



AS RELAÇÕES ENTRE
A VEGETAÇÃO E O MEIO FÍSICO
NO CERRADO PÉ-DE-GIGANTE

14.
Ciclo do Carbono

Humberto R. da Rocha
Helber C. de Freitas
Rafael Rosolem
Rafael N. Tannus
Robinson I. Negrón-Juárez
Marcos V. Ligo
Oswaldo M. R. Cabral
Humberto N. de Mesquita Jr.
Marisa D. Bitencourt

Interação da superfície com a biosfera

O ciclo do carbono é sua circulação fechada nos compartimentos da biosfera, atmosfera, hidrosfera e litosfera. Na atmosfera há, principalmente, dióxido de carbono (CO_2), que, mesmo em pequena proporção em relação ao carbono planetário (0,001%), é essencial à vida na Terra ao equilíbrio do clima. Denomina-se de ciclo lento do carbono à circulação do carbono fixado nas rochas sedimentares e combustíveis fósseis, que retornam à atmosfera na escala de milênios, por meio de vulcanismo, erosão (fluvial) e extração. As trocas da biosfera e do oceano com a atmosfera formam o que se chama de ciclo rápido do carbono. A concentração na atmosfera de alguns gases-estufa (que absorvem a radiação infra-vermelha termal), principalmente o CO_2 e o metano (CH_4), aumentou de modo considerável, nas últimas décadas, como resultado do desbalanço entre as entradas e as saídas de carbono, devido à queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento e às queimadas de vegetação (Tabela 14.1), principais responsáveis pela observação do aquecimento global nos últimos 100 anos (IPCC, 2001).

São fortes os vínculos entre a atmosfera e a biosfera. O clima é um dos principais controladores do funcionamento e existência dos ecossistemas terrestres. Alguns dos elementos climáticos, como a temperatura e a precipitação, exercem notável controle na sua capacidade de absorver (ou de emitir) carbono da (ou para a) atmosfera. Os possíveis cenários previstos de alterações climáticas para o próximo século são muito significativos para modificar os habitats de certas formas de vida e, conseqüentemente, a própria biodiversidade. Ao mesmo tempo, as trocas de carbono da biosfera terrestre com a atmosfera mobilizam cerca de 15% do carbono atmosférico anualmente, o que indica uma alta sensibilidade na modificação da concentração global. Na década de 1990, os ecossistemas terrestres foram responsáveis pelo sumidouro de aproximadamente metade da quantidade de carbono que aumenta a cada ano (Tabela 14.1). Esses argumentos introduzem uma linha de investigação científica conhecida como interação biosfera-atmosfera, que ocorre nas escalas local e regional, e produz efeitos em escala global.

Tabela 14.1. Fontes, sumidouros e taxa de armazenamento de CO_2 (em $\text{PgC.ano}^{-1} = \text{GtC.ano}^{-1}$). Os fluxos positivos indicam liberação para a atmosfera e os negativos, a remoção de carbono da atmosfera. Fonte: adaptado de IPCC (2001) e Schimmel et al. (2001).

	Entradas (fontes) e saídas (sumidouros) de carbono (para a) e (na) atmosfera.	Taxas de troca ou fluxos
Fontes	Emissão por combustíveis fósseis/produção de cimento	$6,4 \pm 0,4$
	Desmatamento, queimadas e mudanças no uso da terra	$1,7 \pm 0,8$
Sumidouros	Oceanos	$-1,7 \pm 0,5$
	Reflorestamento, rebrota de florestas e impactos de manejo do solo no Hemisfério Norte	$-1,3 \pm 0,9$
	Reflorestamento, rebrota de florestas e manejo do solo no Hemisfério Sul	$-1,9 \pm 1,3$
Líquido	Aumento na atmosfera	$3,2 \pm 0,1$

Estimativa das trocas ou fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres

