

DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CO₂ NO NORTE DO PANTANAL MATO-GROSSENSE

OSVALDO ALVES PEREIRA¹, MARCELO SACARDI BIUDES¹, JOSÉ DE SOUZA NOGUEIRA¹,
GUILHERME BARROS SEIXAS², PAULO HENRIQUE ZANELLA ARRUDA¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Instituto de Física, Cuiabá, MT, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), Cuiabá, MT, Brasil

osvaldo_fu@yahoo.com.br, marcelo@pgfa.ufmt.br, nogueira@ufmt.br, guilherme.seixas@cba.ifmt.edu.br,
paulo.zanella@fisica.ufmt.br

Recebido Março de 2011 - Aceito Janeiro de 2013

RESUMO

No Pantanal, existem diversas comunidades de espécies monodominantes, que servem como indicadores de mudanças ambientais. O estudo da dinâmica das trocas de CO₂ entre essas comunidades e a atmosfera contribui para avaliar o funcionamento desses ecossistemas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi determinar o fluxo de CO₂ (Acf) de uma área monodominante de Cambará (*Vochysia divergens* Pohl) no norte do Pantanal. O fluxo de CO₂ foi determinado por meio do método da razão de Bowen modificada. Para isso, utilizaram-se medidas de saldo de radiação, fluxo de calor no solo e gradientes de temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂ do ar realizadas em uma torre de 32 m, em uma área monodominante de Cambará. A concentração de CO₂ ao longo do perfil vertical do dossel, durante o período noturno, foi maior nos dias de céu limpo. O Acf no dossel do Cambarazal foi positivo no período noturno e negativo no período diurno. Os maiores valores de Acf foram medidos nos dias de céu limpo, os quais foram 75% maiores do que em dias de céu parcialmente nublados.

Palavras-chave: área alagável, função do ecossistema, respiração do solo.

ABSTRACT: DETERMINATION OF CO₂ FLOW IN THE NORTHERN "MATO-GROSSENSE" PANTANAL

In the Brazilian Pantanal region, there are some monodominant species which are suited as environmental changes indicators. The study of the dynamics of CO₂ exchange between those plants communities and the *atmosphere* contributes to evaluate those ecosystems behavior. Therefore, the purpose of this study was to determine the CO₂ flux (Acf) of *Vochysia divergens* Pohl mono species forest in northern Pantanal. The CO₂ flux was estimated by the modified Bowen ratio method. For this, net solar radiation, surface heat flux and soil temperature and air humidity data and CO₂ concentration profiles, collected at a 32m high tower installed in this area were used. The CO₂ concentrations along the canopy profiles were greater during clear sky conditions in nighttime periods. The Acf over *Vochysia divergens* Pohl canopy was positive in nighttime period and negative during daytime. The highest Acf values were collected during clear sky conditions, 75% higher than partly cloudy sky conditions.

Keywords: flooded area, ecosystem function, soil respiration.

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica do carbono nos ecossistemas tropicais tem recebido considerável importância, devido à necessidade de compreender efeitos da mudança da cobertura terrestre, nos ciclos biogeoquímicos regionais e o papel dos ecossistemas terrestres tropicais no balanço de CO₂ global (Vourlitis et al., 2004).

Estima-se que áreas alagáveis tropicais ocupem 5 a 7% da superfície terrestre (Neue et al., 1997). O Pantanal é caracterizado como o elo entre o Cerrado, a Amazônia e os Chacos Boliviano e Paraguaio (Junk e Nunes da Cunha, 2005), e apresenta o pulso de inundação como principal força moderadora da paisagem por apresentar baixa drenagem dos solos e frequente prolongamento do período de inundação (Junk, 2002). As oscilações nos níveis de inundação que ocorrem no

Pantanal, causadas pela variação pluviométrica e mudanças na dinâmica sedimentológica ao longo do tempo (Collischonn et al. 2001), podem funcionar como um filtro ao estabelecimento e desenvolvimento de algumas espécies de plantas (Arieira e Nunes da Cunha, 2006). Esta condição tem levado à permanência de elevada quantidade de espécies pioneiras no Pantanal, que mantêm suas populações em altas densidades, de acordo com os requerimentos fisiológicos e ecológicos da espécie (Junk et al. 2006).

Algumas espécies podem servir como indicador de mudanças ambientais por meio de diferentes respostas às condições de habitat. O cambará (*Vochysia divergens*) se destaca por apresentar características ecológicas e fisiológicas, que favorecem seu rápido espalhamento e dominância em solo nu e em pastagens sazonalmente inundadas, o que indica capacidade de colonizar áreas perturbadas. Entre suas características, apresenta elevada taxa de crescimento sob intensa luminosidade, tolerância à condição de prolongado alagamento, capacidade de suas plântulas em manter suas folhas intactas abaixo da superfície da água e elevada produção de sementes espalhadas pelo vento (Nunes da Cunha e Junk, 2004).

A comunidade monodominante de cambará, localmente chamada de cambarazal, apresenta maior evapotranspiração que pastagens, provavelmente por poder acessar o lençol freático superficial com maior eficiência (Biudes et al., 2009). O seu rápido espalhamento sobre campos sazonalmente inundados pode alterar a estrutura química e física do solo, indicando que sua invasão fundamentalmente altera o estoque de carbono e nutrientes do solo pantaneiro (Vourlitis et al., 2011).

As dinâmicas dos fluxos de CO₂ e água são consideradas as mais importantes transferências de massa entre a superfície e o ar adjacente (Asseng e Hsiao, 2000). A densidade de fluxo de CO₂, sobre o dossel de uma vegetação, representa a diferença entre os ganhos por fotossíntese pelas folhas e as perdas pela respiração das próprias folhas, raízes e do solo (Baldocchi, 1994). O resultado da fixação de CO₂ por meio da conversão da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em energia química é a manutenção/crescimento da vegetação terrestre e aquática (Silva Jr. et al., 2004). As trocas de vapor d'água incluem a evaporação do solo (e da superfície de água, no caso de áreas alagadas), a evaporação da água interceptada pela vegetação, e a transpiração das plantas. Por convenção, densidades de fluxo negativo indicam ganho de massa pela cultura por parte da superfície (Baldocchi, 1994).

A estimativa do fluxo de CO₂ entre uma superfície vegetada e a atmosfera pode ser realizada por meio de técnicas micrometeorológicas, as quais apresentam como principal vantagem, não modificar o ambiente de estudo. Os principais métodos micrometeorológicos de estimativa da produtividade primária líquida são o de correlação de vórtices turbulentos

(do inglês “*Eddy Covariance*”, *EC*) e o da razão de Bowen modificada (do inglês “*Modified Bowen Ratio*”, *MBR*) (Meyers et al., 1996; Angell et al., 2001).

O *EC* pode medir independentemente os fluxos de CO₂, latente (evapotranspiração) e sensível (Baldocchi, 2003; Chunlin et al., 2007; Borma et al., 2009). Entretanto, apresenta como limitação, erros em suas estimativas quando da condição de baixa turbulência do ar, típicas do período noturno (Miller et al., 2004; Campos, 2008).

