

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA

**FLUXOS DE ENERGIA, CARBONO E ÁGUA EM
ÁREAS DE CERRADO *SENSU STRICTO*
SUBMETIDAS A DIFERENTES REGIMES DE
QUEIMA**

Lacê Medeiros Breyer

Tese apresentada e defendida
como requerimento parcial para
obtenção do título de Doutor,
junto ao Programa de Pós-
Graduação em Ecologia da
Universidade de Brasília, sob
orientação do Professor Antônio
Carlos Miranda

Brasília

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA

**FLUXOS DE ENERGIA, CARBONO E ÁGUA EM ÁREAS DE CERRADO *SENSU*
STRICTO SUBMETIDAS A DIFERENTES REGIMES DE QUEIMA**

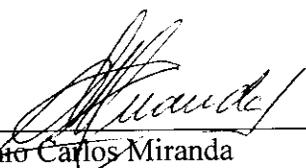
Lacê Medeiros Breyer

Tese apresentada e defendida como requerimento parcial para obtenção do título de Doutor, junto ao programa de Pós-Graduação em Ecologia, do Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília, sob a orientação do professor Antonio Carlos Miranda.

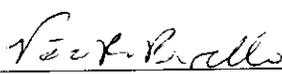
Brasília
Dezembro/2001

Trabalho realizado junto ao Departamento de Ecologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, sob orientação do Prof. Antonio Carlos Miranda, com recursos financeiros do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA-Ecologia).

Aprovado por,



Dr. Antonio Carlos Miranda
Orientador



Dra. Vânia R. Pivello
Membro da Banca Examinadora



Dr. Antonio José A. Rocha
Membro da Banca Examinadora



Dr. Laércio Leonel Leite
Membro da Banca Examinadora



Dra. Heloisa Sinátora Miranda
Membro da Banca Examinadora

DEDICATÓRIA

À
Tsuruko
que me deu alma e esqueleto novo

AGRADECIMENTOS

Como sempre, devo agradecer em primeiro lugar à Universidade de Brasília, depois ao Instituto de Ciências Biológicas, logo em seguida ao Departamento de Biologia Vegetal no imediato andar oscilo, alfabeticamente, entre o Departamento de Botânica e o Departamento de Ecologia. Enfim, a minha casa de registo. No Distrito Federal à Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos e à Reserva Ecológica de Águas Emendadas (criada graças aos esforços do saudoso Dr. Ezequias Paulo Heringer e garantida por seu corpo de corajosos funcionários). Na cidade de Planaltina aos ricos mineiros do triângulo e do Espírito Santo sem contar os goianos da gema e de outros partidos. Evito nomes próprios por serem muitos e porque gaúcho não agradece pra homem. Contudo, dou *gracias* ao Alexandre JB Santos que de aluno se transformou em meu professor e lavro o mais supremo reconhecimento pela paciência e carinho com que sempre fui tratado pela Heloisa Sinatora Miranda minha eterna e querida mestra.

“É uma botânica de outra ordem com a qual Warming sonha, enquanto dedilha sua sanfona; a rigor, não gosta desses herbários que extraem das plantas todo o suco. Pela casa, vêem-se plantas esparramadas, entre inúmeros vasos, copos, baldes e barris cheios de flores frescas na água, numa perfumada orgia de cores como nunca antes se viu na casa. Na opinião de Warming, e pede desculpas se por acaso não se está expressando com clareza, a nova botânica não se deve dar por satisfeita apenas com a classificação e descrição das plantas, desligadas de seu meio ambiente. A finalidade de uma planta – tal como a decretou Deus – desenvolvida em sua luta pela sobrevivência, só pode ser compreendida se se compreender seu meio, as plantas vizinhas, as abelhas, todos os demais insetos com os quais se relaciona, o clima, a sombra e o sol e o orvalho da noite. Deve ser vista em seu *nicho* próprio, uma expressão, entretanto, de cuja estrita validade científica Warming tem certas dúvidas. A *longa cadeia da vida*, de que já os tomistas falavam: se se destrói um elo da cadeia, ou se se o deixa de fora, destrói-se ou ofusca-se o olhar no que concerne à soma total da finalidade.”

Conversas entre Warming e Lund nos idos de julho de 1863.

Na trilha de Lagoa Santa Herink Stangerup Editora Record

ÍNDICE

RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE TABELAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS	
2.1.1 Área de Estudo	7
2.1.2 Estudo comparativo da vegetação	12
2.2 Instrumentação	13
2.3 O método da covariância de vórtices turbulentos	18
2.4 Área englobada pelos sensores	21
2.5 Resistências contras os fluxos	22
2.6 Balanço de energia	24
2.7 Balanço de CO ₂	25
2.8 Fluxos de CO ₂ e radiação incidente	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
3.1 Caracterização da vegetação	29
3.2 Balanço de energia	38
3.3 O fechamento do balanço de energia	51
3.4 Balanço de carbono	53
4. CONCLUSÕES	60
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

RESUMO

Fluxos de energia, água e carbono foram determinados, no período de maio a novembro de 2000, em duas áreas de cerrado *sensu stricto* localizadas na Reserva Ecológica de Águas Emendas a 50 km de Brasília. Uma das áreas encontrava-se protegida contra o fogo por cerca de 23 anos e a outra foi submetida à queima freqüente e está protegida contra o fogo por 13 anos. Como resultado dos diferentes regimes de queima, a vegetação das duas áreas apresenta densidade bastante diferente. A área protegida apresenta 6800 indivíduos lenhosos por hectare (com diâmetro a 30 cm do solo maior ou igual a 5 cm) e a área alterada 2620 indivíduos por hectare. Todavia, para o estrato herbáceo, as duas áreas apresentam total de biomassa e composição semelhantes. O fechamento do balanço de energia apresentou inclinação de 0,93 e 0,83 para as áreas protegida e alterada, respectivamente. A área protegida apresentou valores para o fluxo de calor latente que variou de 200 a 160 Wm^{-2} decrescendo ao longo da estação seca. Para a área alterada a variação foi bem menor. Durante o período de estudo a perda de água atingiu valores de 2,7 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ na área protegida e 2,5 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ na área alterada. Estes valores foram reduzidos para cerca de 1,5 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ durante a estação seca. O valor mínimo da resistência de dossel variou de 275 s/m a 547 s/m para a vegetação da área protegida e de 349 s/m a 762 s/m na área alterada e podem estar refletindo as alterações fenológicas da vegetação com o avançar da estação seca. De forma geral, a vegetação das duas áreas comportou-se como fonte de carbono para a atmosfera durante os meses da estação seca e sumidouro durante o resto do ano. Durante a estação seca, a área protegida liberou cerca de 0,6 t C.ha^{-1} para a atmosfera e a área alterada 0,1 t C.ha^{-1} . Essa diferença não reflete tanto a magnitude dos fluxos quanto a duração do período durante o qual a vegetação se comportou como fonte de carbono: 4 meses na área protegida e 2 meses na área alterada. Estimativas da quantidade de carbono fixada na área preservada resultaram em 2,6 $\text{t C.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e 1,4 $\text{t C.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ na área alterada, refletindo a diferença na estrutura e composição da vegetação resultante dos diferentes regimes de queima.

ABSTRACT

Energy, water and carbon fluxes were determined from May to November 2000 in two cerrado *sensu stricto* areas at the Reserva Ecológica de Águas Emendadas, 50 km from Brasília. One of the areas was protected from fire for 23 years, and the other was burned frequently and afterwards was protected for 13 years. As a consequence of the of the different fire regimes, the structure of the vegetation between the two areas was considerable. The protected area presented 6800 stems per hectare (with diameter at 30 cm from the soil greater or equal to 5 cm), and 2620 stems per hectare were present in the altered area. However, the total biomass and composition of the herbaceous layer was similar. The closure of the energy balance presented a slope of 0.93 and 0.83 for the protected and altered areas. The latent flux values for the protected area was in the range 200 to 160 Wm^{-2} , decreasing as the dry season advanced. The variation was smaller in the altered area. The water loss from the vegetation reached values in the order of 2.7 $\text{mm.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ for the protected area and 2.5 $\text{mm.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ for the altered area. During the dry season the water loss was reduced to about 1.5 $\text{mm.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ in both areas. Minimum canopy resistance was in the range of 275 sm^{-1} to 547 sm^{-1} for the protected area and from 349 sm^{-1} to 762 sm^{-1} for the altered area and may be reflecting the phenology of the vegetation with the progress of the dry season. The vegetation of the two sites were source of carbon to the atmosphere during the dry season and sink most of the year. During the dry season, the vegetation of the protected area released 0,6 t C.ha^{-1} to the atmosphere and the disturbed area 0,1 t C.ha^{-1} . This difference reflects much more the duration of the source period: 4 months in the protected area and 2 months in the disturbed area. Estimates of the amount of carbon fixed in the protected area resulted in 2,6 $\text{t C.ha}^{-1}.\text{year}^{-1}$ and 1,4 $\text{t C.ha}^{-1}.\text{year}^{-1}$ in the disturbed area. These results may reflect the difference in structure and species composition between the two areas as a consequence of the different fire regimes.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Título	Página
1	Relação das espécies lenhosas inventariadas em área de cerrado <i>sensu stricto</i> protegida de queima na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.	30
2	Relação das espécies lenhosas inventariadas em área de cerrado <i>sensu stricto</i> alterado por queimas freqüentes na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.	33
3	Componentes do balanço de energia (média \pm dp) para os meses de junho a setembro de 2000 em área de cerrado <i>sensu stricto</i> protegida de queima e área alterada por queima freqüente na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, Brasília, DF.	41
4	Curso médio diário (\pm dp) dos valores máximos da razão de Bowen ($\beta = H/\lambda E$) compreendendo o período das 10:00 às 15:00 horas em área de cerrado <i>sensu stricto</i> preservado e alterado na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, nos meses de maio a novembro de 2000.	44
5	Evapotranspiração em áreas de cerrado <i>sensu stricto</i> protegido contra o fogo e alterada por queimadas freqüentes na Reserva Ecológica de Águas Emendadas determinadas no período de maio a novembro de 2000.	45
6	Valores mínimos da resistência de dossel (ou estomática) em cerrado <i>sensu stricto</i> alterado por queima freqüente no período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	a) Imagem de satélite da Reserva Ecológica de Águas Emendadas; onde A representa a localização da torre colocada na área alterada e C na conservada e b) Mapa do Distrito Federal destacando a Reserva da Biosfera.	8
2	Mapa da Reserva Ecológica de Águas Emendadas e detalhe mostrando o Distrito Federal.	9
3	Aparência aproximada da área alterada a) e da área conservada b) do Cerrado <i>sensu stricto</i> na Reserva Ecológica de Águas Emendadas no ano 2000.	10
4	Área de cerrado alterado na Estação Ecológica de Águas Emendadas no ano 2000: a) época chuvosa e b) seca.	11
5	Aparelhos: a) sensor quântico, b) piranômetro (montados sobre base niveladora), c) sistema automático de aquisição de dados, d) saldo radiômetro e e) anemômetro ultra-sônico tridimensional.	15
6	Analisador de gases por infravermelho: a) Vista anterior e b) Vista posterior.	16
7	Torre disposta no cerrado alterado, ao topo, em primeiro plano, o anemômetro ultra-sônico, na diagonal uma placa que apóia o piranômetro e o sensor quântico voltados para cima, no extremo da haste que se distancia da estrutura principal está o saldo radiômetro e logo antes outra placa que sustenta o piranômetro e o sensor quântico voltados para baixo. Na pequena caixa posta sobre a plataforma mais próxima um sistema de aquisição de dados e na caixa grande da plataforma seguinte: um microcomputador portátil, uma bomba de sucção de ar, o analisador de gases por infravermelho. Sobre o solo, encoberto pela vegetação, está o conjunto de 12 baterias que fornece energia ao sistema.	17

- 8 Distribuição de altura (a) e de circunferência, a 30 cm do solo, (b) para os indivíduos lenhosos inventariados em área de cerrado *sensu stricto* protegido de queima na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 31
- 9 Distribuição de altura (a) e de circunferência, a 30 cm do solo, (b) para os indivíduos lenhosos inventariados em área de cerrado *sensu stricto* alterado na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 34
- 10 Variação da biomassa de gramíneas e dicotiledôneas vivas (a) e mortas (b) em áreas de cerrado *sensu stricto* protegido e alterado na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 36
- 11 Curso médio diário do saldo de radiação (R_n), calor sensível (H), calor latente (λE) e fluxo de calor no solo (G) na Reserva Ecológica de Águas Emendadas em cerrado alterado em junho (a), julho (b), agosto (c) e setembro (d) de 2000 e em área preservada em junho (e), julho (f), agosto (g) e setembro (h) de 2000. 39
- 12 Curso médio diário da resistência aerodinâmica em cerrado *sensu stricto* alterado em junho (a), julho (b), agosto (c) e setembro (d) de 2000 e em área preservada (e), julho (f), agosto (g) e setembro (h) de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 47
- 13 Curso médio diário da resistência aerodinâmica em cerrado *sensu stricto* em área preservada (Δ) e em área alterada (O) no período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 48
- 14 Curso médio diário da resistência de dossel (ou estomática) em cerrado *sensu stricto* alterado em junho (a), julho (b), agosto (c) e setembro (d) de 2000 e em área preservada da ação do fogo em junho (e), julho (f), agosto (g) e setembro (h) de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 49
- 15 Curso médio diário da resistência de dossel (ou estomática) em cerrado *sensu stricto* em área preservada (Δ) e em área alterada (O) no período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 50

- 16 Fechamento do balanço de energia para área de cerrado *sensu stricto* alterada (a) e em área conservada (b) no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas. 52
- 17 Fluxo médio de carbono para uma área de cerrado *sensu stricto* conservada no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF. 54
- 18 Fluxo médio de carbono para uma área de cerrado *sensu stricto* alterada no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF. 55
- 19 Médias mensais dos valores diários, integrados para 1 ha, dos fluxos de carbono distribuídos entre as proporções assimiladas, respiradas e o fluxo líquido em área conservada (a) e alterada (b) durante o período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF. 57
- 20 Saldo de CO₂ para área de cerrado *sensu stricto* conservada (a) e alterada (b), no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF. 58

Lista de Símbolos

Alfabeto Românico

A	taxa de fotossíntese (assimilação de CO_2)	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A_n	taxa de fotossíntese menos respiração foliar ($A - R_f$)	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
c_p	calor específico do ar a pressão constante	$\text{J kg}^{-1} \text{K}$
D	déficit de pressão de vapor do ar	Pa
d	deslocamento do plano zero	m
E	densidade de fluxo de evapotranspiração	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
F_c	densidade de fluxo de um escalar c	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
F_d	fluxo líquido de CO_2 no período diurno	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
F_n	fluxo líquido de CO_2 no período noturno	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
G	densidade de fluxo de calor no solo	W m^{-2}
g_a	condutância aerodinâmica do dossel	mm s^{-1}
g_s	condutância estomática do dossel	mm s^{-1}
h	altura da vegetação	m
H	densidade de fluxo de calor sensível	W m^{-2}
I	densidade de fluxo de fótons incidente	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I_{comp}	densidade de fluxo de fótons incidente no ponto de compensação luminoso	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
k	constante de von Karman	adimensional
M	energia química armazenada por processos metabólicos	W m^{-2}
P	fotossíntese líquida (fotossíntese - respiração do ecossistema)	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
P_{max}	taxa de fotossíntese líquida máxima do ecossistema	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$PPFD$	densidade de fluxo de fótons fotossintéticos	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Q	fluxo total de uma entidade medido em um ponto	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Q_o	parcela do fluxo total proveniente de um ponto localizado a uma distância x do local onde são feitas as medidas	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Q_{eff}	eficiência quântica média efetiva	mol de CO_2 / mol de fótons
R	taxa de respiração do ecossistema	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
r_a	resistência aerodinâmica do dossel	s m^{-1}
R_c	taxa de respiração dos caules	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
R_f	taxa de respiração das folhas	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
R_h	taxa de respiração dos organismos heterotróficos	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
R_n	saldo de radiação (radiação líquida)	W m^{-2}
S	armazenamento de energia térmica	W m^{-2}
r_s	resistência estomática do dossel	s m^{-1}
s	variação da pressão de saturação de vapor de água em função da temperatura	Pa K
T_a	temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
T_a'	flutuação da temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
T_s	temperatura do solo	$^{\circ}\text{C}$
U	velocidade da resultante horizontal do vento	m s^{-1}
u	velocidade da componente cartesiana horizontal do vento a leste	m s^{-1}
u_*	velocidade de fricção do ar	m s^{-1}
v	velocidade da componente cartesiana horizontal do vento a norte	m s^{-1}
VPD	déficit de pressão de vapor	mbar
w	velocidade da componente cartesiana vertical da velocidade do vento	m s^{-1}
w'	flutuação da velocidade da componente cartesiana vertical da velocidade do vento	m s^{-1}