Há duas formas principais de estimar-se o fluxo de carbono entre a biosfera terrestre e a atmosfera. A primeira baseia-se na biometria, por meio da medição dos estoques de carbono em intervalos espaçados de tempo (de meses a anos). Esse método avalia no campo a quantidade de biomassa no ecossistema, monitorando a variação da biomassa epigéia, a hipogéia, e o carbono que existe no solo, em áreas de controle chamadas de parcelas permanentes (Adlard, 1990). Geralmente são feitas algumas parcelas destrutivas, por onde se constroem as curvas de validação e extrapolação (com equações halométricas) particulares das espécies locais. Essas curvas serão aplicadas nas parcelas permanentes para o monitoramento com o tempo. O segundo método, chamado micrometeorológico, estima os fluxos e, portanto, a variação dos estoques, na forma de monitoramento automático e em tempo quase real. Nesse método, aborda-se a estimativa dos fluxos de espécies químicas – como o CO_2 e a água –, o calor ou energia térmica, e outros gases (CH_4 e compostos orgânicos voláteis) entre a superfície e a atmosfera. No caso do CO_2 , determina-se a quantidade de carbono assimilada ou emitida por área unitária e por unidade de tempo. A técnica utilizada é denominada de eddy correlation, ou correlação dos vórtices turbulentos, que, de forma simples, estima os fluxos médios a cada 30 minutos, aproximadamente.

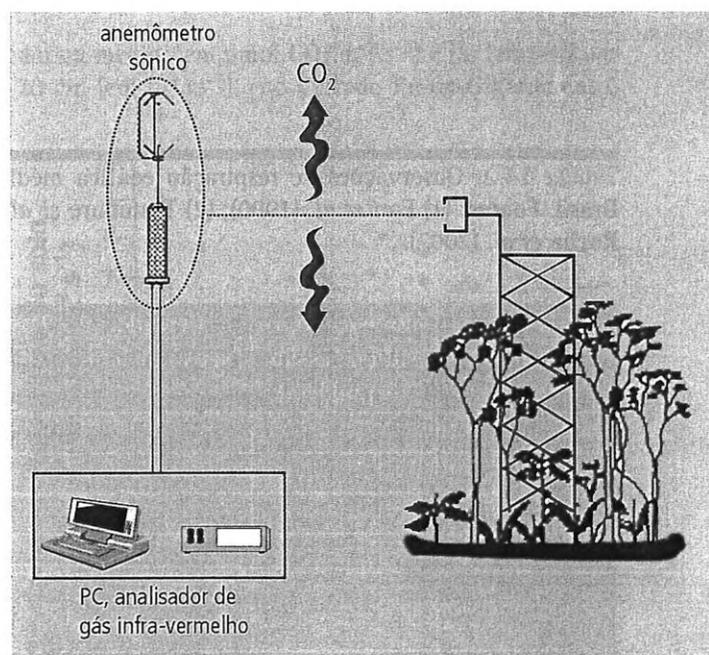
De forma simples, o método supõe que o ar logo acima do dossel possa ser enriquecido de CO_2 originado da emissão da superfície (respiração) ou, alternativamente, empobrecido, como resultado da assimilação de CO_2 por fotossíntese. Em outras palavras, a concentração atmosférica de CO_2 acima do dossel diminui quando há fotossíntese e aumenta quando há respiração, e o método contabiliza estes transportes de forma rápida. Uma discussão do método e sua utilização são reportados por Baldocchi (2003).

Observações no Cerrado Pé-de-Gigante

Coleta dos dados

Os dados reportados foram obtidos em uma plataforma instrumental automática no período de 1º de novembro de 2000 a 15 de março de 2002, em sensores no solo e em outros fixados numa torre instrumental de 21 m de altura (Figura 14.1). Os sensores de temperatura e umidade do ar foram controlados por um datalogger CR10X (Campbell Systems), com aquisição a cada 15 segundos e gravação das médias de 10 minutos. Os fluxos atmosféricos de CO_2 foram estimados com um sistema de eddy correlation, utilizando um anemômetro sônico (Gill Solent R2A) e um analisador de $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (frequência de aquisição de 5 Hz) LiCor-6262 (Figura 14.1). Outros detalhes de posição da plataforma instrumental e da implantação de sensores são descritos no Capítulo 4.

Figura 14.1. Esquema da estrutura e componentes de um sistema de eddy correlation para medição automática dos fluxos de CO_2 , água e calor na interface dosel-atmosfera.



A respiração edáfica foi medida utilizando-se uma câmara de solo com analisador EGM-2 (PP-Systems, UK) sobre 17 colares de PVC (diâmetro de 10 cm), instalados permanentemente próximo à torre e monitorados com frequência semanal. Em cada colar amostrou-se a temperatura a 1 cm do solo junto com a medida de respiração.