Diferente do *EC*, o *MBR* estima os fluxos de CO₂, latente e sensível por meio da relação entre essas variáveis e o saldo de radiação e fluxo de calor no solo, baseando-se no fechamento do balanço de energia (Angell et al., 2001). Mesmo tendo princípios teóricos distintos, as estimativas pelo *MBR* são ajustadas às realizadas pelo *EC*, salvo em condições de neutralidade atmosférica, quando foge da presunção de similaridade dos coeficientes de difusão turbulenta. Além disso, o *MBR* necessita de um modesto aparato instrumental (Wolf et al., 2008).

Tendo em vista a necessidade do conhecimento da dinâmica de CO₂ trocado entre a atmosfera e a vegetação de áreas alagáveis no Pantanal, o objetivo deste trabalho foi determinar o fluxo de CO₂ de uma área monodominante de Cambará (*Vochysia divergens* Pohl), no norte do Pantanal por meio do método da razão de Bowen modificada, em dias com diferentes coberturas do céu.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido na área experimental da Reserva Particular do Patrimônio Natural do Serviço Social do Comércio – RPPN SESC – Pantanal, município de Barão de Melgaço – MT, distante 160 km de Cuiabá, MT, e altitude de 120 m. Nesta área encontra-se instalada uma torre micrometeorológica (localizada nas coordenadas 16°33'19"S, 56°17'11"O) metálica de 32 m de altura (Biudes, et al., 2009). O local de estudo contém aproximadamente 30 espécies, sendo que a principal espécie identificada é a *Vochysia divergens* Pohl (Cambará) com densidade relativa 40,0%, dominância relativa 86,18% e dossel variando entre 28 e 30 m de altura (Arieira e Nunes da Cunha 2006). O índice de área foliar (IAF) do local de estudo foi em média 3,61 ± 0,03 m² m⁻² (Biudes, 2008).

O solo é classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico, com 56,4% de areia, 13,4% de silte, 30,2% de argila, densidade de 1,22 g cm⁻³, capacidade de campo de 0,43 m³ m⁻³, ponto de murcha permanente de 0,23 m³ m⁻³, relevo plano, declividade média de 2% e mal drenado. O clima é Aw segundo a classificação de Köppen, possuindo duas estações

bem definidas, uma seca de abril a outubro e outra úmida de novembro a março. Frequentemente a inundação ocorre entre dezembro e março (0,6 – 1,5m de altura) caracterizando a fase aquática do Pantanal, que acompanha a estação chuvosa (Nunes da Cunha e Junk, 2004) e a oscilação anual do nível d'água, que ocorre no rio Cuiabá, sendo altamente influenciada pela precipitação local (Arieira e Nunes da Cunha, 2006). A temperatura do ar apresenta sazonalidade durante o ano, com média de 27,1°C e 24,3°C nas estações chuvosa e seca, respectivamente. A estação chuvosa corresponde a 86% da precipitação acumulada anual (Biudes, 2008).

Os dados apresentados neste trabalho foram obtidos no período de 20 de dezembro de 2008 a 20 de janeiro de 2009. Os dias deste período correspondem a dias de verão, onde ocorre maior incidência de radiação solar. Além disso, coincide com a estação chuvosa havendo dias de diferentes coberturas do céu. No entanto, para a avaliação do comportamento do fluxo de CO₂, sob efeito da nebulosidade foram utilizados dez dias representativos do período. Durante o estudo não houve formação de lâmina d'água (inundação).

2.2 Sistema de medidas micrometeorológicas

O saldo de radiação sobre o dossel do cambarazal foi medido por meio de um saldo radiômetro (Net Radiometer, Kipp e Zonen Delft, Inc., Holland), a radiação solar global incidente foi realizada por meio de um piranômetro (LI-200, Campbell Sci, Inc., USA), a radiação fotossinteticamente ativa incidente também foi medida sobre o dossel por meio de um sensor quântico (LI-190, Campbell Sci, Inc., USA) e o fluxo de calor no solo por meio de dois fluxímetros de calor no solo (HFT-3.1, REBS, Inc., Seattle, Washington). Os gradientes de temperatura e umidade do ar foram medidos por meio de dois termohigrômetros (HMP 45 C, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland). A precipitação foi medida por meio de um pluviômetro de balsa (TB4-L25, Campbell Sci, Inc., USA). O perfil de concentração de gás carbônico foi medido a 3, 12, 20, 29, 33, 35 e 38 m de altura por um analisador infravermelho de gases (do inglês “*Infra-Red Gas Analyzer*”, IRGA) de circuito fechado (LI-820, LI-COR, USA), conectado a um sistema de válvulas solenoides. Na entrada de cada válvula fixou-se uma mangueira do tipo cristal com um filtro de ar na extremidade oposta para evitar que pequenos objetos se alojasse na célula óptica do IRGA (Xu et al., 1999; Araújo et al., 2010). O conteúdo de água no solo foi medido por meio de dois TDR (CS-615, Campbell Sci, Inc., USA), instalados a 5 e 25 cm de profundidade no solo.

Os dados produzidos por sinais e pulsos elétricos dos transdutores foram processados e armazenados por um datalogger (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah),

com médias de 30 minutos. Para aumentar o número de canais de entrada no registrador foi utilizada uma placa multiplexadora (AM16/32A-ST-SW, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah).

A classificação da cobertura do céu foi realizada por meio da metodologia proposta por Dallacort et al. (2004) em função da relação entre a radiação solar medida sobre o dossel e a estimada no topo da atmosfera.

2.3 Estimativa do fluxo de CO₂ pelo método da razão de Bowen modificada

O método da Razão de Bowen tem sido utilizado para estimar o balanço de energia e a evapotranspiração (*ET*) de uma superfície vegetada. As diversas propriedades atmosféricas ao se deslocarem, aleatoriamente, acima de uma superfície são transportadas pelo mesmo turbilhão, seguindo uma tendência de homogeneização destas propriedades com a altura. Portanto, todas as propriedades atmosféricas são igualmente transportadas pelo mesmo turbilhão, caracterizando a teoria da similaridade (Foken, 2006). Ao assumir a igualdade dos coeficientes de difusão turbulenta ao transporte da energia térmica, vapor de água e CO₂, essa técnica pode ser usada para estimar o fluxo vertical do CO₂ medido sobre o dossel de uma superfície vegetada.

O coeficiente de difusão turbulenta do calor sensível (K_H ; m² s⁻¹), foi calculado segundo a Equação 1.

$$K_H = \left(\frac{H}{\rho C_p} \right) \cdot \left(\frac{\Delta z}{\Delta T} \right) \quad (1)$$

em que H é o fluxo de calor sensível (J m⁻² s⁻¹), ρ é a densidade do ar (mg m⁻³), C_p é o calor específico a pressão constante (1,00467 J g⁻¹ K⁻¹) e Δz e ΔT são a diferença de altura (m) e a diferença de temperatura do ar (°C) entre os termohigrômetros superior e inferior.