WUE_m	eficiência de uso de água do ecossistema em 24 horas	mol de CO ₂ / mol de H ₂ O
x	distância, na direção do vento, do ponto onde as medidas de fluxo são efetuadas	m
z	altura, em relação ao solo, do ponto onde são feitas as medidas de fluxo	m

Alfabeto Grego

α	rendimento quântico	mol de CO ₂ / mol de fótons
β	razão de Bowen	adimensional
β	fator de forma da função exponencial de Landsberg	adimensional
γ	constante psicrométrica	Pa K ⁻¹
λ	calor latente de evaporação da água	MJ mol ⁻¹
ρ_a	densidade do ar	kg m ⁻³
ρ_c	concentração de um escalar c	kg m ⁻³
ρ'_c	flutuação da concentração de um escalar c	kg m ⁻³

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos fluxos de matéria e energia entre o meio ambiente e os organismos vivos tem seguido duas linhas principais: a análise do equilíbrio das trocas de massa e energia entre os organismos vivos seguindo-se a aplicação do princípio de que não se pode criar ou perder massa ou energia e o desenvolvimento de modelos matemáticos para quantificar as taxas de transferência de massa e energia (Campbell & Norman 1998).

Desde a descoberta, em 1840, de que o calor é uma forma de energia, chegou-se à descoberta de outras formas de energia e à constatação de que todas elas são interconvertíveis, como as moedas em circulação em todo o mundo, contribuindo por sua vez a um somatório total único. Isto aplica-se à química, biologia e engenharia, bem como a todos os ramos da física, e tem o *status* de lei e de instrumento prático básico, tendo recebido o nome de 1ª Lei da Termodinâmica (Ford 1972).

As taxas de transferência pelas quais se dá a troca entre a biosfera e a atmosfera dependem de uma complexa conjunção não linear entre condições fisiológicas, ecológicas, bioquímicas, químicas, edáficas e meteorológicas (Jarvis 1995; Leuning *et al.* 1995). A integração das informações destes processos que regulam os fluxos de vapor d'água e CO₂ ao longo de um amplo espectro temporal e espacial relevante a diferentes cenários e aplicações mantém-se um desafio aos modeladores com formação ecológica, biometeorológica e biogeoquímica (Baldocchi & Wilson 2001).

A mensuração precisa dos fluxos entre diferentes ecossistemas e a atmosfera é fundamental para o teste de modelos aplicáveis em escalas restritas nos termos de tempo e espaço (Aubinet *et al.* 2000). Por sua vez, estes modelos servem ao teste e desenvolvimento

de outros, que visam prever a evolução do carbono até ao fim deste século (Grant & Nalder 2000).

Em 1996, a emissão antropogênica de carbono, resultante do uso de combustíveis fósseis e da fabricação de cimento, foi estimada em 6,51 Gt por ano, com incremento anual de 0,1 Gt C (World Energy Council 1996). Na década dos anos 1980, os dados eram a cada ano de $5,5 \pm 0,5$ Gt C para estes mesmos itens e mais $1,6 \pm 1,0$ Gt C, pelo desmatamento das florestas tropicais, num total de $7,1 \pm 1,1$ Gt C. Deste tanto, permaneceu na atmosfera $3,3 \pm 0,2$ Gt C (46%) e foi transferido para os oceanos $2,0 \pm 0,8$ Gt C (28%), restando um saldo residual positivo de $1,8 \pm 1,6$ Gt C (26%). Acredita-se que este resíduo que passou a ser chamado “o dreno perdido” deva-se a mudanças no uso da terra, como o reflorestamento natural devido ao abandono de terras agrícolas nas médias latitudes, bem como a processos ecofisiológicos resultados de respostas a anomalias climáticas, maior deposição natural de N e aumento no crescimento de florestas via efeito fertilizador causado pelo acréscimo de CO₂ (Schimel 1995).

Tans *et al.* (1990), afirmaram que, após 30 anos de medições na atmosfera e nos oceanos, o saldo do balanço global do carbono atmosférico é surpreendentemente incerto, sendo essencial melhorar-se o entendimento do ciclo do CO₂ para prever as futuras taxas em que se dá seu aumento na atmosfera e para planejar uma eventual estratégia internacional de gerenciamento. Sims & Bradford (2001) dizem que, apesar do aumento de carbono atmosférico ser óbvio, o sucesso na quantificação das fontes e dos drenos tem sido decepcionante. Jarvis *et al.* (1997) ressaltam a importância do dreno existente nas florestas boreais, Baldocchi (1997), chama a atenção para as florestas temperadas e Grace *et al.* (1996) trabalham com a força dos drenos da floresta tropical brasileira.

Nucleado no Planalto Central e somado às áreas disjuntas ao Sul, Leste, Nordeste e Norte estendiam-se, no Brasil, 2×10^8 ha de Cerrado (Rizzini, 1979). Uma província classificada pela aparência em Cerradão, Cerrado, Campo cerrado, Campo sujo e Campo limpo (Eiten, 1972). Este bioma que margeia a floresta tropical é considerado savana e como tal caracteriza-se pela interação entre árvores e gramíneas sem ser floresta nem campo (Scholes & Archer, 1997) e onde a chuva é sazonal (Raven *et al.* 1986).

O cerrado é fisionomicamente, *fide* Eiten, uma vegetação fora do comum, cuja flora pode chegar a 150 espécies de árvores e arbustos com mais de 6 cm de circunferência a 10 cm do chão e até cerca de 430 espécies de plantas vasculares, no total por hectare. Uma biodiversidade só ultrapassada nas partes mais chuvosas da Amazônia, do norte dos Andes e do sudoeste da Ásia. Por outro lado, no campo sujo o número de espécies diferentes entre árvores e arbustos com estas dimensões pode cair para 30-35 (Eiten 2001).

O mosaico natural que é este tipo de vegetação vem sofrendo cada vez mais fragmentação, dada a ação do homem, há milhares de anos era e continua sendo atacado pelo fogo (Vicentini 1992 e 1999), com os europeus vieram o gado e o machado (Rizzini 1979), com a industrialização viu-se transformado em carvão (Goodland & Ferri 1979) e com a marcha ao centro-oeste em cidades e lavouras (Hueck 1972). Tais fatores aumentam a complexidade que, por natureza, já é grande, neste ambiente, e o lapso de tempo gasto na obtenção de dados dos componentes fisiológicos, ecológicos e físicos subsidiários à confecção de modelos dos processos em escala regional, nacional e global (Jarvis & Dewar 1993, Graedel & Crutzen 1993, Valentini *et al.* 1995, Scholes & Archer 1997, Lloyd 1999).

As incertezas sobre a magnitude e a exata localização geográfica do dreno perdido tornam-se assunto de enormes ramificações políticas e econômicas em um mundo pós-

Kyoto, onde os resultados científicos tentativos serão avidamente procurados e diferentemente interpretados por vários *lobbies* políticos. Entretanto, este interesse político surge precisamente pela importância destes dados e, desde que as incertezas sejam tornadas explícitas, estes dados têm um importante papel no debate político esclarecido (Malhi *et al.* 1999).

A província dos Cerrados, o segundo maior bioma brasileiro, constitui uma parcela significativa dos ecossistemas terrestres, tendo assim uma considerável contribuição para o ciclo de carbono do planeta.

Monteiro (1995) e Miranda *et al.* (1996), estudando os fluxos CO₂ em cerrado *sensu stricto*, verificaram que esse ecossistema se comporta como sorvedouro de CO₂ de novembro a julho, sendo fonte em agosto, setembro e outubro. Monteiro (1995) calculou que se toda extensão do bioma cerrado fosse coberta pelo tipo fisionômico estudado (cerrado *sensu stricto*), a quantidade de carbono retirada da atmosfera seria 0,4 Gt ano⁻¹, o que representa 8% do carbono liberado pela queima de combustíveis fósseis. No entanto, o cerrado é um bioma extremamente heterogêneo. Além disso, grande parte desta vegetação sofre modificações devidas às queimadas, que alteram a composição e funcionamento desse ecossistema. Segundo Eiten (1994), o efeito do fogo é maior na camada arbustiva, principalmente sobre os arbustos de caule fino; se o fogo não ocorre por alguns anos, a camada arbustiva reassume sua densidade normal. Os efeitos do fogo dependerão do seu comportamento, ou seja, velocidade e intensidade, que estão diretamente ligadas ao combustível e a condições ambientais (Luke & McArthur 1978).

A produtividade primária líquida (PPL) dos cerrados, que é proporcional à quantidade de gás carbônico seqüestrado da atmosfera pelas plantas, é bastante variável.

Aspectos fisionômicos da vegetação, fitomassa, mudanças climáticas sazonais, disponibilidade de nutrientes e a incidência do fogo, são fatores que podem influenciar nesta produtividade. Após uma queimada, verifica-se um aumento na PPL, quando se compara esta produtividade com a de períodos anteriores, o que pode ser atribuído à disponibilidade, para as plantas, de nutrientes antes imobilizados na biomassa, como observa Coutinho (1990).

Quanto à sazonalidade das variações nos fluxos de CO₂, Miranda *et al.* (1996) verificaram que, durante a estação chuvosa, o cerrado *sensu stricto* se comporta como sorvedouro de CO₂ e na estação seca a capacidade de absorção de carbono diminui gradativamente, chegando até a se tornar fonte de carbono em um curto período durante o mês de setembro. Este padrão também foi observado para campo sujo (Silva 1999; Santos 1999). Monteiro (1995), que estudou os fluxos de energia e carbono do cerrado na estação seca, verificou variações tanto na eficiência do uso de água quanto na eficiência quântica (conversão da energia luminosa) da fotossíntese durante o período de julho a novembro.

Pesquisas com fluxos de energia e massa feitas com outras fisionomias de cerrado, desde campo-limpo até cerradão, e em cerrados que sofreram algum tipo de perturbação, permitiriam uma melhor caracterização destes processos nestes sistemas, fornecendo, assim, subsídios para o refinamento de modelos biogeoquímicos regionais.

Neste trabalho, foram estudados os processos de trocas de radiação, calor, CO₂ e vapor de água entre a vegetação e a atmosfera, em áreas de cerrado *sensu stricto* submetidos a diferentes regimes de queima, visando corroborar a hipótese de que uma área de cerrado submetida a queima periódica, ao tornar-se protegida do fogo, acumulará mais

carbono por ano do que outra área semelhante, porém, protegida do fogo por um período mais longo de tempo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1.1 Área de Estudo

A Estação Ecológica de Águas Emendadas foi escolhida para a realização deste trabalho. Encontra-se localizada a nordeste do Distrito Federal, aproximadamente a 50 km de Brasília. Situa-se entre as coordenadas: 15° 29' 12" a 15° 36' 5" de latitude Sul, e 47° 31' 36" a 47° 41' 19" de longitude Oeste (Figura 1b e Figura 2). A área possui uma topografia levemente ondulada, com altitudes variando de 1000 a 1150 m. O clima segundo Koeppen, é do tipo tropical de altitude Cw (CEPA/DF 1984), com chuvas intensas no verão e inverno seco. A temperatura média do mês mais frio, é inferior a 18 °C, e a do mês mais quente é superior a 22 °C. O solo predominante é profundo, bem drenado, do tipo Latossolo Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo (Embrapa 1978).

A vegetação da Estação Ecológica é representada pelo cerrado, em suas principais formas fisionômicas. O cerrado *sensu stricto* domina a paisagem. Além disso, as matas de galeria, que ocorrem ao longo dos cursos d'água, e as veredas que ocorrem nos solos saturados todo o ano, são muito importantes para o sistema local, embora estejam presentes em uma pequena parcela da Estação de Águas Emendadas.

O projeto foi desenvolvido em duas áreas. As áreas são representadas por cerrado *sensu stricto* composto de arvoredos de escrube e árvores, latifoliado e semidecíduo (Eiten 1984). A distância entre as torres onde foram instalados os aparelhos de medição e a borda da vegetação é de aproximadamente 1200 m, oferecendo condições para que o método da covariância dos vórtices turbulentos pudesse ser aplicado.

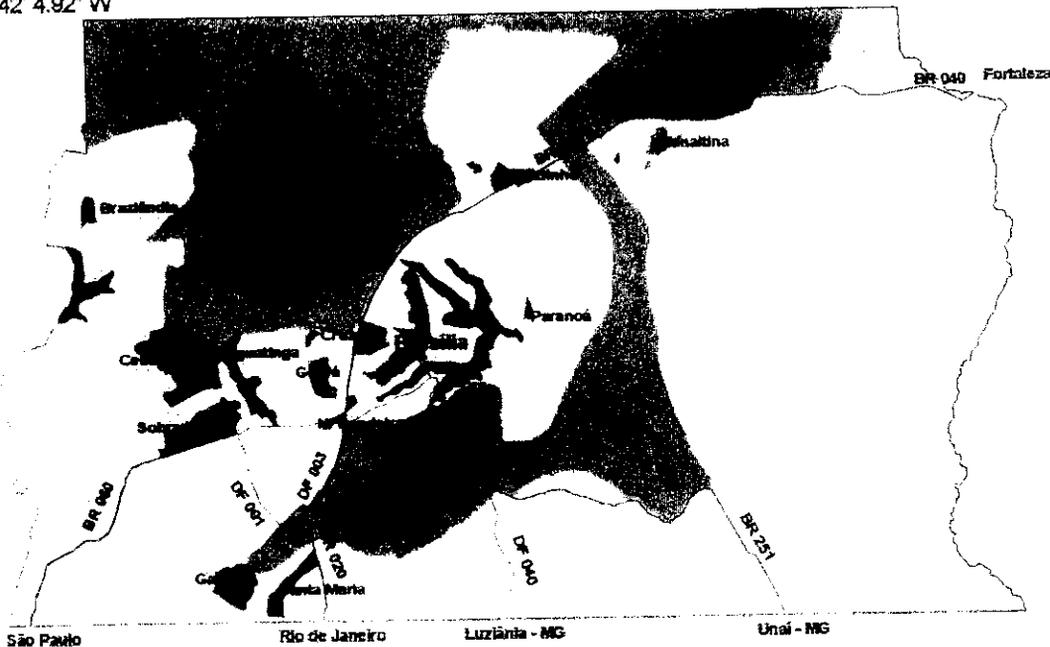
As áreas onde foram instaladas as torres foram submetidas a diferentes regimes de queima. A área conservada (C, Figura 1a) foi protegida de queima por cerca de 15 anos

15° 29' 56,95" S
47° 30' 6,73" W



a)

15° 37' 3,73" S
47° 42' 4,92" W



b)

■ Área Urbana ■ Zona Núcleo ■ Zona Tampão ■ Zona de Transição

Figura 1: a) Imagem de satélite da Reserva Ecológica de Águas Emendadas; onde A representa a localização da torre colocada na área alterada e C na conservada e b) Mapa do Distrito Federal destacando a Reserva da Biosfera.