Respiração edáfica

As taxas de respiração edáfica médias em cada evento variaram entre, aproximadamente, 1,5 e 8,5 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, com um padrão que acompanhou a sazonalidade, conforme sugere a Figura 14.2. Durante a estação seca, as emissões são consideravelmente menores que na estação chuvosa. Nota-se que, a partir do início de setembro até o início de janeiro, há tendência crescente de aumento, quando, então, a série se torna estacionária. Outras duas particularidades diferenciam a estação seca da chuvosa: a variabilidade intra-sazonal, mais reduzida, e a própria variação entre as medidas durante um dia de coletas (representada pelo desvio-padrão), também maior na estação chuvosa. A média ao longo de todo o período foi de $4,8 \pm 2,2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Uma síntese comparando emissões similares em outros ecossistemas tropicais é mostrada na Tabela 14.2. Verifica-

se que, no Cerrado Pé-de-Gigante, a respiração edáfica está acima das médias em pastagens bem manejadas e abaixo das florestas tropicais úmidas. Esses dados são discutidos em Rocha *et al.* (2002).

Figura 14.2. Variação no tempo das medidas de respiração edáfica no Cerrado Pé-de-Gigante entre fevereiro de 2001 e abril de 2002. Os valores são médias diárias por evento de coleta (dia) (com o respectivo desvio-padrão entre as medidas espaciais nos colares) em $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

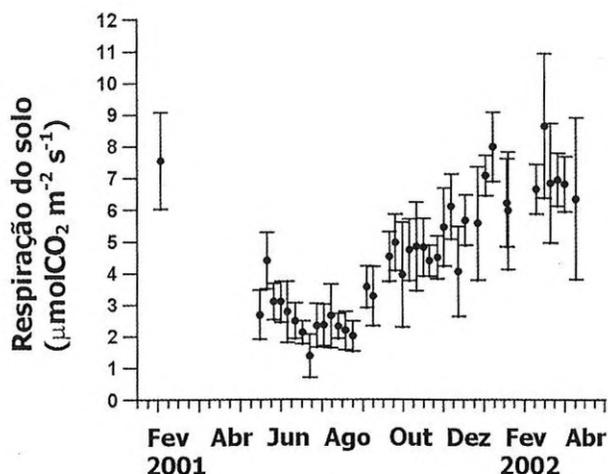


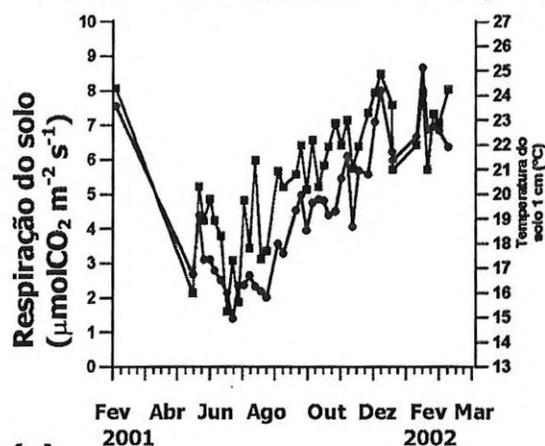
Tabela 14.2. Observações de respiração edáfica média utilizando-se câmara de solo em vários ecossistemas no Brasil. Fontes: (1) Fan *et al.* (1990); (2) Trumbore *et al.* (1995); (3) Meir *et al.* (1996); (4) Davidson *et al.* (2000); (5) Rocha *et al.* (2002).

Floresta tropical úmida	Floresta tropical (sucessão secundária)	Cerrado sensu stricto	Pastagem ativa	Pastagem degradada	Local
5,1	-	-	-	-	Manaus, AM (1)
5,5-6,7	-	-	3,2-5,3	2,5-3,2	Paragominas, PA (2)
5,5	-	-	-	-	Ji-Paraná, RO (3)
5,2	4,7	-	3,9	2,6	Paragominas, PA (4)
-	-	$4,8 \pm 2,2$	-	-	Santa Rita do Passa Quatro, SP (5)