O fluxo de calor sensível (H) foi obtido por meio da equação do balanço de energia, segundo a Equação 2.

$$R_n = LE + H + G \quad (2)$$

em que R_n é o saldo de radiação (W m⁻²), LE é o fluxo de calor latente (W m⁻²) e G é o fluxo de calor no solo (W m⁻²).

O fluxo de calor sensível (H) foi obtido por meio da substituição da equação da razão de Bowen (Equação 3) na Equação 2, resultando na Equação 4.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (3)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{\beta + 1} \quad (4)$$

em que β é a razão de Bowen (adimensional).

O fluxo líquido de CO₂ do ecossistema consiste na diferença entre o CO₂ absorvido na fotossíntese e a liberação durante a respiração pelas folhas, troncos, raízes e pelos

microrganismos do solo (Grace, 1995; Araújo et al., 2010). O fluxo líquido de CO₂ do cambarazal (A_{cf} ; $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) foi estimado pela Equação 5.

$$A_{cf} = K_c \cdot \left(\frac{\Delta C}{\Delta z}\right) \cdot \left(\frac{1000}{44}\right) \quad (5)$$

em que K_c é o coeficiente de difusão turbulenta do fluxo de CO₂ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), ΔC é a diferença de concentração de CO₂ (mg m^{-3}) entre as duas alturas consideradas e $(1000/44)$ é um fator que converte a unidade do fluxo de CO₂ de $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Wolf, et al., 2008). Aplicando-se a teoria da similaridade para o transporte turbulento, $K_c = K_H$. A concentração de CO₂ em cada altura (C_{ppm} ; ppm) foi corrigida pelo fator de temperatura (T ; °C) e pressão atmosférica (P_{atm} ; mbar) usando a Equação 6.

$$C = C_{ppm} 1,964 \left(\frac{273,15}{T + 273,15}\right) \left(\frac{P_{atm}}{1013}\right) \quad (6)$$

2.4 Estimativa da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen

A evapotranspiração do cambarazal (ET ; mm h^{-1}) foi definida por meio da Equação 7.

$$ET = \frac{LE}{\lambda} \quad (7)$$

em que LE do fluxo de calor latente (W m^{-2}) e λ é o calor latente de vaporização ($2,43 \text{ MJ kg}^{-1}$), considerado constante. O fluxo de calor latente foi estimado por meio da combinação das Equações 2 e 3, resultando na Equação 8.

$$LE = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterizações do microclima

Durante o período de estudo a precipitação acumulada foi de 305 mm e os maiores valores observados foram de 60 e 100 mm nos dias 357 e 359, respectivamente (Figura 1a). O maior período sem ocorrência de precipitação foi entre os dias 4 e 18.

No mesmo local, vários trabalhos registram maiores valores de precipitação durante o período de estudo. Biudes (2008), entre dezembro de 2006 e novembro de 2007, observou precipitação acumulada de 1357 mm, com 340 mm em dezembro de 2006 e 230 mm em janeiro de 2007. Fraga (2009) observou

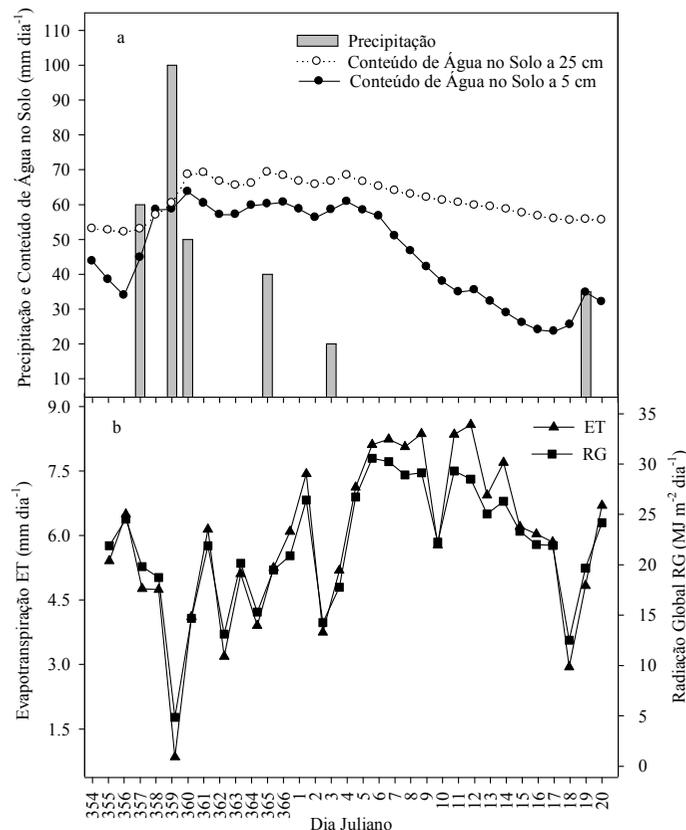


Figura 1 - (a) Precipitação diária (mm dia^{-1}) e média do conteúdo de Água no solo (mm dia^{-1}) a 5 e 25 cm de profundidade, (b) evapotranspiração diária (mm dia^{-1}) e radiação solar incidente diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) no Cambarazal, entre os dias julianos 356 de 2008 a 20 de 2009.

que o total de precipitação entre fevereiro de 2007 e janeiro de 2008 foi de 1435 mm, com maiores valores em novembro, dezembro e janeiro, com acumulados mensais de 310, 400 e 200 mm, respectivamente. Entretanto, durante o período de estudo foram registrados menores valores de precipitação em janeiro de 2009, como observado por Pereira (2009) que encontrou um acumulado de 320 mm e 105 mm em dezembro de 2008 e janeiro 2009, respectivamente. A diminuição da precipitação nesse período provocou atraso na formação de lâmina d'água (inundação), a qual ocorreu somente em 25 de fevereiro.

O conteúdo de água no solo a 25 cm de profundidade variou entre 51 e 69 mm dia⁻¹ e a 5 cm de profundidade, o conteúdo de água no solo variou entre 23 e 63 mm dia⁻¹ (Figura 1a). Variação semelhante foi observada por Borma et al. (2009), ao estudar a variabilidade interanual e sazonal da ET, em uma área sazonalmente inundável na Ilha do Bananal. Estes autores mediram o conteúdo de água no solo em seis níveis, e constataram que a maior variação mensal ocorreu próxima da superfície.

Entre os dias 360 e 4, ocorreram oscilações nos valores do perfil do conteúdo de água no solo, com uma amplitude de aproximadamente 10 mm dia⁻¹. Estas oscilações ocorreram em função da precipitação, pois os seus picos basicamente coincidem com os dias em que houve precipitação. O conteúdo de água no solo a 5 cm de profundidade diminuiu, praticamente de forma linear, de 60 mm dia⁻¹ no dia 4 para 23,6 mm dia⁻¹ no dia 16 a uma taxa média de 3,5 mm dia⁻¹, com exceção do dia 12 que não seguiu esta tendência, provavelmente pelo fato de que no dia 10 a cobertura do céu foi classificada com parcialmente nublado (Tabela 1), o que diminuiu a radiação solar incidente (RG) e a evapotranspiração (ET) (Figura 1b). Em geral, a diminuição do conteúdo de água no solo, durante este período, pode ter ocorrido em função da não ocorrência de precipitação (Figura 1a), aumento da RG e ET (Figura 1b) associado ao maior período de céu limpo (Tabela 1), o que evidencia a perda d'água próxima à superfície.