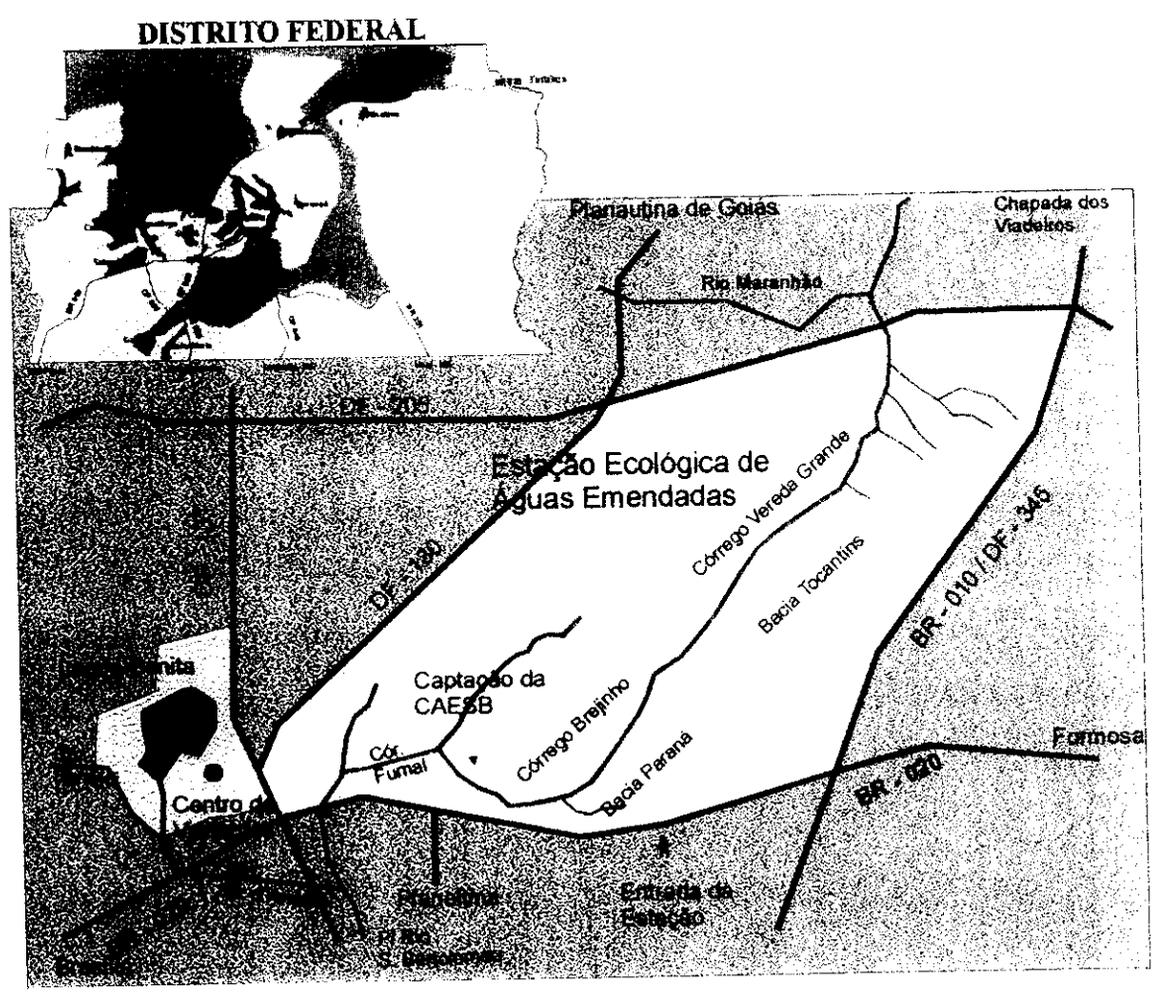
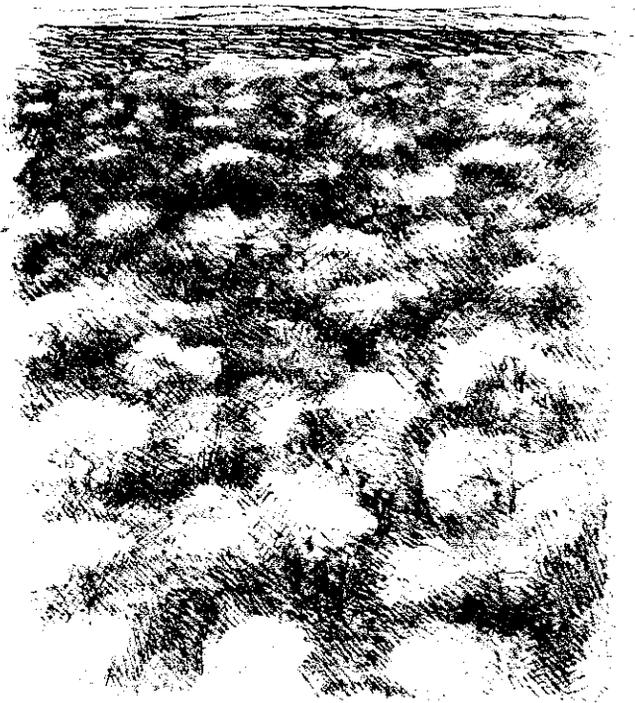


Figura 2. Mapa da Reserva Ecológica de Águas Emendadas e detalhe mostrando o Distrito Federal.

(Nascimento 1992), até sofrer queima acidental em 1987. Desde então, encontra-se protegida de queimadas. A área alterada (A, Figura 1), por encontrar-se próxima a chácaras, sofria queimas periódicas e, desde 1987, encontra-se protegida de queimadas. A Figura 3 dá uma idéia aproximada da diferença entre as áreas e a Figura 4 mostra a diferença aparente na área alterada entre o período chuvoso e o seco. O histórico de uso e o mapa detalhado da Estação Ecológica de Águas Emendadas é apresentado por Condé & Pedrosa (1993).



a)



b)

Figura 3. Aparência aproximada da área alterada a) e da área conservada b) do Cerrado *sensu stricto* na Reserva Ecológica de Águas Emendadas no ano 2000.



Figura 4. Área de cerrado alterado na Estação Ecológica de Águas Emendadas no ano 2000: a) época chuvosa e b) seca.

2.1.2 Estudo comparativo da vegetação

Para determinar a estrutura atual da vegetação, foram estabelecidas, em cada área, dez parcelas de 10 m x 10 m, onde todos os indivíduos com circunferência maior ou igual a 5 cm, a 30 cm do solo, foram inventariados quanto a espécie, altura e diâmetro. O total de biomassa da vegetação lenhosa presente nas áreas de estudo foi calculado de acordo com a equação apresentada por Abdala *et al.* (1998):

$$\log (y) = 0,9967 \cdot \log (x) + 2,587 \quad (1)$$

onde y é o total de biomassa seca (em g) e x é o volume cilíndrico (em dm^3).

Para determinar a composição do estrato herbáceo foi coletada, aleatoriamente, toda a biomassa contida em 10 quadrados de 50 cm x 50 cm, que foi separada em graminóides e dicotiledôneas, de maneira similar ao apresentado por Andrade (1998).

2.2 Instrumentação

Em cada área, as medidas das concentrações de vapor de H₂O e CO₂ foram obtidas com um analisador de gás por infravermelho (IRGA Li-Cor 6262, Lincoln, EUA). O ar foi coletado a 12 m de altura, aspirado por bomba a 4000 cm³ min⁻¹ até o IRGA, sendo o fluxo de ar conduzido através de um tubo de 5 mm de diâmetro interno (Dekabon 1300, Deane & Co., Glasgow, Reino Unido). As componentes u , v , w de velocidade do vento e a temperatura do ar (T_a) foram medidas à mesma altura por um anemômetro ultra-sônico tridimensional (Solent A1002R, Lymington, Reino Unido). O anemômetro foi instalado no topo de uma torre de andaimes e nele foi fixada a entrada do ar que foi aspirado para o IRGA. O sinal analógico do IRGA, obtido a uma frequência de 5 Hz, era enviado ao anemômetro ultra-sônico onde era digitalizado e combinado com as leituras de u , v , w e temperatura. O sinal digital combinado era transferido a 21 Hz para um microcomputador portátil onde os fluxos eram calculados em tempo real através do programa EDISOL versão 0.39 (University of Edinburgh, Edimburgo, Reino Unido). Posteriormente, os dados foram corrigidos para perdas devido a fluxos de baixa frequência através de procedimentos sugeridos por Moncrieff *et al.* 1997b. Para isso, foi utilizado um programa de computador adaptado pelo Dr. J. Lloyd do Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Alemanha.

O saldo de radiação (R_n = radiação solar + radiação térmica - radiação solar refletida - radiação térmica refletida pela vegetação) foi medido com um saldo radiômetro modelo Q6 (REBS, Seattle, EUA). O fluxo de radiação solar foi obtido por dois piranômetros (Li-Cor LI200B, Lincoln, EUA) - um voltado para cima para medir a radiação incidente, e outro piranômetro voltado para baixo para medir a radiação refletida. A densidade de fluxo de fótons (comprimento de onda entre 400 e 700 nm) incidente e refletida foram medidas por

dois sensores quânticos (Li-Cor LI190SA, Lincoln, EUA). Estes sensores de radiação estavam instalados em uma haste e colocados a 5 m do topo da torre onde estava o sistema de medida de fluxo de gases (Figura 5, Figura 6 e Figura 7). O fluxo de calor no solo (G) foi mensurado com dois sensores de calor no solo (Solar Radiation Instruments, Melbourne, Australia) instalados a 2 cm de profundidade - um localizado embaixo de vegetação mais densa e outro em solo mais exposto. A temperatura do solo (T_s) foi obtida por um termopar tipo T (cobre-constantan) colocado também a 2 cm de profundidade.

Os valores obtidos pelo sistema de medidas de radiação, assim como T_s e G eram registrados a cada minuto. Médias de 30 minutos foram calculadas por um sistema automático de aquisição de dados (Data Logger 21X, Campbell Scientific Inc., Logan, EUA) e armazenadas em um módulo de memória de estado sólido (Storage Module SM192, Campbell Scientific Inc., Logan, EUA).

A energia necessária para o funcionamento de cada sistema de fluxo de gases foi fornecida por 12 baterias de 12 volts e 60 Ah ligadas em paralelo e trocadas a cada dois dias.

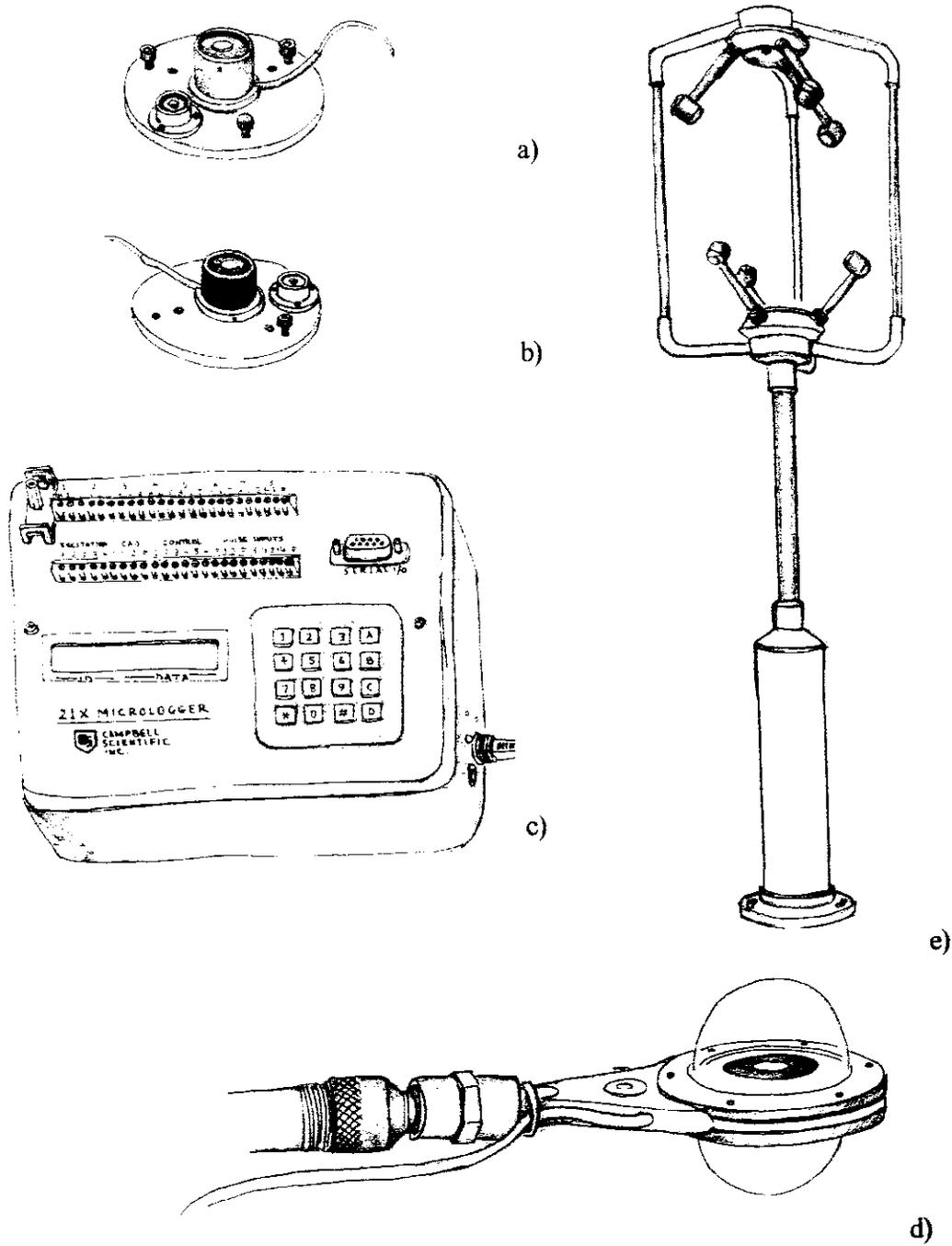
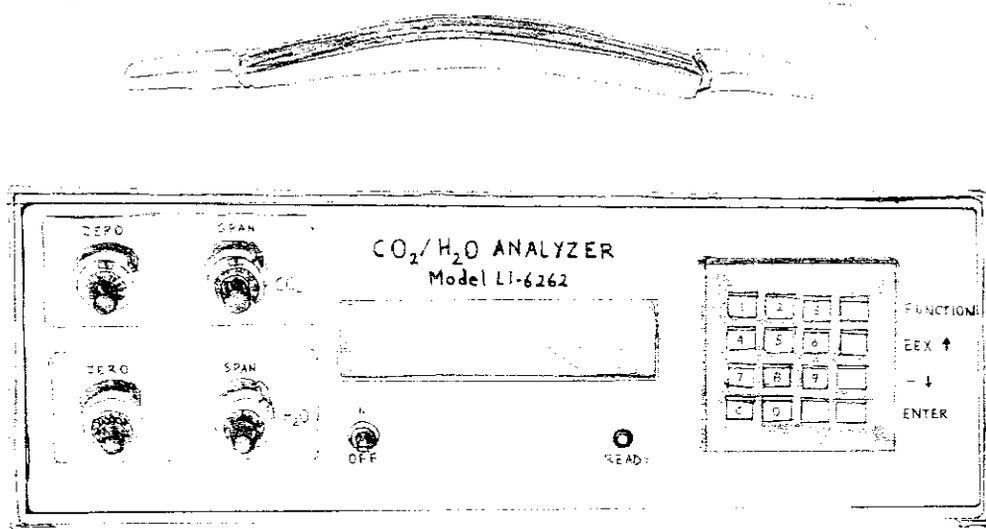
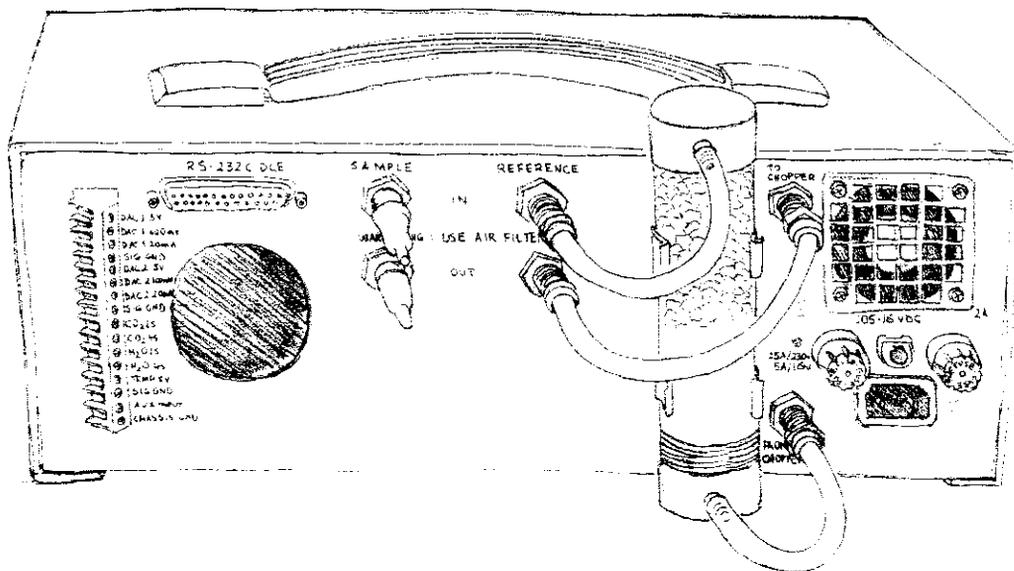