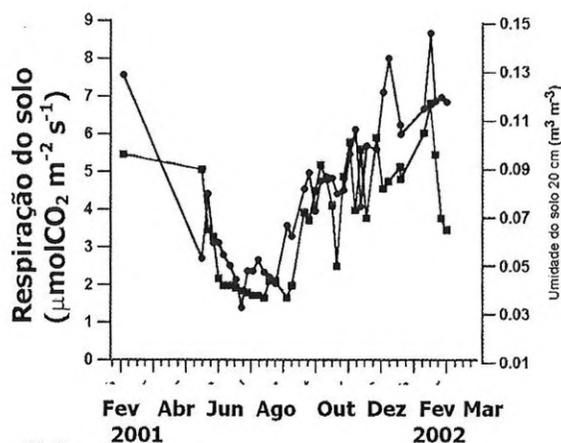
O padrão de respiração mostrou-se muito associado à variação da temperatura e à umidade do solo. Na transição da estação seca para a chuvosa, o padrão de respiração sugere estar em fase com a elevação da temperatura e da umidade. Associado ao aumento de temperatura do solo, que variou sazonalmente entre 15° e 25° C, observou-se um crescimento, na mesma fase, das taxas de respiração (Figura 14.3a), ocorrendo o mesmo com a umidade do solo (Figura 14.3b). A sensibilidade à umidade do solo, entretanto, parece tornar-se menos evidente a partir de janeiro. Essa noção de correlação

da respiração com uma variável física é melhor visualizada nas Figuras 14.4a-b: o padrão com a temperatura aparece na forma de um ajuste exponencial; com a umidade sugere apenas uma proporcionalidade direta. O tipo de solo na Gleba Pé-de-Gigante, bastante arenoso, aparenta ser também um condicionante desse padrão. Nos solos arenosos a drenagem é muito rápida, e pouca vezes permanecem saturados durante longo tempo. A limitação da aeração e, em consequência, da respiração, não ocorreria durante as condições de alta umidade.

Figura 14.3. Medidas de (a) respiração edáfica média (linha vermelha, em $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) e temperatura do solo a 1 cm (linha preta, em °C) no Cerrado Pé-de-Gigante entre fevereiro de 2001 e março de 2002; (b) idem, para a umidade volumétrica do solo a 20 cm (linha preta, em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

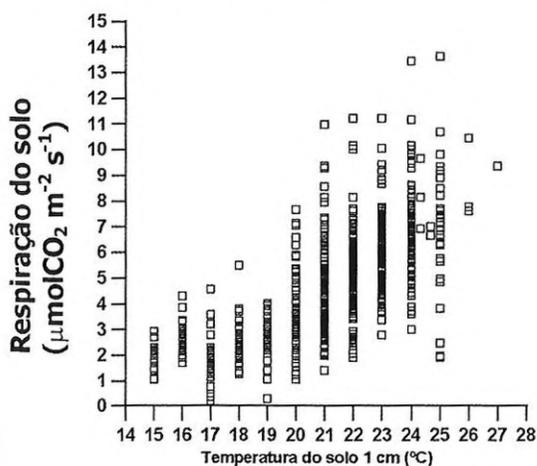


(a)

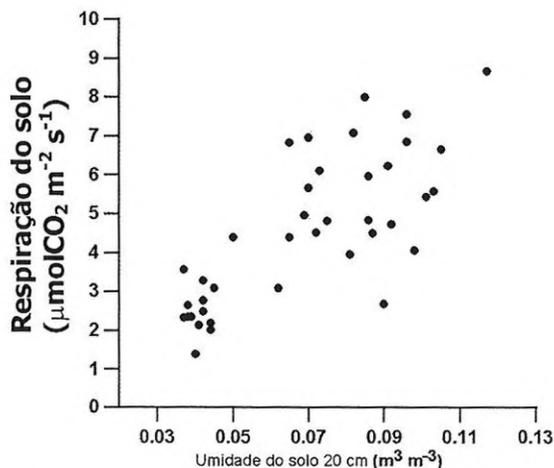


(b)

Figura 14.4. Relação entre os valores médios de respiração edáfica média (em $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) e (a) temperatura do solo a 1 cm (em °C), (b) umidade volumétrica do solo a 20 cm (em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), no Cerrado Pé-de-Gigante entre fevereiro de 2001 e março de 2002.