Durante todo o período, 55% dos dias foram classificados como parcialmente nublado, 3% nublado, e 42% céu limpo (Tabela 1). Em média, a ET e a RG durante o período de estudo foram 5,87 mm dia⁻¹ e 21,78 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente, variando de 0,84 mm dia⁻¹ e 4,85 MJ m⁻² dia⁻¹ no dia 360 a 8,57 mm dia⁻¹ no dia 12 e 30,56 MJ m⁻² dia⁻¹ no dia 6 (Figura 1b). A ET média do período de estudo esteve acima de valores médios na Floresta Amazônica na estação chuvosa, a qual chega a 4,3 mm dia⁻¹ (Rocha et al., 2009). O mesmo ocorreu com a média da RG que esteve acima de valores observados em Caxiuanã, onde Souza et al. (2002) observaram que a RG apresentou menor valor no período chuvoso 14,8 MJ m⁻² dia⁻¹ e maior valor no período menos chuvoso 19,3 MJ m⁻² dia⁻¹, e na Reserva Vale do Rio Doce, sul do Pará, onde o máximo foi de 19,33 MJ m⁻²

Tabela 1 - Evapotranspiração diária (ET em mm dia⁻¹) e da radiação solar incidente diária (RG em MJ m⁻² dia⁻¹) e classificação da cobertura de céu no Cambarazal, entre os dias julianos 356 de 2008 a 20 de 2009.

Ano	Dia	ET	RG	Cobertura do céu
	Juliano	mm dia ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	
2008	356	5.4125	21.90	Parc.Nublado
2008	357	6.4956	24.53	Céu Limpo
2008	358	4.7609	19.83	Parc.Nublado
2008	359	4.7404	18.74	Parc.Nublado
2008	360	0.8456	4.85	Nublado
2008	361	4.109	14.69	Parc.Nublado
2008	362	6.1395	21.90	Parc.Nublado
2008	363	3.1884	13.11	Parc.Nublado
2008	364	5.1057	20.14	Parc.Nublado
2008	365	3.9031	15.31	Parc.Nublado
2008	366	5.2513	19.50	Parc.Nublado
2009	1	6.088	20.90	Parc.Nublado
2009	2	7.4318	26.43	Céu Limpo
2009	3	3.7485	14.26	Parc.Nublado
2009	4	5.1864	17.78	Parc.Nublado
2009	5	7.1193	26.74	Céu Limpo
2009	6	8.1115	30.56	Céu Limpo
2009	7	8.2353	30.25	Céu Limpo
2009	8	8.064	28.93	Céu Limpo
2009	9	8.3628	29.12	Céu Limpo
2009	10	5.773	22.24	Parc.Nublado
2009	11	8.3516	29.30	Céu Limpo
2009	12	8.5754	28.51	Céu Limpo
2009	13	6.935	25.04	Céu Limpo
2009	14	7.6975	26.30	Céu Limpo
2009	15	6.2036	23.32	Céu Limpo
2009	16	6.0338	22.02	Parc.Nublado
2009	17	5.8455	21.92	Parc.Nublado
2009	18	2.9408	12.52	Parc.Nublado
2009	19	4.8333	19.66	Parc.Nublado
2009	20	6.6961	24.17	Céu Limpo

dia⁻¹ em junho e o mínimo de 14,41 MJ m⁻² dia⁻¹ em dezembro (Culf et al., 1996).

Os valores da ET estão associados à RG com $r = 0,98$. Isso pode ser observado na Figura 1b, que coincidem a diminuição da ET em função da RG. As variáveis meteorológicas assumem maior importância na definição da ET, e comandam o transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera (Dalmago et al., 2006). O efeito da radiação, é linear e positivo devido à influência que a radiação exerce sobre o controle estomático (Marcelis, 1989), enquanto não forem alcançados níveis altos o suficiente para causar estresse hídrico nas folhas mais expostas à radiação (Baille et al., 1994). A radiação solar é o elemento meteorológico que mais afeta a ET (Stanghellini, 1993), porque fornece a energia para esse processo (Dalmago et al., 2006).

3.1 Variação horária do perfil da concentração de CO₂

O perfil de concentração de CO₂ foi analisado por meio de médias às 0, 6, 9, 12, 18 e 21 horas durante cinco dias de céu parcialmente cobertos (Figura 2) e cinco dias de céu limpo (Figura 3). Em geral, a concentração de CO₂ foi maior no período noturno, aumentando das 21 horas do dia anterior às 6 horas do dia posterior. Durante esse período, a concentração de CO₂ foi maior a 3 m, diminuindo com o aumento da altura até 20 m. Em dias de céu limpo, a concentração de CO₂ às 6 horas, em todo o perfil (Figura 3), foi maior do que em dias de céu parcialmente nublado (Figura 2).

A maior concentração de CO₂ a 3 m de altura está relacionada com a proximidade do solo. Com a ausência da RG no período noturno, naturalmente ocorre diminuição da temperatura do ar e aumento da umidade relativa do ar. Isso propicia maior respiração das raízes e microrganismos responsáveis pela decomposição do material orgânico, fauna do solo e pela oxidação química dos compostos de carbono (Meir et al., 1996). A respiração do solo é um elemento importante no balanço de carbono da floresta, pois pode representar de 60 a 80% da respiração do ecossistema (Raich e Schlesinger, 1992) ou de 40 a 60% da produtividade primária bruta (Janssens et al., 2002). Entre os fatores físicos do solo, a temperatura e