Figura 5. Aparelhos: a) sensor quântico, b) piranômetro (montados sobre base niveladora), c) sistema automático de aquisição de dados, d) saldo radiômetro e e) anemômetro ultrassônico tridimensional.



a)



b)

Figura 6. Analisador de gases por infravermelho: a) Vista anterior e b) Vista posterior.

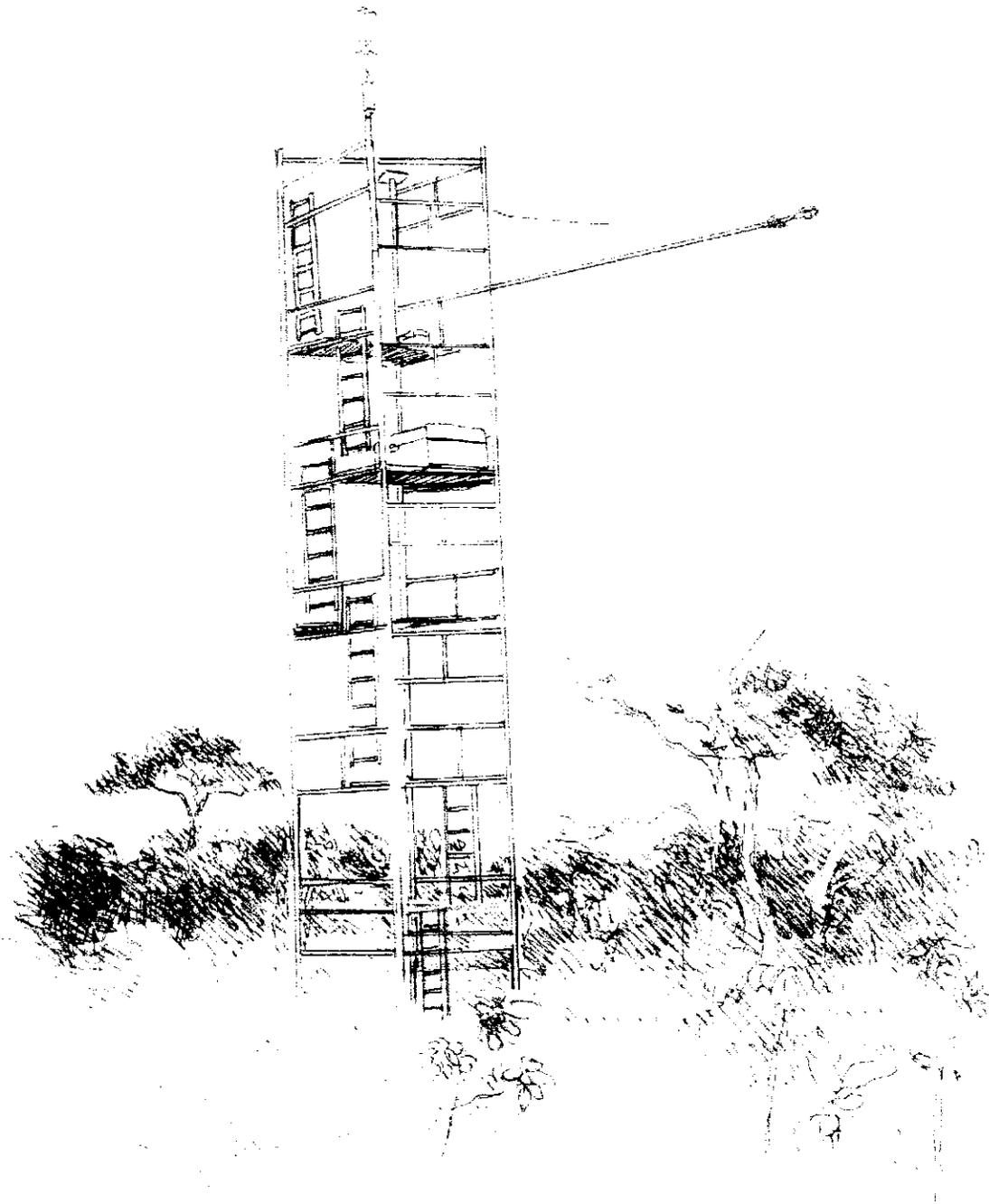


Figura 7. Torre disposta no cerrado alterado, ao topo, em primeiro plano, o anemômetro ultra-sônico, na diagonal uma placa que apóia o piranômetro e o sensor quântico voltados para cima, no extremo da haste que se distancia da estrutura principal está o saldo radiômetro e logo antes outra placa que sustenta o piranômetro e o sensor quântico voltados para baixo. Na pequena caixa posta sobre a plataforma mais próxima um sistema de aquisição de dados e na caixa grande da plataforma seguinte: um microcomputador portátil, uma bomba de sucção de ar, o analisador de gases por infravermelho. Sobre o solo, encoberto pela vegetação, está o conjunto de 12 baterias que fornece energia ao sistema.

2.3 O método da covariância de vórtices turbulentos

As trocas de vapor de água, CO₂, calor e *momentum* entre um dossel e o ar sobre ele dependem das propriedades de trocas turbulentas do perfil de vento gerado na camada limite, que é a porção da atmosfera que interage com a biosfera. Estas trocas são determinadas pela velocidade do vento e pelas propriedades do dossel (Jarvis *et al.* 1976). O método de covariância de vórtices turbulentos (*eddy covariance*), usado nos estudos da interação vegetação-atmosfera, foi primeiramente desenvolvido para medidas de fluxos de calor e vapor de água na escala de dossel e ecossistema, depois foi estendido para os fluxos de CO₂, quando sensores confiáveis de resposta rápida para medidas da concentração deste gás estavam disponíveis, na década de 1980 (Ruimy *et al.* 1995). O método de covariância de vórtices baseia-se no princípio de que o fluxo de qualquer escalar pode ser definido como (Moncrieff *et al.* 1997a):

$$F_c = \overline{w \cdot \rho_c} \quad (2)$$

onde F_c é a densidade de fluxo do escalar c ; w é a velocidade vertical do vento e ρ_c é a densidade (ou concentração) do escalar. A barra horizontal representa a média do produto em um intervalo de tempo. Registros de velocidade do vento, temperatura e concentração possuem uma forma irregular ou turbulenta, sendo conveniente tratar estas variáveis como a soma de uma média e uma parte flutuante, ou turbulenta, o que é conhecido na literatura como decomposição de Reynolds (Stull 1988):

$$w = \overline{w} + w' \quad (3a)$$

$$\rho = \overline{\rho_c} + \rho'_c \quad (3b)$$

onde w' e ρ'_c representam flutuações em torno da média. A Equação 2 pode então ser reescrita como:

$$F_c = (\overline{w_c} + w').(\overline{\rho_c} + \rho'_c) \quad (4a)$$

$$F_c = \overline{w\rho_c} + \overline{w'\rho'_c} \quad (4b)$$

mostrando que o fluxo total de qualquer escalar é a soma de um fluxo médio vertical $\overline{w\rho_c}$ e um fluxo turbulento $\overline{w'\rho'_c}$. Nota-se que na expansão completa da Equação 2 (Equação 4b), alguns termos que envolvem a média dos componentes flutuantes foram omitidos porque, pela definição de média, $\overline{w'}$ e $\overline{\rho'_c} = 0$. Já o termo que envolve a média do produto de dois componentes flutuantes ($\overline{w'\rho'_c}$), a covariância, raramente será zero.

Assume-se dado um intervalo adequado de tempo que a média das variações da velocidade do vento na vertical é nula, ou seja $\overline{w} = 0$. Assim obtém-se uma equação prática para a covariância de vórtices turbulentos:

$$F_c = \overline{w'\rho'_c} + \text{fatores de correção} \quad (5)$$

Os fatores de correção aplicados devido às mudanças na densidade do ar, às transferências de calor e às características da instrumentação são descritas por Moncrieff *et al.* (1997b). Baseando-se na Equação 5, para o cálculo do fluxo deve-se, portanto, obter os valores de w' e de ρ'_e , para este fim deve-se dispor de meios para a amostragem instantânea da velocidade vertical do vento e da concentração do escalar, destes subtrai-se uma média e assim efetua-se o cálculo do produto das flutuações obtidas. Neste trabalho as amostragens foram feitas a 21 Hz e as médias instantâneas das quais foram obtidas as flutuações calculou-se com base na abordagem proposta por Dyer *et al.* (1967), apresentada por Baldocchi *et al.* (1988) como:

$$\bar{c}_i = \alpha \cdot \bar{c}_{i-1} + (1 - \alpha) \cdot c \quad (6)$$

onde \bar{c}_i e \bar{c}_{i-1} são respectivamente as novas médias e as anteriores e c é o novo valor instantâneo. A constante α é calculada como:

$$\alpha = \exp(-\Delta t / \Gamma) \quad (7)$$

onde Δt é o intervalo de tempo entre as medidas (1/21 s neste trabalho) e Γ é uma constante de tempo.

Neste trabalho utilizou-se $\Gamma = 200$ s, que é um valor adequado, segundo revisão feita por Moncrieff *et al.* (1997b), pois segundo afirmam o fluxo calculado é relativamente insensível a valores escolhidos entre 100 e 1000 s.

A técnica de covariância de vórtices turbulentos, como técnica micrometeorológica, apresenta algumas vantagens, como as expostas por Baldocchi *et al.* (1988). O sistema de medidas é instalado *in situ* e não danifica o ambiente em torno do dossel. Além disso esta técnica permite medidas contínuas, podendo as médias temporais destas medidas, em um ponto, fornecer uma média integrada espacialmente das taxas de troca entre a superfície e a atmosfera.

2.4 Área englobada pelos sensores

Dentre as principais limitações do método de covariância de vórtices turbulentos está o fato de que as medidas devam ser feitas a uma distância mínima da borda da parcela medida, na direção do vento predominante. Isto para que os fluxos medidos (ou uma grande proporção destes), tenham sido gerados dentro da área que é o objeto de estudo. Cada ponto ou área fonte irá contribuir potencialmente para o fluxo medido em um grau que varia com sua distância até o ponto de medida, altura da observação, com as características da camada limite e com a estabilidade atmosférica. Schuepp *et al.* (1990) propuseram um modelo bidimensional para estimar a contribuição relativa de um ponto localizado a uma distância x (na direção do vento predominante) para o fluxo vertical medido a uma altura z , como:

$$\frac{1}{Q_0} \frac{dQ}{dx} = (-) \frac{u(z-d)}{u_*} \exp \frac{-u(z-d)}{ku_*x} \quad (8)$$

onde Q_0 é o fluxo correspondente à área localizada a uma distância x na direção do vento, Q é o fluxo total medido. A designação $(1/Q_0) dQ/dx$ denota o fato que a integração do lado direito da expressão na Equação 8, ou a soma dQ/Q_0 de $x = 0$ até o infinito, é igual a 1, ou

seja é igual a densidade de fluxo total no ponto de medida. u é a velocidade do vento, assumida como constante, entre o solo e a altura z , d é o deslocamento do plano zero, k é a constante de von Karman ($\sim 0,41$) e u_* é a velocidade de fricção (Stull 1988). O deslocamento do plano zero pode variar entre 60 a 80 % da altura da vegetação (h). Neste trabalho foi utilizado o valor de $0,67 h$, mesmo valor obtido para o cerrado *sensu stricto* (Miranda & Santos 1997), que é um valor dentro do limite esperado quando a densidade máxima da folhagem ocorre na metade da altura da vegetação (Monteith & Unsworth 1990).

2. 5 Resistências contra os fluxos

As transferências de energia e massa entre a vegetação e a atmosfera dependem da natureza turbulenta da camada limite que define o grau de acoplamento entre a superfície e o ar. Se não houvesse turbulência e o transporte fosse realizado apenas por difusão, haveria por exemplo, uma depleção do CO_2 próximo a um dossel que estivesse fotossintetizando a altas taxas. A estrutura turbulenta da camada limite é determinada pela velocidade do vento e aspereza aerodinâmica da vegetação (Grace 1983).

Pelo princípio da similaridade, assume-se que a taxa na qual as trocas turbulentas são feitas é igual para qualquer entidade (e. g. CO_2 , calor) e a resistência imposta a estas transferências, chamada resistência aerodinâmica, pode ser quantificada como:

$$r_a = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{u_*^2} \quad (9)$$

onde u e v representam as componentes no plano horizontal da velocidade do vento (ms^{-1}), e u_* é a velocidade de fricção (ms^{-1}), calculada a partir das flutuações da velocidade das componentes horizontais e da componente vertical do vento (Stull 1988).

É comum utilizar-se a grandeza recíproca ($1/r_a$), denominada condutância aerodinâmica (g_a), para indicar o grau de acoplamento entre a vegetação e a atmosfera.

No caso das trocas gasosas entre as plantas e a atmosfera, além da resistência aerodinâmica, pode atuar a resistência estomática, que é influenciada fisiologicamente. A abertura estomática pode ser influenciada pela luz, balanço hídrico na planta, temperatura, déficit de pressão de vapor do ar em relação à folha ou em relação ao ar saturado, pela idade das folhas e estação do ano (Grace 1983).

