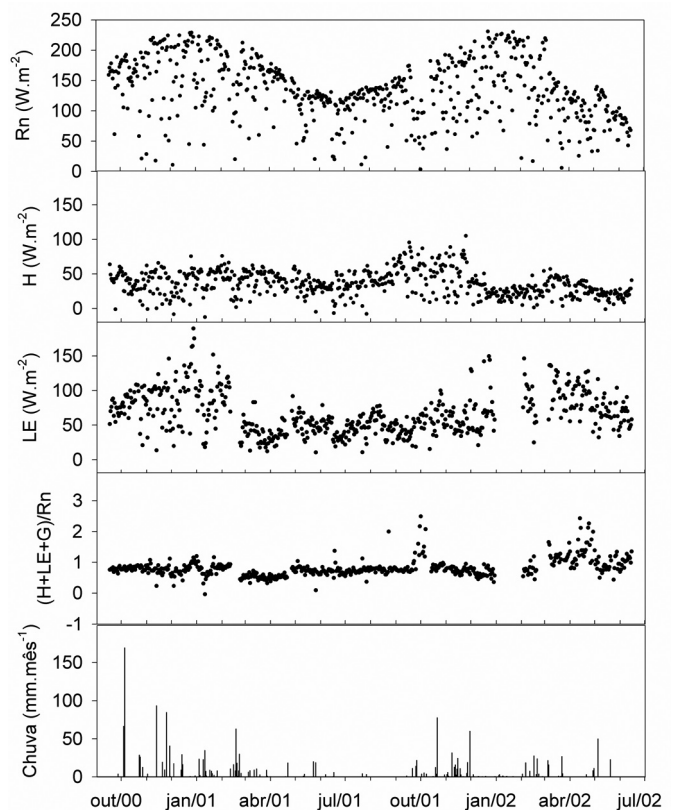


Figura 1 – Variação sazonal do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), da razão entre a soma dos fluxos e o saldo de radiação ($(H+LE+G)/R_n$), razão de Bowen (H/LE) e totais diários da precipitação para o período de dados de setembro de 2000 a junho de 2002. Esses valores correspondem a médias diárias.

uma alteração irrealista no comportamento do fechamento do balanço de energia e da razão de Bowen, sendo mais evidente neste último. Os fluxos para este período foram re-processados utilizando uma recalibração do higrômetro Krypton, porém os valores não tiveram alterações consideráveis.

O fechamento do balanço de energia $((H+LE+G)/Rn)$ indica valores predominantemente variando entre 0,6 e 0,8, cujos resultados aproximam-se bastante dos apresentados na literatura em geral (Goulden et al., 1997; McCaughey et al., 1997; Twine et al., 2000). Dentre os fatores que podem explicar essa dificuldade em se obter o balanço de energia na região do Pantanal destacam-se: (i) possíveis problemas instrumentais no anemômetro sônico ou no higrômetro de infravermelho (Vickers & Mahrt, 1997); (ii) armazenamento de calor na vegetação ou água (Moore & Fisch, 1986; Burba, 1999) ou efeitos de circulação local (Mahrt, 1998); (iii) as diferentes escalas espaciais que influenciam as medidas de saldo de radiação em comparação com as dos fluxos turbulentos (Mahrt, 1998); ou (iv) alguns fatores da metodologia em si, como os intervalos de tempo em que são calculadas as médias e flutuações das variáveis (von Randow et al., 2002), correções de rotação de eixos do escoamento (Kaimal & Finnigan, 1994), etc.; (v) o próprio fato de os dados turbulentos terem sido filtrados para obtenção dos fluxos, o que pode contribuir para produzir um melhor ajuste às relações previstas pela Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, mas que o que nem sempre é indicado quando se pretende investigar o balanço de energia (Vickers e Mahrt, 2003); (vi) os próprios erros amostrais inerentes ao cálculo dos fluxos pelo método das covariâncias, conforme investigado por Zeri (2002) para dados do Pantanal.

Porém, vale salientar que no início de outubro de 2001 e a partir de março de 2002, a razão entre a soma dos fluxos H, LE e G, e o saldo de radiação chegam a atingir 2,5. No primeiro caso, esses valores respondem ao comportamento do saldo de radiação neste período, quando as médias diárias apresentaram-se relativamente baixas. Já a partir de março de 2002, tem-se que os fluxos H e LE tiveram aumento considerável em função do calor armazenado na camada de água que cobria a superfície.

3.2. Componentes do balanço de energia nas estações seca, úmida e com presença de lâmina de água sobre a superfície.

Para avaliar o comportamento diário dos componentes do balanço de energia em diferentes épocas do ano, foram selecionados dois dias típicos para representar os períodos seco e úmido (Figura 2), e dois dias característicos das épocas úmidas com alta e baixa profundidade da lâmina de água cobrindo a superfície (Figura 3).