(a)



(b)

Fluxo total de CO_2 no ecossistema

As estações seca e chuvosa durante o ano de 2001 na Gleba Pé-de-Gigante foram bem definidas quanto à distribuição de precipitação, temperatura do ar e umidade do solo (vide Capítulo 4). Esse padrão é fundamental para se entender a variabilidade dos fluxos de carbono no cerrado, tanto na escala do ciclo diurno, como sua variação em alguns períodos específicos do ano. Entre meados da estação chuvosa até o seu final (1º de fevereiro a 10 de abril), observa-se no ciclo diurno um forte contraste da assimilação durante o dia e da emissão durante a noite (Figura 14.5a). Funcionalmente, esse padrão correlaciona-se com a oferta de energia solar, temperatura e umidade do ar (Rocha *et al.*, 2002). Nesse segmento de dados, observam-se os máximos de fixação total entre -10 e $-30 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Por outro lado, os valores noturnos, ao redor de 5 e $7 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, exemplificam tipicamente como as taxas positivas de emissão ocorrem à noite.

Na transição da estação chuvosa para a seca (abril-junho) (Figura 14.5b), a fixação diurna é reduzida (em valores absolutos) substancialmente, ficando entre ≈ -5 e $-18 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, assim como os valores noturnos, abaixo de $5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Essa variação sazonal vai de encontro ao início da perda das folhas por várias espécies da vegetação do cerrado, à redução da temperatura do ar média diária, à redução das chuvas e, em conseqüência, ao deplecionamento da umidade do solo. Com o avanço da estação seca (Figura 14.5c), observou-se que o ecossistema ainda fixa uma pequena quantidade de CO_2 durante o dia, o que seria a resposta de algumas árvores que continuam a fazer fotossíntese, ou seja, folhas verdes ativas em parte das espécies. Observou-se que a evapotranspiração, nessa ocasião, foi de $\approx 1 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ (vide Capítulo 4), o que reforça o indicio de abertura estomática em parte das folhas do ecossistema. O que se observa no início da estação chuvosa (Figura 14.5d) é um padrão que começa a recuperar aqueles do início do ano (Figura 14.5a).

O balanço total diário é calculado como a soma dos valores de 30 minutos para cada dia. Nesse padrão, distingue-se com mais clareza a funcionalidade do ecossistema como fonte (ou sumidouro) de carbono

para a (ou da) atmosfera na escala anual (Figura 14.6). No período diurno (de 6h às 18h no local), o ecossistema assimila durante o dia de forma variável, entre zero (alta estação seca) até $60 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, ao longo de todo o ano. Por outro lado, durante a noite, a emissão varia entre 5 e $20 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ na escala anual. Nos balanços diários, que são a soma dos valores noturno e diurno, pode-se, finalmente, ter uma perspectiva integral da sazonalidade dos fluxos. A metodologia de eddy correlation mostra, em algumas ocasiões, tendências de superestimar-se a assimilação total diária por subestimar os fluxos noturnos, o que requer a aplicação de filtros (Rocha *et al.*, 2002). Os picos de assimilação diurna da ordem de $60 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ (Figura 14.6) estão provavelmente superestimados em até 20%. Rocha *et al.* (2002) discutem essa correção e apontam para valores mais realistas. Os valores predominantes durante a estação chuvosa aparecem com maior freqüência de ocorrência na faixa de $30 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, que refletem, com maior realidade, essa componente (Figura 14.6). O fluxo total, ou troca líquida do ecossistema, diminui, de forma progressiva, ao longo da estação seca até tornar-se sistematicamente positivo durante os meses de julho a outubro. Nessa ocasião, as taxas de emissão também são relativamente variáveis, abaixo de $30 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Conclusões

O fluxo de carbono no ecossistema é conseqüência do tipo de vegetação e das propriedades fisiológicas em seu próprio mecanismo de fotossíntese (como se diferenciam, por exemplo, as plantas C3, C4 e MAC), além da condição em que se encontra o ecossistema (em sucessão secundária ou clímax, por exemplo), da variabilidade climática interanual (um ano mais quente ou mais frio do que a média, mais chuvoso ou mais seco – incluindo-se aqui a própria distribuição da chuva ao longo da estação), dos eventos extremos de geada e estiagem, entre outros.

Os dados aqui reportados sugerem alguns aspectos de sazonalidade e funcionalidade do ecossistema, úteis para o entendimento da funcionalidade ecológica

Figura 14.5. Medidas de fluxos de CO_2 (em $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), calculadas como médias de 30 minutos no sítio experimental do Cerrado Pé-de-Gigante durante o ano de 2001, nos períodos de (a) 01/02 a 10/04, (b) 11/04 a 15/06, (c) 16/06 a 10/10 e (d) 11/10 a 03/12.