A resistência de superfície ou resistência estomática do dossel (r_s) pode ser estimada indiretamente, conhecendo-se a taxa de evapotranspiração, o déficit de pressão de vapor do ar e alguns componentes do balanço de energia. Esta estimativa é feita isolando-se o termo correspondente, no modelo proposto por Penman (1953) e modificado por Monteith (1965), para o cálculo da evapotranspiração em escala de dossel:

$$r_s = \frac{s \cdot r_a (R_n - G - \lambda E) + \rho_a \cdot c_p \cdot D}{\lambda E \cdot \gamma} - r_a \quad (10)$$

onde s é a inclinação da curva que relaciona pressão de vapor com temperatura ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é o saldo de radiação (Wm^{-2}), G é o fluxo de calor no solo (Wm^{-2}), λE é a taxa de evapotranspiração (Wm^{-2}), ρ_a é a densidade do ar (kgm^{-3}), c_p é o calor específico do ar ($\text{Jkg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), D é o déficit de pressão de vapor do ar (Pa) e γ é a constante psicrométrica ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Os valores de D e λE podem ser obtidos conhecendo-se a fração molar de vapor de água no ar, temperatura do ar e fluxo de água, que foram obtidos neste trabalho através da instrumentação descrita em *Instrumentação*. A condutância estomática (g_s), é o inverso da resistência estomática ($1/r_s$).

2.6 Balanço de energia

Aplicando-se o princípio da conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica) à uma vegetação, pode-se afirmar que todos os fluxos de energia para dentro e para fora do sistema devem ser iguais à taxa de armazenamento, desta forma:

$$R_n - H - G - \lambda E = M + S \quad (11)$$

Onde R_n é o ganho líquido de radiação (ondas curtas + ondas longas), H é a perda de calor sensível por condução e convecção para o ar, G é a perda de calor sensível por condução para os arredores, principalmente para o solo, λE é a perda de calor por evapotranspiração, S é a energia despendida no aquecimento da vegetação e do ar, e M é a energia química armazenada metabolicamente, dominada pelos processos de fotossíntese e respiração. No balanço de energia apresentado neste estudo, as componentes do armazenamento S e M foram omitidas por serem quantidades pequenas em relação ao saldo de energia. Como uma aproximação considera-se portanto:

$$R_n = H + G + \lambda E \quad (12)$$

Da Equação 5 deriva-se a Equação para o cálculo da densidade de fluxo de calor sensível (H):

$$\overline{H} = \rho_a \cdot c_p \cdot \overline{w' T'_a} \quad (13)$$

onde c_p é a capacidade de calor específico do ar a pressão constante ($1,01 \text{ Jg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$), ρ_a é a densidade do ar ($1,204 \text{ kgm}^{-3}$ a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$) e T'_a é a flutuação da temperatura do ar ($^\circ\text{C}$).

O fluxo de calor latente (λE) é calculado como sendo o fluxo de vapor de água (E) multiplicado pelo calor latente de evaporação da água ($\lambda = 44,28 \text{ MJmol}^{-1}$ a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$).

2.7 Balanço de CO_2

O fluxo de CO_2 medido através de um plano horizontal sobre a vegetação é o resultado de todos os fluxos de CO_2 que ocorrem dentro do sistema onde existem fontes respiratórias e órgãos fotossintéticos que absorvem o CO_2 . Este fluxo pode ser descrito como (Ruimy *et al.* 1995):

$$\text{durante o dia:} \quad F_d = (R_r + R_h - R_c) - A_n - \Delta S_c \quad (14a)$$

$$\text{durante a noite:} \quad F_n = R_r + R_h - R_c + R_f - \Delta S_c \quad (14b)$$

onde F_d é o fluxo de CO_2 sobre o dossel durante o dia e F_n é o fluxo de CO_2 durante a noite, R_r é o fluxo respiratório das raízes, R_h dos microorganismos e fauna do solo, R_c dos caules, R_f das folhas e A_n é a taxa de fotossíntese líquida ($A_n = A - R_f$, sendo A a taxa fotossintética bruta). O termo ΔS_c é a variação na quantidade de CO_2 armazenada na coluna de ar entre o

solo e a altura onde são feitas as medidas do fluxo, sendo tratada como positiva se a quantidade armazenada aumenta, e negativa se esta quantidade diminui.

Neste trabalho, é utilizada a convenção micrometeorológica, ou seja, os fluxos que ocorrerem no sentido da vegetação para a atmosfera têm sinais positivos e os que ocorrerem em sentido inverso, da atmosfera para a vegetação, têm sinais negativos. Ficando, portanto, negativos os fluxos relacionados à assimilação e positivos os fluxos relacionados à respiração. Considerando a convenção micrometeorológica de sinais e rearranjando a Equação 14, temos a taxa fotossintética bruta A através da soma dos valores absolutos dos fluxos noturnos e diurnos:

$$A = A_n + R_f = -F_d - F_n - \Delta S_c \quad (15)$$

O armazenamento na coluna de ar (ΔS_c) é especialmente importante no balanço diário de carbono em dossel fechado onde, nas condições estáveis noturnas, pode haver acúmulo, nas copas das árvores, do CO_2 liberado na respiração (Grace *et al.* 1996). O cerrado, por ser uma vegetação bastante aberta, possui uma boa ventilação, não permitindo um acúmulo considerável de CO_2 sendo o termo de armazenamento medido sempre inferior a $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valor considerado baixo comparado aos demais fluxos (Miranda *et al.* 1997). O armazenamento na coluna de ar será, portanto, omitido neste trabalho.

Os valores calculados de assimilação são utilizados nos cálculos da eficiência quântica e da eficiência de uso de água. A eficiência quântica efetiva (Q_{eff}) é a quantidade de CO_2 assimilada durante 24 horas dividida pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa incidente (I) no mesmo período:

$$Q_{eff} = \frac{\int A dt}{\int I dt} \quad (16)$$

24 horas

da mesma forma a eficiência média de uso de água WUE_m é calculada como:

$$WUE_m = \frac{\int A dt}{\int E dt} \quad (17)$$

24 horas

onde E é a taxa de evapotranspiração.

2.8 Fluxos de CO₂ e radiação incidente

A utilização fotossintética da energia luminosa pelas plantas pode ser descrita pelas curvas de resposta à luz. Na ausência de luz, há apenas a liberação líquida de CO₂ devido à respiração; à medida em que a densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (*PPFD*) aumenta, a liberação líquida de CO₂ é gradualmente reduzida, enquanto aumenta a assimilação pelo processo de fotossíntese. A liberação líquida de CO₂ ocorre até um ponto, chamado ponto de compensação luminoso, em que a absorção pela fotossíntese se iguala às perdas respiratórias, resultando em um fluxo líquido de CO₂ igual a zero. Acima deste ponto a absorção líquida de CO₂ aumenta até que um nível de saturação é alcançado. Este processo geralmente resulta em uma curva em forma de hipérbole, quando o fluxo de CO₂ é plotado em função da luz (Lüttge 1997). A resposta do fluxo de CO₂ à luz em uma

comunidade é qualitativamente similar, embora quando as folhas mais expostas estejam saturadas, as folhas das camadas menos expostas à luz podem ainda não ter atingido o ponto de saturação, e a curva tende, portanto, à linearidade, podendo até ser linear em todo o intervalo de *PPFD* (Ruimy *et al.* 1995).

Para testar a hipótese de que as respostas fotossintéticas em escala foliar podem ser extrapoladas para o dossel, foram utilizados dois modelos empíricos simples. Um modelo bastante utilizado para descrever a relação entre o fluxo líquido de CO_2 (P) e a radiação incidente é a hipérbole retangular (Ruimy *et al.* 1995):

$$P = \frac{\alpha \cdot I \cdot P_{\max}}{P_{\max} + \alpha \cdot I} + R \quad (18)$$

onde α é o rendimento quântico, que é a inclinação média da curva nos baixos níveis de irradiância, I é o fluxo de fótons incidente, P_{\max} é a taxa máxima de fotossíntese e R é a taxa de respiração.

Além do modelo de hipérbole retangular, foi utilizado o exponencial proposto por Landsberg (1977), que descreve a resposta funcional da fotossíntese como:

$$P = P_{\max} \cdot \{1 - \exp[-\beta \cdot (I - I_{\text{comp}})]\} \quad (19)$$

onde β é um fator de forma da curva e I_{comp} é o ponto de compensação luminoso, que é a *PPFD* na qual a taxa de fotossíntese é igual à taxa de respiração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da vegetação

A área "preservada" apresentou 6800 indivíduos por hectare, distribuídos em 67 espécies (Tabela 1). As plantas consideradas nesta amostragem eram lenhosas e apresentavam no mínimo 5 cm de circunferência (1,6 cm de diâmetro) a 30 cm do solo. As medidas de circunferência foram tomadas com uma fita métrica e as alturas estimadas com base em uma haste de 4 m marcada a cada 50 cm. Dez espécies representaram mais de 50% dos indivíduos presentes na área amostrada. *Kielmeyera coriacea* foi a espécie mais freqüente representando 12,1% dos indivíduos amostrados. Embora *Sclerolobium paniculatum* domine visualmente a vegetação da área, representou apenas 1,5% da amostra. Por serem árvores de grande porte e com copa bastante desenvolvida, se destacam na vegetação levando a interpretação errônea quanto a sua freqüência absoluta. Entretanto, ao considerarmos o Índice de Valor de Importância (IVI) a espécie ocupa o quarto lugar em relação às demais. Doze espécies estiveram representadas na amostra com apenas um indivíduo, a saber: *Anacardium humilis*, *Annona pygmaea*, *Banisteriopsis stellaris*, *Bauhinia rufa*, *Diospyros burchellii*, *Enterolobium ellipticum*, *Hancornia speciosa*, *Lafoensia pacari*, *Miconia albicans*, *Salacia crassiflora*, *Stryphnodendron adstringens* e *Tetrapteris sp.*

A altura dos indivíduos variou de 0,4 m a 10,5 m, sendo que 85% deles apresentaram altura de até 3,0 m (Figura 8a). Apenas 1,8% apresentaram altura superior a 8 m: *Sclerolobium paniculatum* e *Didymopanax macrocarpum* na razão de 9:1. A circunferência, a 30 cm do solo, variou de 5,0 cm a 116,0 cm (diâmetro de 1,6 cm a 37,0 cm), sendo que 12,8% apresentavam circunferência com 30 cm ou mais (9,5 cm ou mais de

Tabela 1. Relação das espécies lenhosas inventariadas em área de cerrado *sensu stricto* protegida de queima na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Espécie	Frequência relativa		Frequência relativa
<i>Kielmeyera coriacea</i>	12,1	<i>Vochysia elliptica</i>	0,9
<i>Pouteria ramiflora</i>	7,6	<i>Dimorphandra mollis</i>	0,6
<i>Qualea parviflora</i>	5,3	<i>Erythroxylum campestre</i>	0,6
<i>Davilla elliptica</i>	5,1	<i>Mimosa clausenii</i>	0,6
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i>	4,9	<i>Qualea grandiflora</i>	0,6
<i>Ouratea hexasperma</i>	4,3	<i>Strychnos pseudoquina</i>	0,6
<i>Aspidosperma tomentosa</i>	3,5	<i>Acosmium dasycarpum</i>	0,4
<i>Pisonia noxia</i>	3,2	<i>Annona crassiflora</i>	0,4
<i>Neea theifera</i>	3,1	<i>Eriotheca pubescens</i>	0,4
<i>Kielmeyera speciosa</i>	2,9	<i>Erythroxylum deciduum</i>	0,4
<i>Didymopanax macrocarpum</i>	2,8	<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	0,4
<i>Rapanea guianensis</i>	2,6	<i>Miconia pohliana</i>	0,4
<i>Byrsonima verbascifolia</i>	2,2	<i>Syagrus comosa</i>	0,4
<i>Connarus suberosus</i>	2,2	<i>Tabebuia ochracea</i>	0,4
<i>Erythroxylum suberosum</i>	2,1	<i>Byrsonima crassa</i>	0,3
<i>Caryocar brasiliense</i>	1,8	<i>Chomelia ziberioides</i>	0,3
<i>Roupala montana</i>	1,8	<i>Dalbergia miscolobium</i>	0,3
<i>Syagrus flexuosa</i>	1,8	<i>Palicourea rigida</i>	0,3
<i>Baccharis ramosissima</i>	1,5	<i>Psidium warmingianum</i>	0,3
<i>Bowdichia virgilioides</i>	1,5	<i>Salvertia convallariodora</i>	0,3
<i>Erythroxylum tortuosum</i>	1,5	<i>Vatairea macrocarpa</i>	0,3
<i>Miconia rubiginosa</i>	1,5	<i>Anacardium humilis</i>	0,1
<i>Piptocarpha rotundifolia</i>	1,5	<i>Annona pygmaea</i>	0,1
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	1,5	<i>Banisteriopsis stellaris</i>	0,1
<i>Butia leiostpatha</i>	1,3	<i>Bauhinia rufa</i>	0,1
<i>Vochysia rufa</i>	1,3	<i>Diospyros burchellii</i>	0,1
<i>Brosimum gaudichaudii</i>	1,2	<i>Enterolobium ellipticum</i>	0,1
<i>Eremanthus goyazensis</i>	1,2	<i>Hancornia speciosa</i>	0,1
<i>Byrsonima coccolobifolia</i>	1,0	<i>Lafoensia pacari</i>	0,1
<i>Casearia sylvestris</i>	1,0	<i>Miconia albicans</i>	0,1
<i>Protium dawsonii</i>	1,0	<i>Salacia crassiflora</i>	0,1
<i>Cassia planaltoana</i>	0,9	<i>Stryphnodendron adstringens</i>	0,1
<i>Styrax ferrugineus</i>	0,9	<i>Tetrapteris sp.</i>	0,1
<i>Tocoyena formosa</i>	0,9		

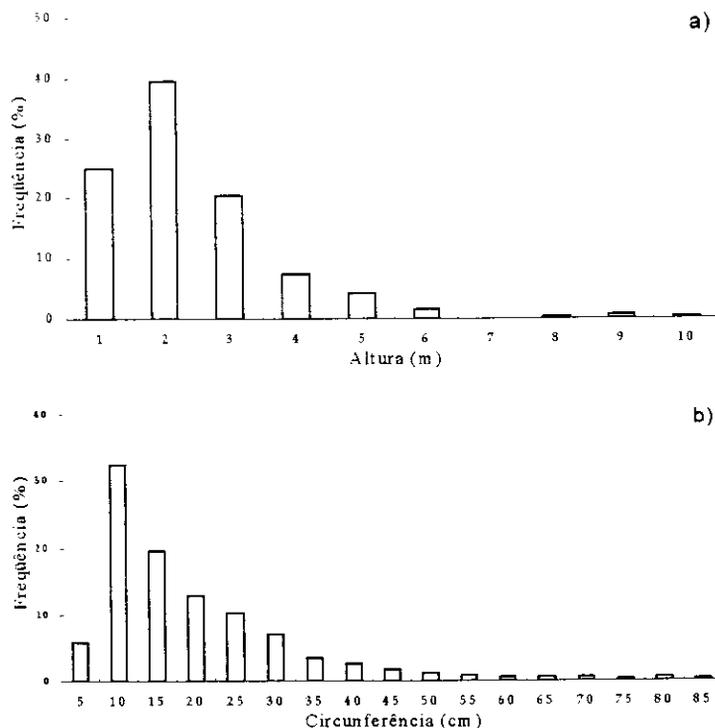


Figura 8. Distribuição de altura (a) e de circunferência, a 30 cm do solo, (b) para os indivíduos lenhosos inventariados em área de cerrado *sensu stricto* protegido na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

diâmetro) (Figura 8b). O volume cilíndrico foi de 106,2 m³/ha. A biomassa estimada para a área foi de 40,4 t/ha. Ottmar *et al.* (2001) estimaram em 6258 o número de indivíduos/ha e em 42,96 t/ha a biomassa para cerrado *sensu stricto*, protegido de queima por mais de 20 anos, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Poucos são os estudos que quantificam a biomassa da vegetação lenhosa para o Cerrado e a contribuição das folhas para este total. Santos (1988), Silva (1990) e Abdala *et al.* (1998) determinaram um total de biomassa de 22 a 27 t/ha para a vegetação lenhosa de cerrado *sensu stricto*, com as folhas representando entre 5% e 5,5% do total. Santos (1988) em estudo sobre a composição da biomassa em uma área de cerrado *sensu stricto* na

Reserva Ecológica de Águas Emendadas determinou que a contribuição das folhas para o total de biomassa representa 5,5% durante a estação chuvosa sendo reduzido para 3,8% durante a estação seca. Utilizando estas proporções, para a área protegida, as folhas apresentaram um total de biomassa de 2,2 t/ha durante o período das chuvas e 1,5 t/ha na estação seca. Nardoto (2000) determinou, para uma área de cerrado *sensu stricto* protegido de queima por mais de 26 anos, a produção de 1,9 t/ha de folheto nos meses de julho, agosto e setembro. Esse valor é duas vezes maior que a redução estimada para a quantidade de folhas na área experimental e pode estar refletindo diferenças na estrutura e composição de espécies entre as duas áreas. Durante os meses de julho a setembro ocorre acentuada abscisão de folhas tanto para as espécies brevidecíduas do Cerrado quanto para as espécies perenifólias (Cardinot 1998, Pinto 1999). Pinto (1999) em estudo sobre fenologia de sete espécies brevidecíduas e perenifólias em área de cerrado *sensu stricto* determinou uma redução de 53% no número de folhas ao longo da estação seca, resultando em uma biomassa de cerca de 0,7 t/ha. As espécies brevidecíduas como *Caryocar brasiliense*, *Erythroxylum suberosum*, *Guapira noxia*, *Qualea grandifolia* (Pinto 1999) e *Kielmeyera coriacea* (Cardinot 1998) contribuem com a maior porcentagem na formação do folheto durante esse período, uma vez que as espécies perenifólias como *Ouatea hexasperma*, *Roupala montana* e *Styrax ferrugineus* mantêm cerca de 30% das folhas ao final da estação seca (Pinto 1999).