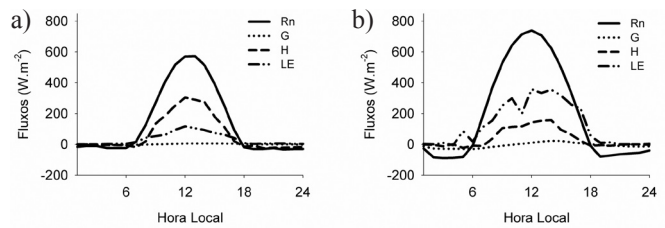


Figura 2 – Componentes do balanço de energia (Rn , G , H e LE) para dias representativos das estações seca (a) e chuvosa (b). Os fluxos referem-se aos dias 04 de setembro e 02 de dezembro de 2001, respectivamente.

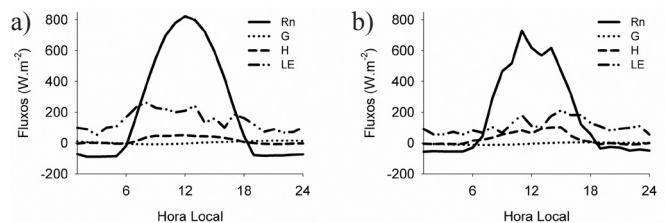


Figura 3 – Componentes do balanço de energia (Rn , G , H e LE) para dias representativos do período inundado da região de estudo: (a) 24 de dezembro de 2001 e (b) 07 de fevereiro de 2002.

Observa-se que o saldo de radiação foi um pouco maior na estação úmida, quando atingiu $740,5 W.m^{-2}$, enquanto que na estação seca o valor máximo foi de $573,7 W.m^{-2}$. Essa energia radiativa foi então convertida basicamente em H e LE , com o fluxo de calor no solo alcançando valor máximo de $23,0 W.m^{-2}$ no dia 02 de dezembro de 2001, e $6,7 W.m^{-2}$ no dia 04 de setembro de 2001. Na estação chuvosa, o fluxo de calor latente que resulta não só da evaporação, mas também da transpiração das plantas, apresenta valor máximo da ordem de $358,7 W.m^{-2}$ com o H máximo sendo de apenas $157,8 W.m^{-2}$. Uma constatação referente a este dia foi a de que ao final da tarde, próximo às 18 horas local, o fluxo de calor latente chegou a superar o saldo de radiação, ocasião em que o fluxo de calor sensível passou a ser negativo. Situação oposta pode ser verificada na estação seca. O fluxo de calor sensível atinge valores de até $304,4 W.m^{-2}$, enquanto LE não ultrapassa $117 W.m^{-2}$. Dessa forma, nota-se uma forte sazonalidade característica da região do Pantanal Sul Mato-Grossense.

A presença da lâmina de água cobrindo a superfície no local de estudo modificou o comportamento dos componentes do balanço de energia, uma vez que modifica as características físicas da superfície. Neste período, a variação diária do fluxo de calor latente apresenta-se bem diferente do que foi verificado nas épocas seca e chuvosa, com valores positivos durante o dia e a noite. No dia 24 de dezembro de 2001, quando a profundidade da lâmina de água era de 60 cm, LE máximo durante o dia não superou $265,0 W.m^{-2}$, um valor inferior ao verificado no dia 02 de dezembro do mesmo ano. Já durante a noite, foram registrados mínimos de $53,3 W.m^{-2}$ para LE , que indica

a ocorrência de evaporação à noite, ainda que na ausência de radiação solar, possivelmente devido à disponibilidade de água para evaporação, o que pode estar associado com a energia que é armazenada na camada de água.

Os fluxos médios determinados durante esses dois períodos são mostrados na Tabela 1. Novamente ilustram-se as diferenças entre as estações seca e úmida: a maior parte do saldo de radiação na superfície é emitida para a atmosfera, através do calor latente na estação chuvosa, e pelo calor sensível na estação seca.

As características gerais sobre a partição da energia disponível entre os fluxos, durante o dia, podem ser observadas pela razão de Bowen, que corresponde à razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente. Na Figura 4 tem-se a variação média diurna desta razão para os referidos períodos. Nota-se que, nos períodos seco e chuvoso, a razão de Bowen torna-se positiva por volta das 8 horas e permanece assim até as 16 horas, quando se torna negativa. No período inundado o comportamento é semelhante, sendo que se torna positiva antes das 8 horas, permanecendo assim por mais horas do dia que no caso verificado para os outros dias. A explicação para este fato é que no período úmido a duração do dia é maior que no período

seco, em virtude da posição do sol em relação a Terra. Então, além de haver mais energia disponível no período úmido, aparentemente o saldo de radiação é positivo durante um intervalo de tempo bem maior ao longo do dia.

Em termos de valores tem-se que, no período seco, H supera LE em até 3 vezes. No período úmido, B não ultrapassa 1 pelo fato de que LE é superior a H, ou seja, neste último a maior parte de energia disponível é utilizada para evapotranspiração.