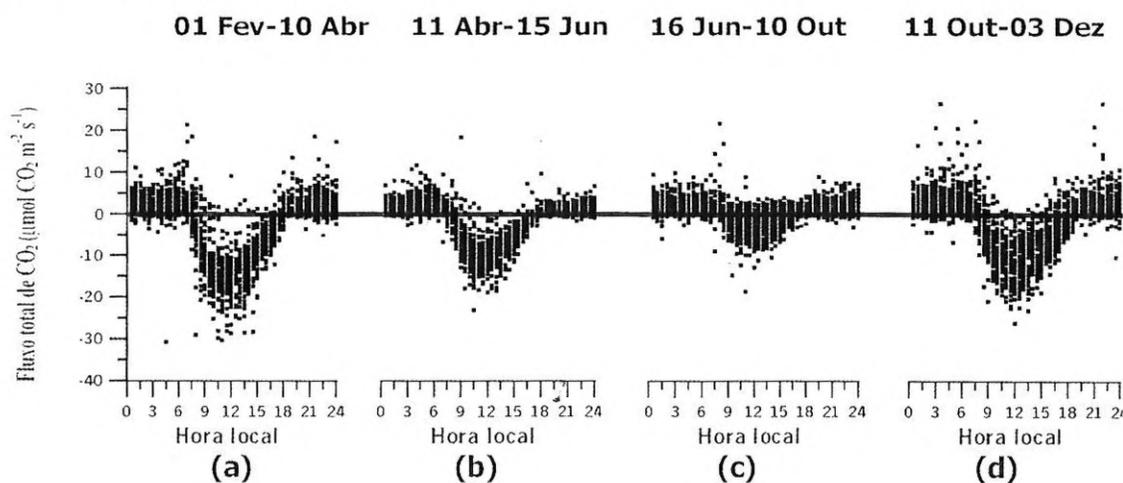
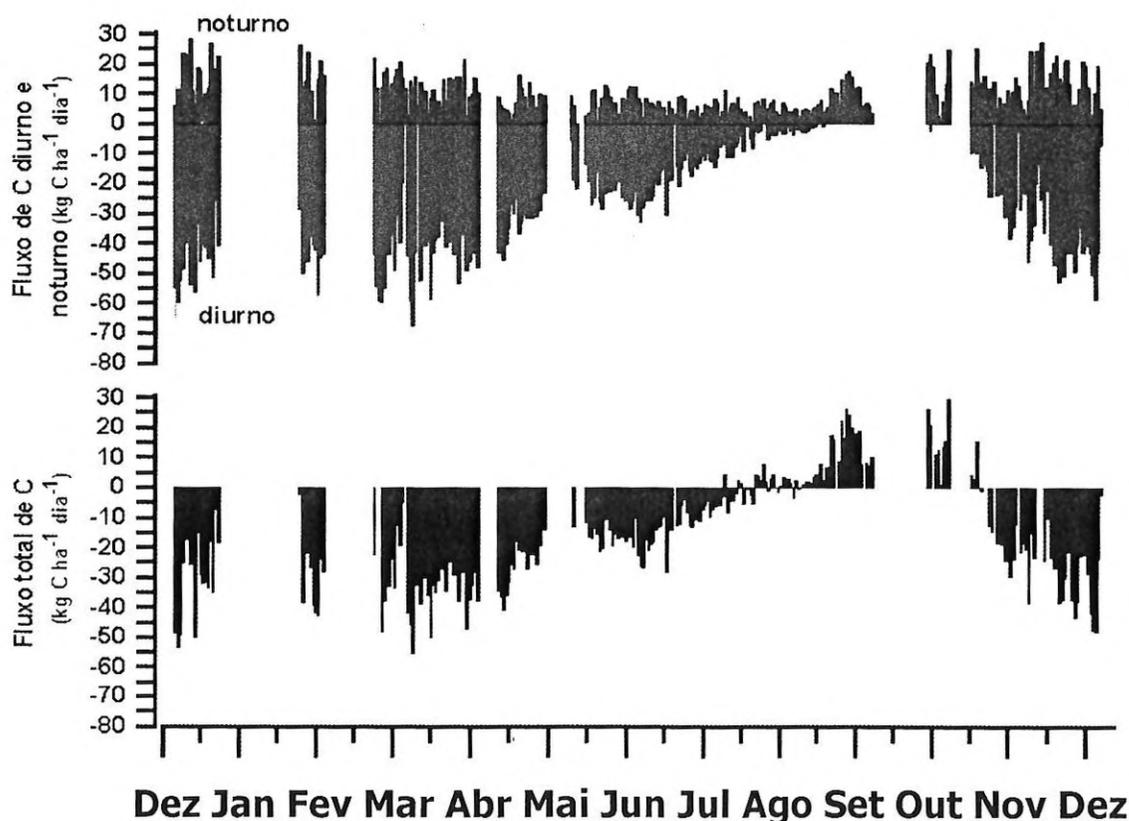