A área "alterada" apresentou 2620 indivíduos por hectare, distribuídos em 43 espécies (Tabela 2). As plantas consideradas nesta amostragem eram lenhosas e apresentavam no mínimo 5,0 cm de circunferência (1,6 cm de diâmetro) a 30 cm do solo. Seis espécies representaram mais de 50% dos indivíduos presentes na área amostrada.

Tabela 2. Relação das espécies lenhosas inventariadas em área de cerrado *sensu stricto* alterado por queimas freqüentes na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Espécie	Frequência relativa	Espécie	Frequência relativa
<i>Kielmeyera coriacea</i>	22,5	<i>Annona verbascifolia</i>	0,8
<i>Qualea grandiflora</i>	8,0	<i>Bowdichia virgilioides</i>	0,8
<i>Neea theifera</i>	6,9	<i>Butia leiospatha</i>	0,8
<i>Lafoensia pacari</i>	6,5	<i>Byrsonima verbascifolia</i>	0,8
<i>Eremanthus goyazensis</i>	5,3	<i>Caryocar brasiliense</i>	0,8
<i>Casearia sylvestris</i>	5,0	<i>Sclerolobium aureum</i>	0,8
<i>Dimorphandra mollis</i>	5,0	<i>Styrax ferrugineus</i>	0,8
<i>Stryphnodendron adstringens</i>	5,0	<i>Tabebuia ochracea</i>	0,8
<i>Piptocarpha rotundifolia</i>	3,8	<i>Acosmium dasycarpum</i>	0,4
<i>Annona crassiflora</i>	2,7	<i>Andira humilis</i>	0,4
<i>Davilla elliptica</i>	2,7	<i>Annona pygmaea</i>	0,4
<i>Byrsonima coccolobifolia</i>	2,3	<i>Enterolobium ellipticum</i>	0,4
<i>Tabebuia caraiba</i>	1,9	<i>Erythroxylum tortuosum</i>	0,4
<i>Dalbergia miscolobium</i>	1,5	<i>Eugenia dysenterica</i>	0,4
<i>Didymopanax macrocarpum</i>	1,5	<i>Machaerium opacum</i>	0,4
<i>Erythroxylum suberosum</i>	1,5	<i>Mimosa clausenii</i>	0,4
<i>Salvertia convallariodora</i>	1,5	<i>Ouratea hexasperma</i>	0,4
<i>Erythroxylum deciduum</i>	1,1	<i>Palicourea rigida</i>	0,4
<i>Kielmeyera speciosa</i>	1,1	<i>Pouteria ramiflora</i>	0,4
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	1,1	<i>Psidium warmingianum</i>	0,4
<i>Vochysia rufa</i>	1,1	<i>Strychnos pseudoquina</i>	0,4
<i>Agonandra brasiliensis</i>	0,8		

Kielmeyera coriacea foi a espécie mais freqüente, representando 22,5% dos indivíduos amostrados. Treze espécies estiveram representadas na amostra com apenas um indivíduo, a saber: *Acosmium dasycarpum*, *Andira humilis*, *Annona pygmaea*, *Enterolobium ellipticum*, *Erythroxylum tortuosum*, *Eugenia dysenterica*, *Machaerium opacum*, *Mimosa clausenii*, *Ouratea hexasperma*, *Palicourea rigida*, *Pouteria ramiflora*, *Psidium warmingianum* e *Strychnos pseudoquina*.

A altura dos indivíduos variou de 0,4 m a 7,0 m, sendo que 86% deles apresentaram altura de até 3,0 m (Figura 9a). Apenas 1,2% apresentaram altura superior a 6 m.

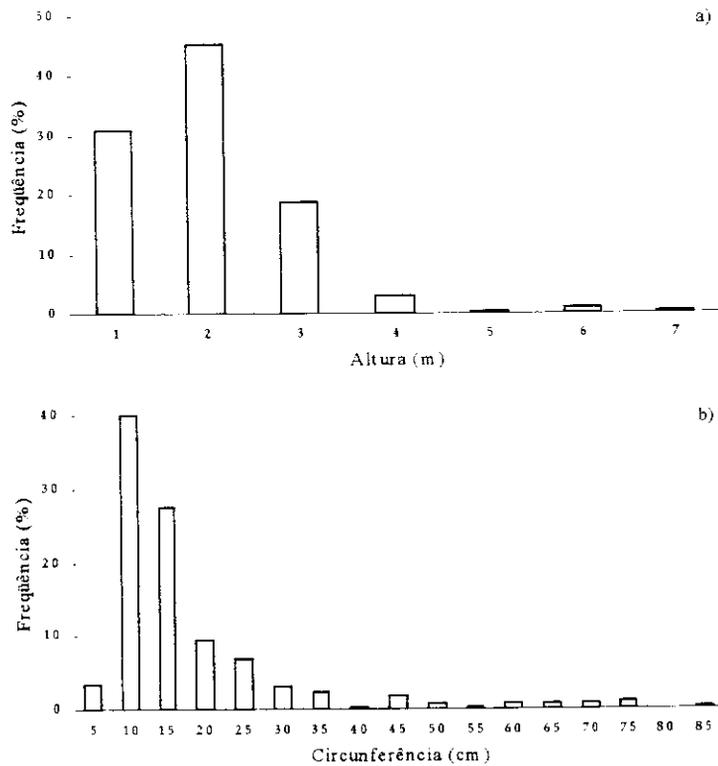


Figura 9. Distribuição de altura (a) e de circunferência, a 30 cm do solo, (b) para os indivíduos lenhosos inventariados em área de cerrado *sensu stricto* alterado na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Os indivíduos com altura superior a 6 m eram representados por *Qualea parviflora* e *Pouteria ramiflora*, na razão de 2:1. A circunferência variou de 5,0 cm a 81,0 cm (diâmetro de 1,6 cm a 25,7 cm), sendo que 10,3% apresentavam circunferência 30,0 cm ou mais (9,5 cm ou mais de diâmetro) (Figura 9b). O volume cilíndrico foi de 31,8 m³/ha. A biomassa estimada para a área foi de 12,1 t/ha, sendo cerca de duas vezes menor que a estimada por Santos (1988), Silva (1990) e Abdala *et al.* (1998) para cerrado *sensu stricto*, porém

estando no intervalo de 12,5 a 14,3 t/ha apresentado por Ottmar *et al.* (2001) para cerrado *sensu stricto* submetidos a queima freqüente no Parque Nacional de Grande Sertão Veredas (MG) e na Reserva Ecológica do IBGE (DF). Considerando as proporções apresentadas por Santos (1988), as folhas representaram cerca de 0,7 t/ha durante a estação chuvosa e 0,4 t/ha durante o período seco. Para a área alterada, a redução na biomassa de 0,5 t/ha é semelhante à determinada por Nardoto (2000) para a formação de folheto durante os meses de julho, agosto e setembro, em área de cerrado *sensu stricto* submetida à queima freqüente.

O estrato herbáceo da área protegida apresentou 4,8 t/ha, sendo que a liteira representou 51% do total de biomassa e as graminóides mortas 27%. Para a área alterada o total de biomassa foi de 4,3 t/ha, com liteira representando apenas 18% do total e as graminóides mortas 47%.

Ao longo do ano, na área protegida, a vegetação viva do estrato herbáceo nunca ultrapassou 30% do total, com o mínimo ocorrendo em agosto, auge da estação seca, quando representou apenas 4% do total de biomassa de dicotiledôneas e graminóides. Com a chegada das chuvas, ocorreu um aumento acentuado na proporção de biomassa viva que atingiu o máximo em maio. Para a área alterada, a biomassa de dicotiledôneas e graminóides vivas representa em média 30% do total, com um mínimo de 6% no mês de agosto e máximo de 47% em maio, final da estação seca (Figura 10a). A biomassa de dicotiledôneas e gramíneas mortas varia de 77 a 93% na área protegida e de 53 a 94% na área alterada (Figura 10b). As gramíneas mortas representaram cerca de 35% da biomassa morta na área protegida e 73% na área alterada por queima freqüente.

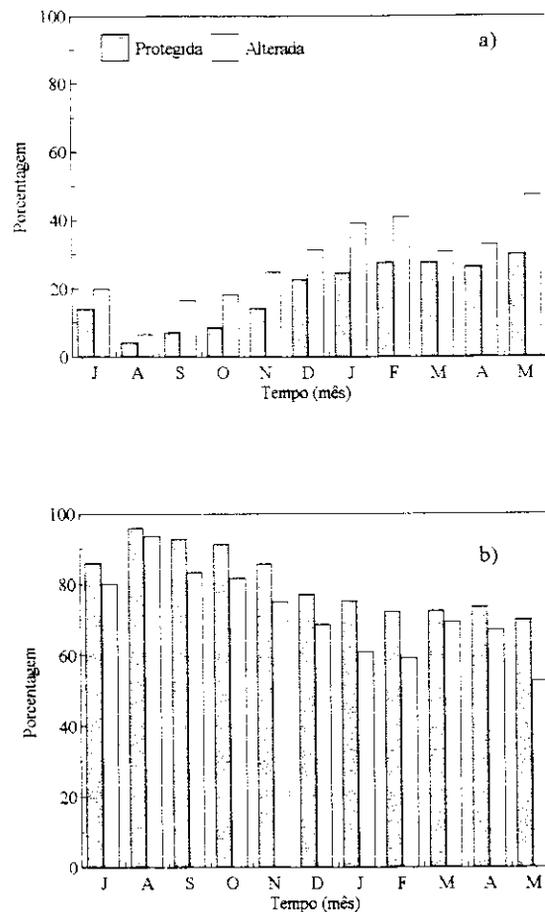


Figura 10. Variação da biomassa de gramíneas e dicotiledôneas vivas (a) e mortas (b) em áreas de cerrado *sensu stricto* protegido e alterado na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Poucos são os trabalhos que apresentam a dinâmica do estrato herbáceo para a vegetação do cerrado (Batmanian 1983, Andrade 1998 e Neto *et al.* 1998). A dinâmica da vegetação do estrato herbáceo determinada neste estudo é similar à apresentada por Andrade (1998) e Neto *et al.* (1998) para áreas de campo sujo protegida de queima. Na área de campo sujo protegida contra queima por mais de 18 anos, a proporção de gramas mortas

representou cerca de 50% do total de biomassa, com pequena variação durante o ano. A biomassa viva representou em média 25% do total atingindo proporção mínima de cerca de 15% em agosto. Para cerrado *sensu stricto*, Batmanian (1983) apresenta em cerca de 70% a contribuição das gramíneas (vivas e mortas) para o total de biomassa do estrato herbáceo. Para as dicotiledôneas a proporção mínima foi registrada no final da estação seca representando 24% do total de biomassa.

Para as duas áreas estudadas pode-se, na estação seca, observar uma grande redução na biomassa do material fotossinteticamente ativo, tanto no estrato arbóreo-arbustivo, em função da abscisão de folhas das espécies brevidecíduas e perenifólias, quanto no estrato herbáceo, principalmente em função da dormência ou morte das gramíneas, resultando em alterações no funcionamento do ecossistema no que se refere ao balanço energético, ao uso de água e aos fluxos de carbono (Maitelli & Miranda 1991, Condé 1995, Monteiro 1995, Miranda *et al.* 1996).

3.2 Balanço de energia

As medidas do balanço de energia para as áreas de cerrado *sensu stricto* protegida e alterada foram realizadas de maio a novembro de 2000. Tentou-se estender o período de medição por toda a estação chuvosa. Porém, o acondicionamento dos aparelhos e a proteção às células de referência dos analisadores de gases por infravermelho foram inadequadas face às chuvas torrenciais ocorridas desde os últimos dias de agosto. Como consequência, os resultados foram tratados como pertencentes a três grupos: transição para a seca (junho e julho), seca (agosto) e início das chuvas (setembro, outubro e novembro). Para efeito de comparação foram eliminados os dados obtidos em maio na área de cerrado preservado.

De acordo com os dados fornecidos pela Estação Meteorológica da EMBRAPA-Cerrado, não houve registro de precipitação nos meses de junho e julho; 39 mm em 29 de agosto; 55 mm em setembro; 85 mm em outubro e 240 mm em novembro. Estes últimos três meses, considerados nesse trabalho como início da chuva, devem a rigor ser considerados separadamente em função dos problemas encontrados com a instrumentação que impossibilitou a coleta simultânea dos dados nas duas torres.