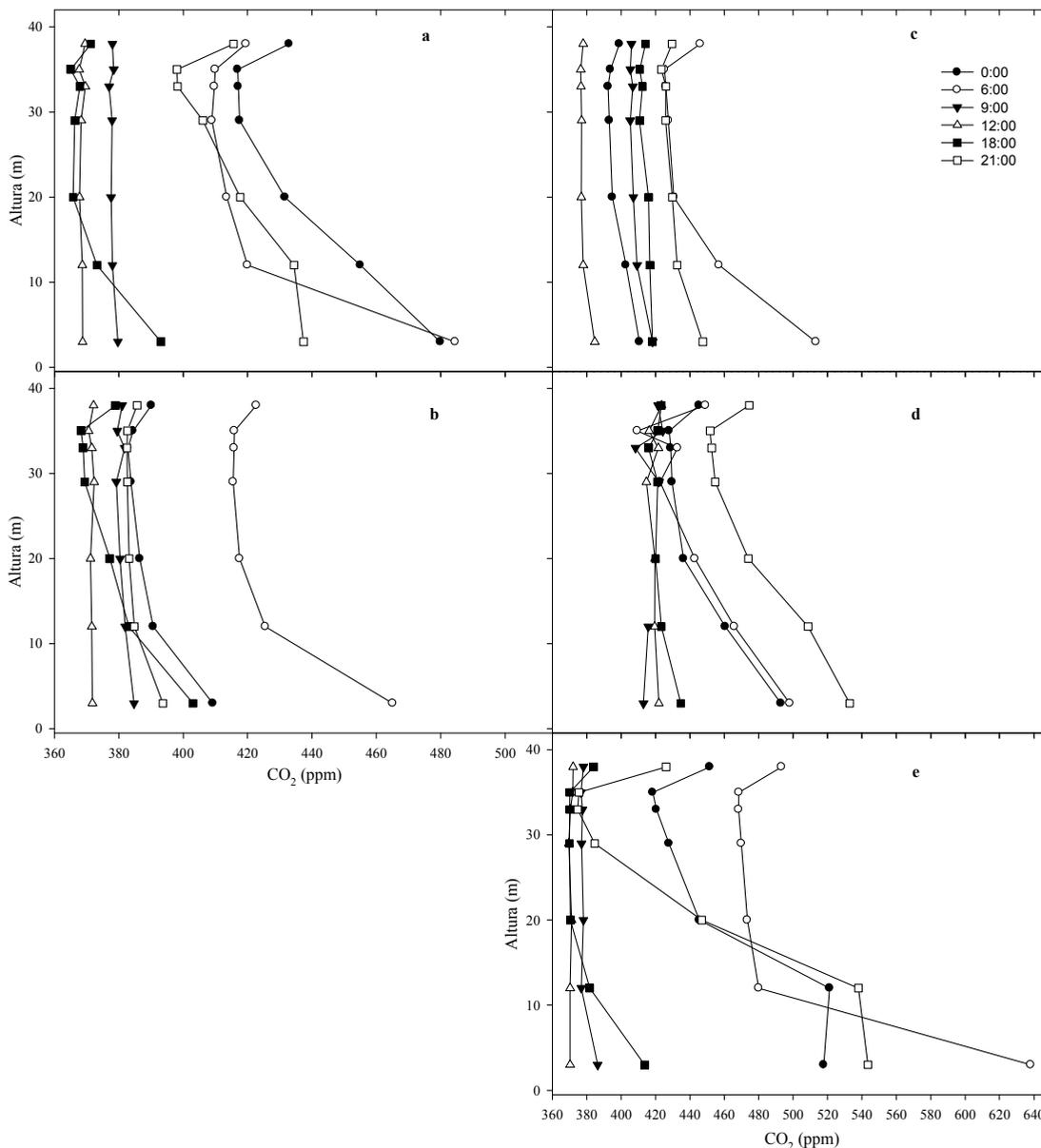


Figura 2 - Perfil da concentração de CO₂ (ppm) no Cambarazal, durante os dias julianos (a) 358, (b) 359, (c) 360, (d) 361 e (e) 362 de 2008, classificados como céu parcialmente nublados.

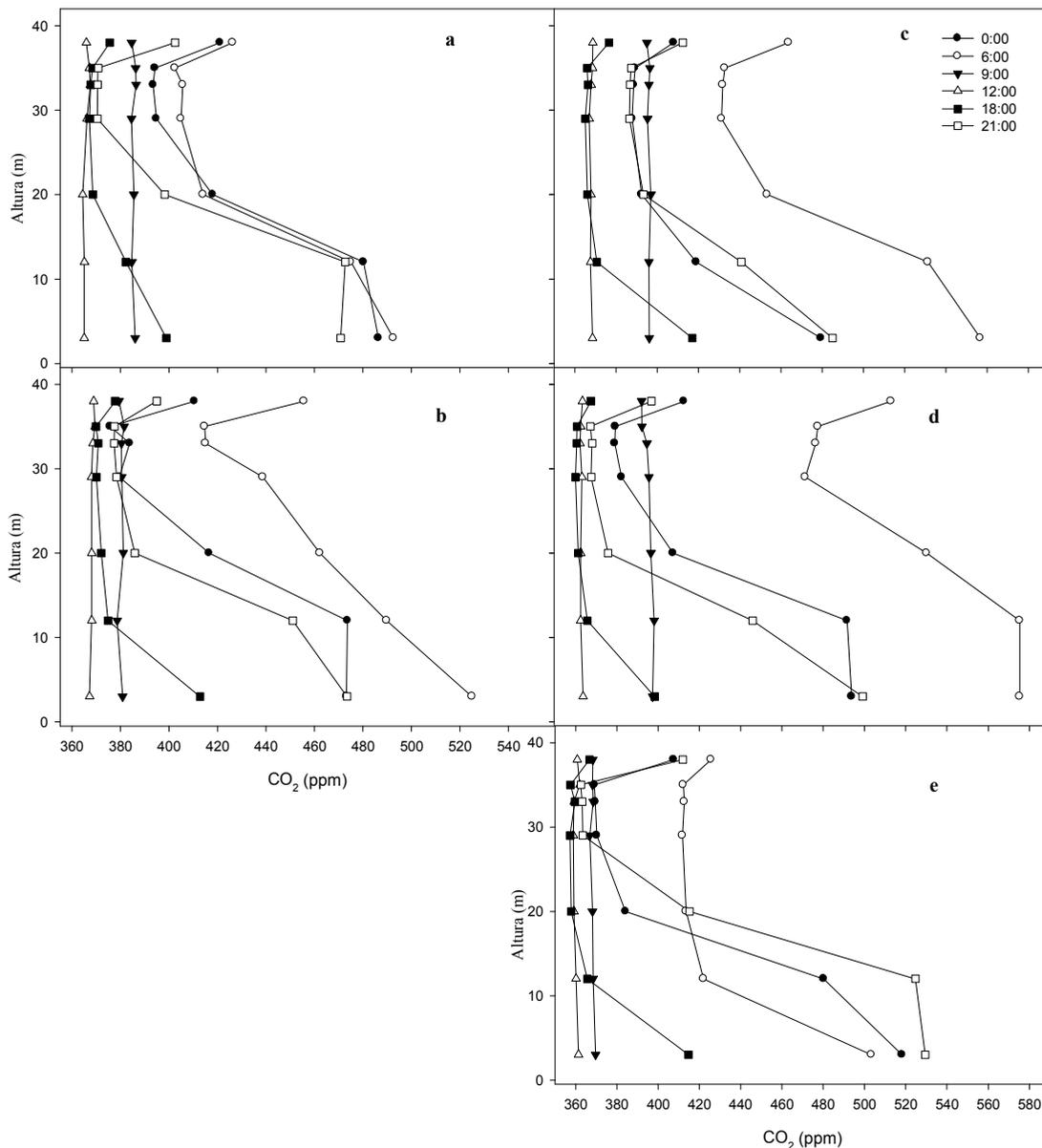


Figura 3 - Perfil da concentração de CO₂ (ppm) no Cambarazal, durante os dias julianos (a) 5, (b) 6, (c) 7, (d) 8 e (e) 9 de 2009, classificados como céu claro.

o conteúdo de água no solo são os que, significativamente, mais influenciam na respiração do solo (Bahn et al., 2008). Assim, o aumento da concentração de CO₂ em todo o perfil do dossel às 6 horas nos dias de céu limpo, provavelmente se deve à maior atividade microbiana do solo em função da maior temperatura do solo, a qual se deve à maior disponibilidade energética proveniente da RG. Além disso, o conteúdo de água no solo durante esse período foi menor do que nos dias de céu parcialmente nublado analisados. Provavelmente, houve menor quantidade de água nos poros do solo, contribuindo para maior difusão de CO₂ devido à atividade microbiana (Reth et al., 2008).