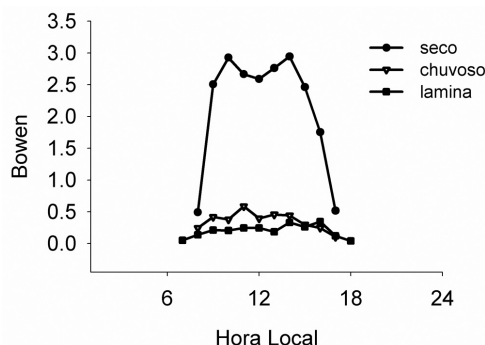


Figura 4 – Razão de Bowen, nos dias representativos das estações seca, úmida e com lâmina de água.

Tabela 1 – Valores médios obtidos durante os dias representativos das estações seca, úmida, e com lâmina de água cobrindo a superfície.

	Rn	G	H	LE	H/LE	(H+LE+G)/Rn
04/09/2001	143,3	1,1	67,5	32,7	2,16	0,72
02/12/2001	198,1	-7,1	38,6	128,2	0,36	0,81
24/12/2001	220,2	4,2	16,7	145,2	0,20	0,75
07/02/2002	179,0	-3,7	27,4	108,7	0,44	0,74

4. CONCLUSÕES

Medidas de variabilidade sazonal dos termos do balanço de energia são raramente obtidos continuamente por longos períodos de tempo nos ecossistemas brasileiros. Por isso, os resultados apresentados neste estudo, referentes ao Pantanal Sul Mato-Grossense, se revestem de particular relevância. Foram comparados dados de grandezas meteorológicas relevantes para o balanço de energia nas estações seca e úmida. Os resultados apontam uma diferença marcante na partição da energia disponível em fluxos de calor sensível e calor latente nas estações seca e úmida, o que torna-se patente ao se compararem os valores da razão de Bowen obtidos nas duas estações. No que se refere à determinação do balanço de energia acima do Pantanal, ele dificilmente foi “fechado” a partir de cálculos com os dados experimentais disponíveis. Possíveis causas para tal resultado são apresentadas e discutidas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os membros do grupo de micrometeorologia do INPE pelo planejamento e execução do projeto, coleta dos dados e manutenção do sítio operacional, à Universidade Federal do Mato Grosso do Sul pelo apoio logístico da Base de Estudos do Pantanal, à FAPESP pelo fornecimento de recursos para a operação do sítio experimental. Leonardo Sá agradece ao CNPq pelos auxílios (bolsa de produtividade em pesquisa, processo 306769/2004-2 e Edital Universal, processo 481340/2004-1).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 1988. 307 p.

- AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, v. 30, p. 113-175, 2000.
- BURBA, G. G.; VERMA, S.B.; KIM, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 94, p. 31-51, 1999.
- GALVÃO, J.A.C.; FISCH, G. Balanço de energia em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia (Ji-Paraná, RO). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 15, n. 2, p. 25-37, 2000.
- GIELOW, R. et al. Estudo da partição de energia sobre terrenos complexos cobertos com lâmina d'água em setor do Pantanal Matogrossense. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UFRJ, 2000. p. 2546-2554.
- GOULDEN, M.L. et al. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, v. 102 (D24), p. 28987-28996, 1997.
- KAIMAL, J.C.; FINNIGAN, J. **Atmospheric Boundary Layer Flows**. New York: Oxford University Press, 1994. 289 p.
- KUBOTA, P. Y.; MANZI, A. O.; SILVA DIAS, M. A. F. Simulação numérica da Camada limite do Pantanal Mato-Grossense. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, 2002. p. 2764-2772.
- LEITÃO, M. M. V. B. R. **Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada**. 1989. 111f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1989.
- MAGALHÃES, N.W. **Conheça o Pantanal**. São Paulo: Terragraph, 1992. 400 p.
- MAHRT, L. Flux sampling errors for aircraft and tower data. *Journal Atmospheric Oceanic*, v. 15, p. 416-429, 1998.
- MCCAUGHEY, J. H. et al. Magnitudes and seasonal patterns of energy, water and carbon exchanges at a boreal young jack pine forest in the BOREAS northern study area. *Journal of Geophysical Research*, v.102 (D24), p. 28997-29007, 1997.
- MOORE, C.J.; FISCH, G. Estimating heat storage in Amazonian tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 1-3, p. 147-169, 1986.
- MONCRIEFF, J.B. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, v. 188-189, p. 589-611, 1997.
- TWINE, T. E. et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 103, p. 279-300, 2000.
- VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, v. 14, p. 512-526, 1997.
- VICKERS, D.; MAHRT, L. The cospectral gap and turbulent flux calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 26, p. 660-672, 2003.
- Von Randow, C. et al. Scale variability of atmospheric surface layer fluxes of energy and carbon over a tropical rain forest in southwest Amazonia. I. Diurnal conditions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 107, n. D20, p. 29-1-29-12, 2004.
- ZERI, L. M. M. **Estudo comparativo da estrutura da turbulência atmosférica na camada limite superficial acima do Pantanal Matogrossense nos períodos úmido e seco**. 2002, 115f. Dissertação de Mestrado - INPE, São José dos Campos, 2002.