O curso médio diário dos componentes do balanço de energia determinado para as áreas protegida e alterada nos meses de junho a setembro são apresentados na Figura 11. Para a comunidade protegida contra a ação do fogo, R_n máximo foi mensurado às 11:30 horas em junho, 12:30 horas em julho e agosto e novamente às 11:30 horas em setembro. Os valores máximos para os meses de junho a setembro variaram de 506 W/m²

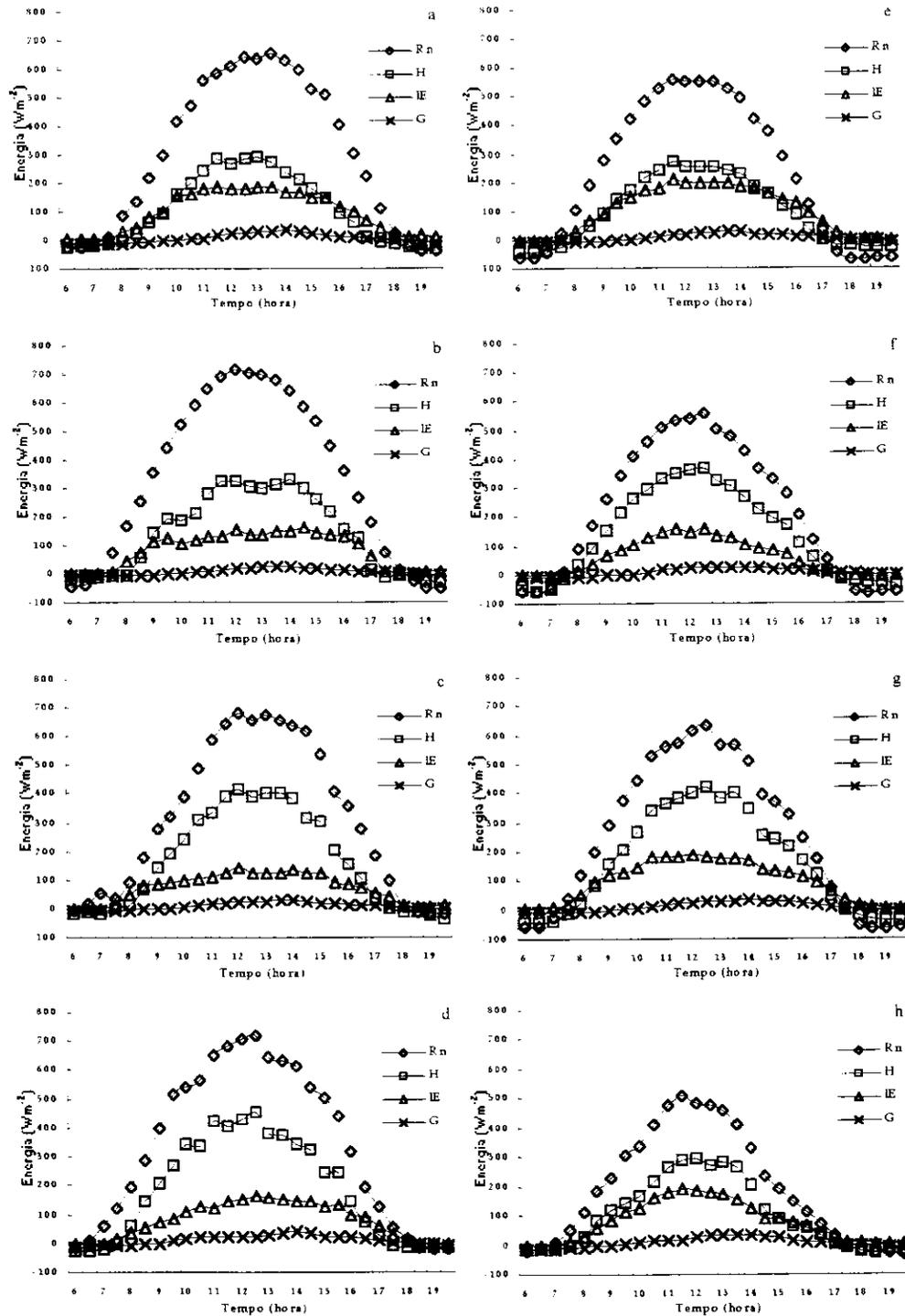


Figura 11. Curso médio diário do saldo de radiação (R_n), calor sensível (H), calor latente (λE) e fluxo de calor no solo (G) na Reserva Ecológica de Águas Emendadas em cerrado alterado em junho (a), julho (b), agosto (c) e setembro (d) de 2000 e em área preservada fogo em junho (e), julho (f), agosto (g) e setembro (h) de 2000.

a 635 W/m^2 (Tabela 3). O fluxo de calor sensível apresentou um aumento de 271 W/m^2 em junho para 402 W/m^2 em agosto, voltando a valores da ordem de 200 W/m^2 em setembro com o início das chuvas, refletindo principalmente a fenologia do estrato herbáceo que apresentava cerca de 93% da biomassa morta (Figura 10). Os valores de H representaram 48%, 65%, 63% e 58% de R_n durante os meses de junho, julho, agosto e setembro. O fluxo de calor latente (λE) apresentou uma redução ao longo da estação seca, com valores máximos entre 159 W/m^2 e 212 W/m^2 . Durante os meses de junho a setembro, a evapotranspiração representou 38%, 28%, 29% e 38% de R_n . O fluxo de calor no solo (G) variou de 26 a 36 W/m^2 , representando de 5 a 7% de R_n (Tabela 3).

Para a área de cerrado *sensu stricto* alterada por queima freqüente, os valores máximos do saldo de radiação (R_n) foram observados às 11:30 horas em junho, 13:30 horas em julho, 12:00 horas em agosto e 12:30 horas em setembro. Os valores máximos variaram de 653 W/m^2 em junho a 722 W/m^2 em setembro (Tabela 3). H máximo variou de 294 W/m^2 no início da estação seca a 452 W/m^2 no início da estação chuvosa, refletindo a redução da cobertura foliar e a morte do componente graminoso do estrato herbáceo. H representou 45%, 46%, 61% e 63% dos valores de R_n para os meses de junho, julho, agosto e setembro, apresentando uma contribuição inferior àquela determinada para a área protegida. O valor máximo do fluxo de calor sensível apresentou pouca variação entre os meses de junho a setembro, sendo da ordem de 141 a 171 W/m^2 . Assim, λE representou entre 21% e 26% de R_n , cerca de 10% inferior ao determinado para a área protegida. G variou de 26 W/m^2 a 41 W/m^2 (Tabela 3), representando de 4% a 6% de R_n .

Tabela 3. Componentes do balanço de energia (média \pm dp) para os meses de junho a setembro de 2000 em área de cerrado *sensu stricto* protegida de queima e área alterada por queima frequente na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, Brasília, DF.

Grandeza (W/m^2)	Área protegida		Área alterada	
	Mês	Valor (W/m^2)	Mês	Valor (W/m^2)
Saldo de radiação (R_n)	junho	559 \pm 13	junho	653 \pm 52
	julho	561 \pm 76	julho	718 \pm 8
	agosto	635 \pm 47	agosto	681 \pm 66
	setembro	506 \pm 200	setembro	722 \pm 48
Calor sensível (H)	junho	271 \pm 33	junho	294 \pm 26
	julho	367 \pm 68	julho	328 \pm 18
	agosto	402 \pm 44	agosto	415 \pm 23
	setembro	295 \pm 144	setembro	452 \pm 41
Calor latente (λE)	junho	212 \pm 76	junho	171 \pm 21
	julho	159 \pm 42	julho	161 \pm 5
	agosto	187 \pm 34	agosto	141 \pm 17
	setembro	194 \pm 97	setembro	163 \pm 25
Fluxo de calor no solo (G)	junho	30 \pm 3	junho	35 \pm 1
	julho	26 \pm 6	julho	26 \pm 2
	agosto	35 \pm 5	agosto	28 \pm 2
	setembro	36 \pm 18	setembro	41 \pm 14

Para as duas áreas, no mês de junho, considerado como período de transição, a partição de energia indica que há um equilíbrio entre a perda de calor por convecção e por evapotranspiração ($H = 48\%$ na área protegida e 46% na área alterada). Conforme a estação seca progride, as duas áreas passam a perder mais calor por convecção do que por evapotranspiração. Os valores obtidos para a partição de energia são similares aos determinados por Condé (1995) para cerrado *sensu stricto*. A autora determinou que H representou cerca de 49% de R_n durante a estação chuvosa e cerca de 60% durante a estação seca. No mesmo trabalho λE representou cerca de 35% de R_n na estação seca e 50% na estação chuvosa. Maitelli & Miranda (1991) determinaram que durante a estação chuvosa, a perda de energia por evapotranspiração aumenta para cerca de 60% de R_n . Silva (1999) determinou que cerca de 60% de R_n são representados pelo fluxo de calor sensível durante a estação seca, em uma área de campo sujo. Valores semelhantes foram determinados por Santos (1999) para campo sujo onde H representou cerca de 65% de R_n , λE cerca de 25% e G representou 8% de R_n , sendo portanto superior aos valores da contribuição de G determinados para as áreas de cerrado estudadas (4% a 7%). As diferenças encontradas para a contribuição de G para o balanço de energia entre as áreas de campo sujo e cerrado refletem a diferença na estrutura da vegetação. Em áreas de campo sujo a camada arborea não oferece impedimento à chegada de uma quantidade maior de radiação na superfície do solo.

A alteração na partição de energia entre H e λE com o progresso da estação seca e início da estação chuvosa fica mais evidente ao considerarmos a razão de Bowen ($\beta = H/\lambda E$). Para a área protegida, o valor médio de β determinado para o horário das 10:00 às 15:00 horas variou de $0,7$ em maio, atingiu o valor máximo de $2,7$ em julho, retornando a

0,8 em novembro, estação chuvosa (Tabela 4), evidenciando as alterações na magnitude do fluxo de calor latente durante a estação seca e chuvosa. Para a área alterada β variou de 1,4 em junho (transição), atinge o máximo de 3,0 em agosto (auge da seca) e retorna a 1,5 em outubro (estação chuvosa). Os valores de β obtidos para os meses da estação chuvosa são similares ao valor médio de 0,73 determinados por Maitelli & Miranda (1991) para cerrado *sensu stricto*, todavia inferiores ao valor de 1,1 determinado por Condé (1995). Santos (1999) determinou valores de β de 0,85 em novembro e de 0,74 em dezembro em uma área de campo sujo. Os valores determinados para os meses da estação seca são similares ao valor de 2,5 determinado por Condé (1995) para cerrado *sensu stricto* e por Santos (1999) para campo sujo ($\beta = 3,0$).

Para a área protegida, os valores médios mensais da perda de água por evapotranspiração variaram de 1,6 mm/(m².dia) em setembro a 2,7 mm/(m².dia) em novembro. Para o período de amostragem o valor médio foi de 2,3 mm/(m².dia). Para a área alterada os valores foram 1,5 mm/(m².dia) em agosto e 2,5 mm/(m².dia) em outubro, com valor médio para o período de 2,0 mm/(m².dia) (Tabela 5). Maitelli & Miranda (1991) determinaram uma perda de 2,8 mm/(m².dia) para uma área de cerrado *sensu stricto* durante a estação chuvosa. Valor semelhante (2,9 mm/(m².dia)) foi determinado por Condé (1995) para a estação chuvosa, com uma redução para 1,9 mm/(m².dia) durante a estação seca. Para campo sujo, Santos (1999) estimou em 2,1 mm/(m².dia) a perda de água por evapotranspiração durante a estação chuvosa.

Tabela 4. Curso médio diário (\pm dp) dos valores máximos da razão de Bowen ($\beta = H/\lambda E$) compreendendo o período das 10:00 às 15:00 horas em área de cerrado *sensu stricto* preservado e alterado na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, nos meses de maio a novembro de 2000.

Tempo (h)	Área Protegida						
	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
10:00	1,0 \pm 0,7	1,3 \pm 0,6	1,5 \pm 0,3	1,8 \pm 0,5	1,2 \pm 0,9	nd	0,7 \pm 0,4
10:30	0,7 \pm 0,2	1,6 \pm 0,9	1,9 \pm 0,8	1,9 \pm 0,3	3,1 \pm 4,7	nd	0,7 \pm 1,1
11:00	0,8 \pm 0,1	2,0 \pm 1,9	2,1 \pm 0,9	2,0 \pm 0,4	3,0 \pm 4,3	nd	0,8 \pm 1,2
11:30	0,8 \pm 0,1	1,5 \pm 0,7	1,7 \pm 0,5	2,1 \pm 0,6	2,0 \pm 1,5	nd	0,8 \pm 1,0
12:00	0,9 \pm 0,3	1,5 \pm 0,7	1,7 \pm 0,2	2,2 \pm 0,3	1,5 \pm 0,5	nd	0,8 \pm 1,1
12:30	0,8 \pm 0,3	1,4 \pm 0,5	1,8 \pm 0,5	2,4 \pm 0,4	1,5 \pm 0,8	nd	0,9 \pm 1,2
13:00	0,7 \pm 0,2	1,5 \pm 0,7	1,8 \pm 0,4	2,2 \pm 0,5	1,6 \pm 0,5	nd	0,9 \pm 1,3
13:30	1,0 \pm 0,3	1,3 \pm 0,5	1,7 \pm 0,4	2,2 \pm 0,6	1,6 \pm 0,5	nd	0,8 \pm 1,5
14:00	0,6 \pm 0,4	1,3 \pm 0,5	1,7 \pm 0,4	2,0 \pm 0,6	1,5 \pm 0,5	nd	0,9 \pm 1,7
14:30	0,7 \pm 0,5	1,2 \pm 0,6	1,7 \pm 0,6	1,7 \pm 0,7	1,3 \pm 0,8	nd	0,7 \pm 1,2
15:00	0,5 \pm 0,3	1,1 \pm 0,4	1,7 \pm 0,4	1,7 \pm 0,6	1,3 \pm 1,5	nd	0,7 \pm 1,2
Média	0,7 \pm 0,4	1,4 \pm 0,6	2,7 \pm 0,5	2,0 \pm 0,5	1,5 \pm 1,5	nd	0,8 \pm 0,3

Tempo (h)	Área Alterada						
	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
10:00	nd	1,1 \pm 0,2	1,6 \pm 0,5	2,4 \pm 0,3	3,4 \pm 1,4	1,7 \pm 0,7	nd
10:30	nd	1,3 \pm 0,3	2,3 \pm 0,9	3,0 \pm 0,5	2,5 \pm 0,4	1,8 \pm 0,5	nd
11:00	nd	1,5 \pm 0,2	2,0 \pm 0,2	3,0 \pm 0,3	3,0 \pm 0,5	1,6 \pm 0,6	nd
11:30	nd	1,5 \pm 0,3	2,3 \pm 0,1	3,4 \pm 0,6	3,1 \pm 1,3	1,6 \pm 0,4	nd
12:00	nd	1,6 \pm 0,4	2,2 \pm 0,1	2,9 \pm 0,6	2,7 \pm 0,6	1,5 \pm 0,3	nd
12:30	nd	1,6 \pm 0,2	2,1 \pm 0,4	2,9 \pm 0,5	2,9 \pm 0,5	1,6 \pm 0,3	nd
13:00	nd	1,5 \pm 0,3	2,0 \pm 1,0	3,2 \pm 0,6	2,5 \pm 0,4	1,6 \pm 0,3	nd
13:30	nd	1,5 \pm 0,4	1,7 \pm 0,5	2,6 \pm 0,7	2,1 \pm 0,7	1,4 \pm 0,3	nd
14:00	nd	1,5 \pm 0,3	2,0 \pm 0,5	2,5 \pm 0,6	2,2 \pm 0,7	1,4 \pm 0,5	nd
14:30	nd	1,4 \pm 0,2	1,7 \pm 0,2	2,4 \pm 1,1	2,1 \pm 0,6	1,3 \pm 0,5	nd
15:00	nd	1,3 \pm 0,2	1,8 \pm 0,4	2,6 \pm 0,5	1,9 \pm 0,5	1,2 \pm 0,5	nd
Média	nd	1,4 \pm 0,2	2,1 \pm 0,3	3,0 \pm 0,6	2,6 \pm 0,6	1,5 \pm 0,3	nd

Tabela 5. Evapotranspiração em áreas de cerrado *sensu stricto* protegido contra o fogo e alterada por queimadas freqüentes na Reserva Ecológica de Águas Emendadas determinadas no período de maio a novembro de 2000.