A diminuição da concentração de CO₂ com a altura durante o período noturno foi devido à maior estabilidade térmica. Dessa forma, maior quantidade de CO₂ permanece estocada no interior do dossel, sendo possível sua estratificação com maiores valores nas camadas inferiores do dossel e o aumento da concentração durante o período noturno (Araújo et al., 2008; Araújo et al., 2010). A dinâmica da concentração de CO₂ no período noturno varia em função das condições meteorológicas. Em dias calmos com estratificação estável de temperatura, maior parte do CO₂ respirado permanece estocado dentro do dossel, podendo ser reabsorvido ou liberado ao amanhecer. Ao contrário, em noite menos estáveis, uma

parte do CO₂ estocado é liberado continuamente pela noite. A estabilidade atmosférica no período noturno está relacionada à velocidade do vento, nebulosidade e a intensidade do aquecimento do dia anterior (Malhi et al., 1998).

Outro fator que pode ter contribuído para o acúmulo de CO₂ na parte inferior do dossel é a baixa inclinação do terreno do sítio experimental. Todo o Pantanal apresenta inclinação entre 0,3 e 0,5 m km⁻¹ de leste a oeste e 0,03 e 0,15 m km⁻¹ de norte a sul (Franco e Pinheiro, 1982). A baixa inclinação do terreno não favorece a ocorrência de fluxo catabático noturno (Araújo et al., 2010).

No período diurno, entre 9 e 12 horas, a concentração de CO₂ ao longo do perfil e os seus gradientes são menores do que durante o período noturno. Esse comportamento ocorre, pois nas primeiras horas desse período, o aumento da turbulência e a instabilidade atmosférica no topo do dossel favorece a ocorrência do fluxo ascendente de CO₂ (Araújo et al., 2010).

3.2 Variação horária do fluxo de CO₂

O fluxo de CO₂ do dossel (Acf) foi analisado por meio de médias a cada 30 minutos durante cinco dias de céu

parcialmente cobertos (Figura 4) e cinco dias de céu limpo (Figura 5). Em média, a ET esteve fortemente correlacionada com a PARi ($r = 0,97$) e a ET em dias de céu limpo (Figura 5) foi aproximadamente 87,3% maior do que nos dias de céu parcialmente nublados (Figura 4).

Em geral, o Acf apresentou valores positivos durante o período noturno e valores negativos durante o período diurno. Este comportamento é semelhante ao Acf médio pelo do método de EC em diferentes locais da Amazônia em floresta (Vourlitis et al., 2011; Vourlitis et al., 2004; Araujo et al., 2008; Araujo et al., 2010) e pastagem (Eugster e Zeeman, 2006). Durante os dias de céu limpo, o dossel do camarazal assimilou mais CO₂ ($-3,01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que durante os dias de céu parcialmente nublado ($-1,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Essa diferença é esperada, pois troca líquida de CO₂ do ecossistema é primariamente dependente da radiação solar incidente (Chapin et al., 2011).

O Acf noturno durante os dias de céu parcialmente nublado (Figura 4) foi menor ($0,98 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e com menor amplitude do que nos dias de céu limpo ($14,03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), quando o fluxo de CO₂ apresentou tendência positiva entre 18 horas do dia anterior e 6 horas do dia posterior (Figura 5). Essa diferença pode estar relacionada com a maior temperatura do solo,

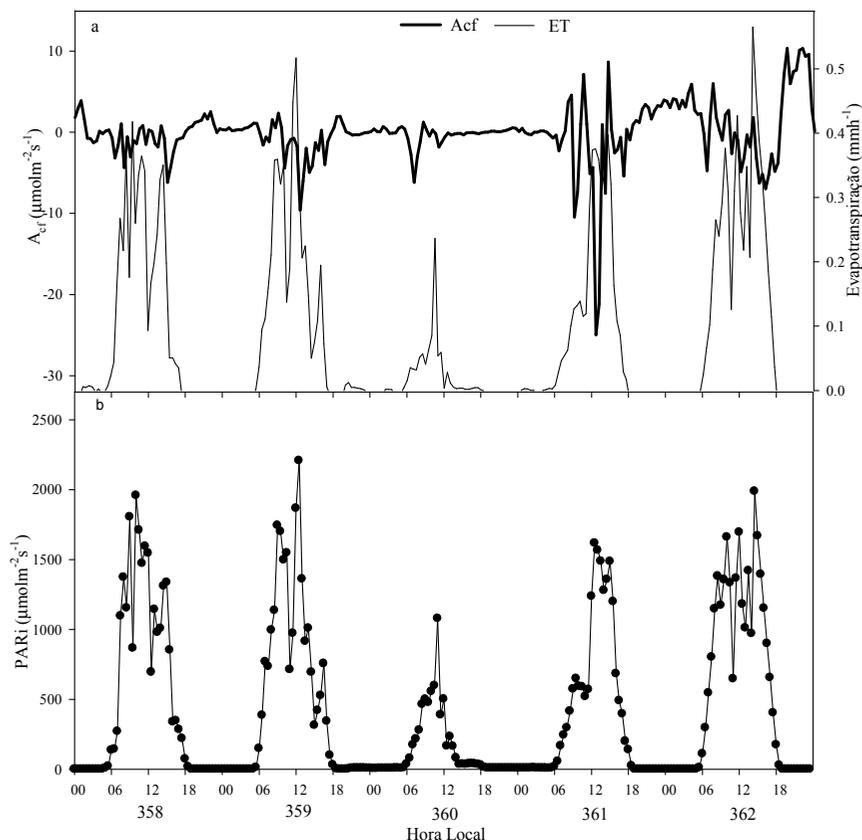


Figura 4 - (a) Fluxo de CO₂ horário sobre o dossel ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e evapotranspiração horária (mm h^{-1}) e (b) radiação fotossinteticamente ativa incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre o camarazal, durante os dias julianos 358, 359, 360, 361 e 362 de 2008, classificados como céu parcialmente nublados.