Figura 14.6. Medidas diárias de fluxos de CO_2 (em $\text{kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$), calculadas como a soma das médias de 30 minutos no sítio experimental do Cerrado Pé-de-Gigante no período diurno e noturno (gráfico superior) e como totais diários (gráfico inferior) durante o ano de 2001.



do cerrado no Brasil, particularmente na Região Sudeste, onde até então se desconheciam quantificações dessa natureza (Rocha *et al.*, 2002). Em outras regiões, como no Centro-Oeste, há medidas que indicam um padrão semelhante de fixação e emissão ao longo do ano (Miranda *et al.*, 1997, Vourlitis *et al.*, 2001).

Conhecer o ciclo do carbono no bioma do cerrado de forma quantitativa e em combinação com o clima é parte de uma complexa estratégia de investigação científica. Irá revelar como o cerrado, em suas diversas formas fisionômicas, comporta-se do ponto de vista evolutivo. Em outras palavras, como esse bioma poderia potencialmente migrar para outras regiões, em casos de mudanças climáticas, ou ser substituído por outras formas de vegetação, o que significaria, em última instância, a questão de sua adaptação e vulnerabilidade diante de tantas ameaças trazidas pelo homem na forma de desmatamento, além das próprias oscilações naturais do clima.

Referências Bibliográficas

- ADLARD, P. G. 1990. Procedures for monitoring tree growth and site change. Tropical Forestry Papers, No. 23. Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, University of Oxford.
- BALDOCCHI, D. E. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystem: past, present and future. *Global Change Biology*, 9: 479-492.
- DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTANIO, J. H.; ACKERMAN, I. L. & CARVALHO, J. E. M. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 48: 53-69.
- FAN, S. M.; WOFSEY, S. C.; BAKWIN, P. S. & JACOB, D. J. 1990. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10): 16851-16864.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001: Synthesis report. Watson, R.T. and the core writing (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland, pp 184.
- MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A. & LLOYD, J. 1996. Soil respiration in a rainforest in Amazonia and in Cerrado in Central Brazil. In: GASH, J.; NOBRE, C.; ROBERTS, J. & VICTORIA, R. (eds.) *Amazonian Deforestation and Climate*. p. 319-329.
- MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; FRANCEY, J. A.; MCINTYRE, J. R.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R. & BRASS, J. 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment*, 20: 315-328.
- ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; TANNUS, R. N.; JUÁREZ, R. I.; ROSOLEM, R.; CABRAL, O. M. R. & LIGO, M. V. 2002. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (cerrado *Sensu stricto*) in southeast Brasil. *Biota Neotropica*, V2(1).
- SCHIMMEL, D. S.; HOUSE, J.; HIBBARD, K.; BOUSQUET, P.; CIAIS, P.; PEYLIN, P.; BRASWELL, B.; APPS, M.; BAKER, D.; BONDEAU, A.; CANADELL, J.; CHURKINA, G.; CRAMER, W.; DENNING, A.; FIELD, C.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOODALE, C.; HEIMANN, M.; HOUGHTON, R.; MELILLO, J.; MOORE, B.; MURDIYARSO, D.; NOBLE, I.; PACALA, S.; PRENTICE, I.; RAUPACH, M.; RAYNER, R.; SCHOLE, P.; STEFFEN, W. & WIRTH, C. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414: 169-172.
- TRUMBORE, S. E.; DAVIDSON, E. A.; CAMARGO, P. B.; NEPSTAD, D. C. & MARTINELLI, L. A. 1995. Below ground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 515-528.
- VOURLITIS, G.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CASEIRO, F. T. & CAMPELO Jr, J. H. 2001. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature amazonian transitional tropical forest (Cerradão). *Functional ecology*, 15: 338-395.