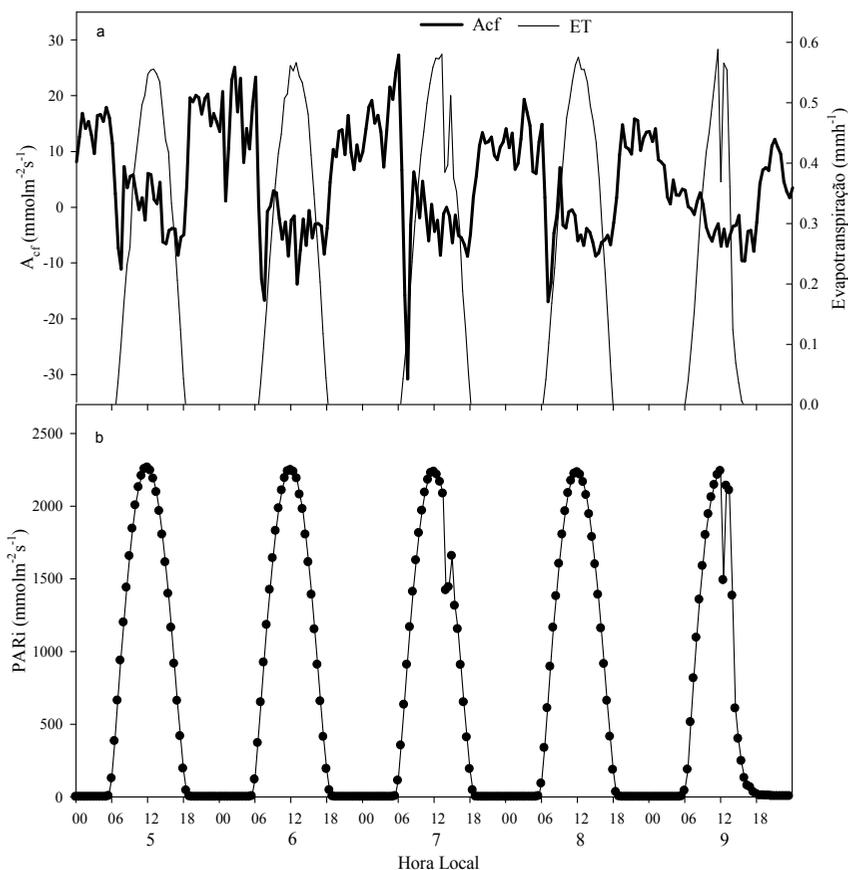


Figura 5 - (a) Fluxo de CO_2 horário sobre o dossel ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e evapotranspiração horária (mm h^{-1}) e (b) radiação fotossinteticamente ativa incidente ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sobre o camarazal, durante os dias julianos 5, 6, 7, 8 e 9 de 2009, classificados como céu limpo.

devido à maior disponibilidade de energia, e com a diminuição na quantidade de água presente nos poros do solo (Bahn et al., 2008; Reth et al., 2008). O aumento do Acf durante o período noturno nos dias de céu limpo indica que o CO_2 produzido pela respiração das plantas e do solo foi liberado continuamente. Provavelmente, a atmosfera desses dias esteve menos estável do que nos dias de céu parcialmente nublados (Malhi et al., 1998).

4. CONCLUSÕES

A concentração de CO_2 ao longo do perfil vertical do dossel, durante o período noturno, foi maior nos dias de céu limpo, como resultado do aumento da temperatura e diminuição do conteúdo de água no solo, o que desencadeou maior atividade microbiana no solo. Nesses dias, houve maior estoque de CO_2 no interior do dossel.

Os valores de Acf estimados pelo método da razão de Bowen modificada apresentou comportamento semelhante aos observados pelo método da correlação de vórtices turbulentos. O Acf do dossel do Camarazal, durante o período diurno, nos dias de céu limpo foi 75% maior do que nos dias de céu parcialmente

nublado como resultado da maior disponibilidade de energia.

O atraso na formação da lamina d'água, durante o período de estudo, pode ter sido ocasionado pela diminuição da precipitação local.

O conteúdo de água no solo aumentou de acordo com a ocorrência de precipitação, havendo maior variação, próximo a superfície 5 cm, do que na camada mais profunda, 25 cm.

A Evapotranspiração (ET) esteve fortemente correlacionada com a Radiação Global (RG), $r = 0,98$. Os maiores valores da ET ocorreram durante o maior período sem precipitação, de céu limpo, maior disponibilidade de RG e menores valores do conteúdo de água no solo, próximo a superfície, ou seja, estes fatores também contribuíram para que houvesse maior evaporação da água do solo.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao apoio financeiro da CAPES em relação à bolsa de doutorado. Agradece-se ao SESC Pantanal pelo apoio logístico e ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental PGFA-UFMT.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELL, R.F.; SVEJCAR, T.; BATES, J.; SALIENDRA N.Z.; JOHNSON, D.A. Bowen ratio and closed chamber carbon dioxide flux measurements over sabebush steppe vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, p. 153–161, 2001.
- ARAÚJO, A.C.; DOLMAN, A.J.; WATERLOO, M.J.; GASH, J.H.C.; KRUIJT, B.; ZANCHI, F.B.; LANGE, J.M.E.; STOEVELAAR, R.; MANZI, A.O.; NOBRE, A.D.; LOOTENS, R.N.; BACKER, J. The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, p.226-237, 2010.
- ARAÚJO, A.C.; KRUIJT, B.; NOBRE, A.D.; DOLMAN, A.J.; WATERLOO, M.J.; MOORS, E. J.; SOUZA, J.S., Nocturnal Accumulation of CO₂ Underneath a Tropical Forest Canopy Along a Topographical Gradient. **Ecological Applications**, v.18, p.1406-1419, 2008.
- ARIEIRA, J.; NUNES DA CUNHA, C. Fitossilogia de uma floresta inundável monodominante de *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae), no Pantanal Norte, MT, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v.20, n.3, p.569-580, 2006.
- ASSENG, S.; HSIAO, T.C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. **Field Crops Research**, v.67, p.191-206, 2000.
- BAHN, M. et al. A. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply. **Ecosystems**, v.11, p.1352–1367, 2008.
- BAILLE, M. et al. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.71, p.83-97, 1994.
- BALDOCCHI, D. A Comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) crop: II. CO₂ exchange and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.67, p.291-321, 1994.
- BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.09, p.479-492, 2003.
- BIUDES, M. S., CAMPELO Jr, J. H., NOGUEIRA, J. S., SANCHES, L. Estimativa do Balanço de Energia em Cambarazal e Pastagem no Norte do Pantanal pelo Método da Razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, p.135-145, 2009.
- BIUDES, M.S. **Balanço de Energia em área de vegetação monodominante de cambará e pastagem no norte do pantanal**. 2008. 142 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2008.
- BORMA, L.S.; ROCHA, H.R.; CABRAL, O.M.; von RANDOW, C.; COLLICCHIO, E.; KURZATKOWSKI, D.; BRUGGER, P.J.; FREITAS, H.; TUNNUS, R.; OLIVEIRA, L.; RENNÓ, C.D.; ARTAXO, P.; Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v.114, G01003, 2009.
- CAMPOS, J. G. **Escala temporal da turbulência para escoamento noturno acima da copa de uma floresta tropical úmida na Amazônia**. 2008. 61 f. Dissertação (Mestrado em Física) Centro de Ciências Rurais, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- CHAPIN, F.S.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A. **Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology**. Springer, New York. 529p., 2011.
- CHUNLIN, W.; GUOYI, Z.; XU, W.; XULI, T.; CHUANYAN, Z.; GUIRUI, Y. Below-canopy CO₂ flux and its environmental response characteristics in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China. **Acta Ecologica Sinica**, v.27, p.846–854, 2007.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the river Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? **Journal of Hydrology**, v.245, p.218-238, 2001.
- CULF, A.D.; ESTEVES, J.L.; MARQUES FILHO, A.O.; ROCHA, H.R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazônia. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Eds.) **Amazonian Deforestation and Climate**. New York: J. M. Wiley and Sons, 1996, p.175-192.
- DALLACORT, R.; RICIERI, R.P.; SILVA, S.L.; FREITAS, P.S.L.; SILVA, F.F. Análises do comportamento de um actinógrafo bimetálico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.26, n.4, p.413-419, 2004.
- DALMAGO, G.A.; HELDWEIN, A.B.; NIED, H.A.; GRIMM, E.L.; PIVETTA, C.R. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. **Ciência Rural**, v.36, n.3, p.785-792, 2006.
- EUGSTER, W., ZEEMAN, M. J., Micrometeorological techniques to measure ecosystem-scale greenhouse gas fluxes for model validation and improvement **International Congress Series**. p. 66-75, 2006
- FOKEN, T. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory. **Boundary-Layer Meteorology**, v.119, p.431-447, 2006.
- FRAGA, C. I. M. **Evapotranspiração e fator de desacoplamento em área de cambarazal no Pantanal**.

- 2009, 56f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2009.
- FRANCO, M.S.M.; PINHEIRO, R. Geomorfologia. In: Brasil, Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SE. 21 Corumbá e SE 20. **Levantamento de Recursos Naturais**, 27. Rio de Janeiro. 1982, p.161-224.
- GRACE, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H.; MONCRIEFF, J.; WRIGTH, I.; GASH, J. Fluxes of carbon dioxide and vapor over undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. **Global Change Biology**, v.1, p.1-12, 1995.
- JANSSENS, A. et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European Forests. **Global Change Biology**, v.7, p.269–278, 2002.
- JUNK W.J. Long-term environmental trends and the future of tropical wetlands. **Environmental Conservation**, v.29, n.4, p.414-435, 2002.
- JUNK, W.J.; NUNES DA CUNHA, C. Pantanal: a large South American wetland at a crossroads. **Ecological Engineering**, v.24, p.391-401, 2005.
- JUNK, W.J.; NUNES DA CUNHA, C.; WANTZEN, K.M.; PETERMANN, P.; STRÜSSMANN, C.; MARQUES, M.I.; ADIS, J. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Sciences**, v.68, p.278-309, 2006.
- MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.G.P.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p.3159331612, 1998.
- MARCELIS, L.F.M. Simulation of plant-water relations and photosynthesis of greenhouse crops. **Scientia Horticulturae**, v.41, p.9-18, 1989.
- MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A.; LLOYD, J. Soil respiration in a rainforest in Amazonia and in cerrado in central Brazil. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Eds.) **Amazonian Deforestation and Climate**. New York: J. M. Wiley and Sons, 1996, p.319-329.
- MEYERS, T.P.; HALL, M.E.; LINDBERG, S.E.; KIM, K. Use of the Modified Bowen-Ratio Technique to Measure Fluxes of Trace Gases. **Atmospheric Environment**, v.30, n.19, p.3321-3329, 1996.
- MILLER, S. D.; GOLDEN, M.L.; MENTON, M. C.; ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; FIQQUEIRA, A. M. S.; SOUSA, C. A. D. Biometric and micrometeorological measurements of tropical Forest carbon balance. **Ecological Application**, v. 14, p. 114- 126, 2004.
- NEUE, H.U.; GAUNT, J.L.; WANG, Z.P.; BECHERHEIDMANN, P.; QUIJANO, C. Carbon in tropical wetlands. **Geoderma**, v.79, p.163-185, 1997.
- NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W.J. Year-to-year changes in water level drive the of *Vochysia divergens* in Pantanal glassland. **Applied Vegetation Science**, v.7, p.103-110, 2004.
- PEREIRA, O.A. **Determinação do fluxo de CO₂ numa área monodominante de cambará no norte do Pantanal mato-grossense**, 2009. 59 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso. 2009.
- RAICH, J.W.; SCHLESINGER, W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, v.44, p.81-99, 1992.
- RETH, S.; REICHSTEIN, M.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – a modified model. **Plant and Soil**, v.268, p.21–33, 2008.
- ROCHA, H.R. et al. Patters of water and heat flux across a biome gradiente from tropical forest to savana in Brazil, **Journal of Geophysics Resource**, v.114, p.1-8, 2009. doi: 10.1029/2007JG000640
- SILVA Jr, R.S.; MOURA, M.A.L.; MEIXNER, F.X.; KORMANN, R.; LYRA, R.F.F.; FILHO, M.F.N. Estudo da Concentração do CO₂ Atmosférico em área de Pastagem na Região Amazônica. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.22, n.3, p.259-270, 2004.
- SOUZA, J.R.S.; COHEN, J.C.P.; COSTA, A.C.L.; LOPES, Z.F. Soil temperature and moisture variability, beneath forest, pasture and mangrove areas, In Eastern Amazonia. II Conferência Científica Internacional do Experimento LBA. Manaus-AM, Julho de 2002.
- STANGHELLINI, C. Evapotranspiration in greenhouse with special reference to Mediterranean conditions. **Acta Horticulturae**, v.335, p.295-304, 1993.
- VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; BIUDES, M.S.; ORTÍZ, C.E.R.; NOGUEIRA, J.S. Spatial variations in soil chemistry and organic matter content across a *Vochysia divergens* invasion front in the Brazilian Pantanal. *Soil Science Society of America Journal*, v.75, p.1554-1561, 2011.
- VOURLITIS, G.L.; PRIANTE FILHO N.; HAYASHI, M.M.S.; NOGUEIRA, J.S.; RAITER, F.; HOEGEL, W.; CAMPELO, JR.J.H. Effects of Meteorological Variations on the CO₂ Exchange of a Brazilian Transitional Tropical Forest. **Ecological Applications**, v.14, p.89-100, 2004.
- XU, L. K.; MATISTA, A. A.; HSIAO, T. C. A technique for measuring CO₂ and water vapor profiles within and above plant canopies over short periods. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 94, p. 1-12, 1999.

WOLF, A.; SALIENDRA, N.; AKSHALOV, K.; JOHNSON, D.A.; LACA, E. Effects of different eddy covariance correction schemes on energy balance closure and comparisons with the modified Bowen ratio system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.48, p.942-952, 2008.