Tempo (mês)	Evapotranspiração ($\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)	
	Área Protegida	Área alterada
Maio	2,4	-
Junho	2,6	2,1
Julho	2,5	1,8
Agosto	2,0	1,5
Setembro	1,6	1,7
Outubro	-	2,5
Novembro	2,7	-
Média	2,3	2,0

Os valores de perda de água por evapotranspiração para a vegetação de cerrado *sensu stricto* são inferiores aos determinados para os cultivos que estão substituindo a vegetação nativa do Cerrado. De acordo com Alho & Martins (1994) cultivos de soja, milho, arroz, etc. ocupavam uma área de 11,5 milhões de hectares até 1990. Já no ano 2000 os cultivos de soja ocupavam uma área de 6,4 milhões de hectares, milho 2,8 milhões de hectares, arroz 1,3 milhões de hectares e 5,7 milhões de hectares eram ocupados por cultivos perenes (www.embrapa.br, Julho 2001). Dependendo do estágio de desenvolvimento, a soja pode perder por evapotranspiração entre 3,5 a 11,0 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (André & Viswanadham 1983; Horie & Luchiari Jr. 1988). Cultivos de arroz utilizam cerca de 4,3 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, milho 2,8 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (Uchijima 1976) e algodão irrigado 6,0 $\text{mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (Pieri & Fuchs 1990). Assim, a substituição de extensas áreas de cerrado por cultivos com maior demanda de água pode resultar em alterações significativas no balanço hídrico regional (Miranda & Miranda 1992).

A diferença entre os valores médios determinados para o período entre as duas áreas representa um total de 3000 litros de água por hectare ao dia evapotranspirado a mais pela área protegida. Durante o período de transição (junho e julho) e durante o período da seca (agosto) a área protegida perde mais água para a atmosfera do que a área alterada. A taxa de evapotranspiração é uma função da resistência aerodinâmica, resistência de dossel (Jones 1992) e do déficit de pressão de vapor entre o interior da folha e a atmosfera (Jarvis *et al.* 1997). Quando as resistências são muito altas, a perda de água será mínima. Os valores para a resistência aerodinâmica (r_a) variaram de 8 s/m a 12 s/m na área protegida e de 7 s/m a 13 s/m na área alterada (Figura 12) aumentando seu valor apenas no início e final do dia. Para as duas áreas o valor médio de r_a foi de 10 s/m (Figura 13) semelhante ao determinado por Maitelli & Miranda (1991), Condé (1995) e Santos (1995) para áreas de cerrado *sensu stricto*.

O valor mínimo da resistência de dossel (r_s) variou de 275 s/m a 547 s/m para a vegetação da área protegida e de 349 s/m a 762 s/m na área alterada (Tabela 6) com os maiores valores ocorrendo no início e final do dia (Figura 14). Para a área preservada, os valores mínimos de r_s ocorreram nos meses de julho e agosto e para a área alterada em agosto e setembro. Para o período de estudo, os valores mínimos de r_s foram de 443 s/m para a área protegida e 458 s/m para a área alterada (Figura 15). Os valores médios determinados nesse trabalho são maiores que os apresentados por Condé (1995) para a estação seca (300 s/m) e para a estação chuvosa (150 s/m). Todavia são semelhantes aos apresentados por Monteiro (1995) para cerrado *sensu stricto* durante a estação seca (290 s/m a 500 s/m) e por Silva (1999) para campo sujo durante a estação seca (670 s/m).

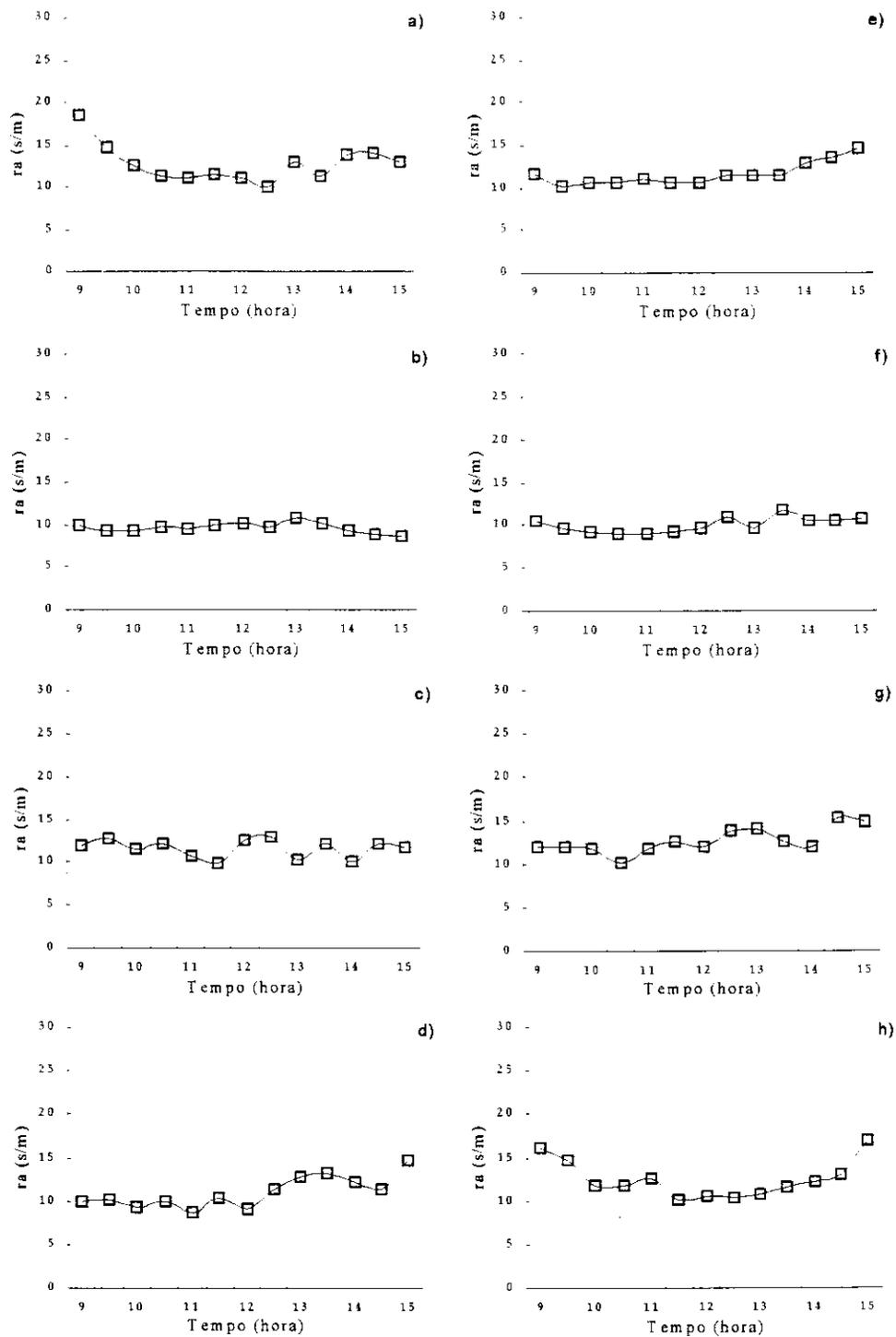


Figura 12. Curso médio diário da resistência aerodinâmica em cerrado *sensu stricto* alterado em junho (a), julho (b), agosto (c) e setembro (d) de 2000 e em área preservada em junho (e), julho (f), agosto (g) e setembro (h) de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

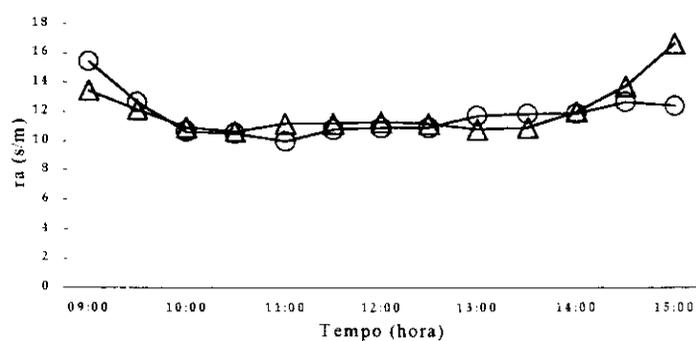


Figura 13. Curso médio diário da resistência aerodinâmica em cerrado *sensu stricto* em área preservada (Δ) e em área alterada (O) no período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Tabela 6. Valores mínimos da resistência de dossel (ou estomática) em cerrado *sensu stricto* alterado por queima freqüente no período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

Tempo (mês)	Resistência de dossel (s/m)	
	Área Protegida	Área Alterada
Maio	312	-
Junho	379	349
Julho	524	362
Agosto	547	762
Setembro	343	525
Outubro	-	380
Novembro	275	-
Média	443	458

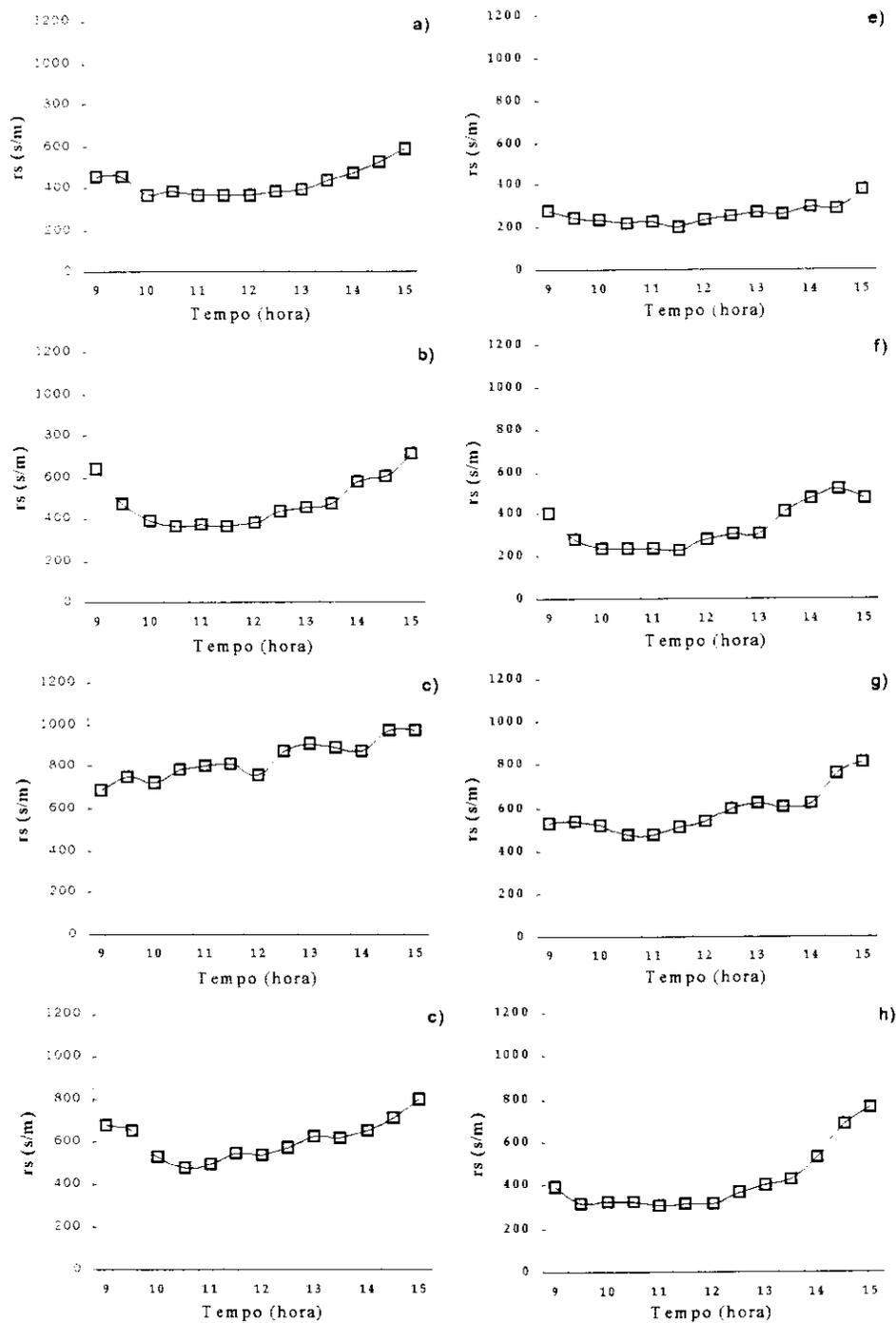


Figura 14. Curso médio diário da resistência de dossel (ou estomática) em cerrado *sensu stricto* alterado em junho (a), julho (b), agosto (c) e setembro (d) de 2000 e em área preservada da ação do fogo em junho (e), julho (f), agosto (g) e setembro (h) de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

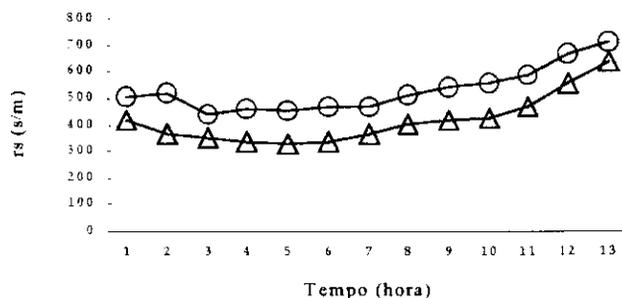


Figura 15. Curso médio diário da resistência de dossel (ou estomática) em cerrado *sensu stricto* em área preservada (Δ) e em área alterada (O) no período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

De forma geral, valores altos de r_s estão associados ao controle estomático da vegetação (Jones, 1992; Valentini *et al.* 1995) evitando a grande perda de água em períodos de grande demanda evaporativa. A variação sazonal da transpiração para a vegetação do cerrado foi associada por Maitelli & Miranda (1991) ao secamento da vegetação do estrato herbáceo. Todavia, o valor máximo de r_s na ordem de 500 s/m a 700 s/m na área alterada pode estar refletindo não apenas o secamento da vegetação do estrato herbáceo mas também a redução da biomassa fotossinteticamente ativa dos estratos arbóreo e arbustivo. Embora o estrato herbáceo das duas áreas tenha apresentado valores semelhantes de biomassa (4,8 t/ha na área protegida e 4,3 t/ha na área alterada) o estrato arbóreo da área protegida apresenta uma biomassa de folhas três vezes maior (1,5 t/ha na estação seca e 2,2 t/ha na estação chuvosa) do que a área alterada, o que pode representar uma perda maior de água. A estrutura da vegetação da área protegida, com indivíduos do estrato arbóreo com maior porte e um estrato arbustivo bastante desenvolvido, pode resultar no sombreamento das folhas dos estratos mais baixos favorecendo taxas de evapotranspiração mais elevadas nessa área do que na área alterada.

3.3 O fechamento do balanço de energia

O fechamento do balanço de energia é uma forma de determinar a qualidade dos dados tanto para o fluxo de calor sensível quanto para o fluxo de carbono, a serem apresentados a seguir, e tem sido utilizado para aferir as medidas realizadas com o método da covariância dos vórtices turbulentos (Valentini *et al.* 1995; Jarvis *et al.* 1997). Como as medidas do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G) e os fluxos de calor sensível (H) e calor latente (λE) são determinados de forma independente, a concordância entre os valores obtidos pelos dois sistemas indica que os mesmos estão aferidos. Desta forma, plotando-se ($R_n - G$), determinados com sensores independentes, em relação a ($H + \lambda E$), determinados com o método da covariância dos vórtices turbulentos, resulta em uma reta que deve aproximar-se de uma relação 1:1.

A regressão realizada com os dados coletados na área protegida resultaram em uma inclinação de 0,93 ($r^2 = 0,9531$, $n = 3994$) e ponto de interceptação de $2,1 \text{ Wm}^{-2}$. Para a área alterada, a inclinação foi de 0,83 ($r^2 = 0,9253$, $n = 1895$) e ponto de interceptação de $8,8 \text{ Wm}^{-2}$ (Figura 16). As diferenças nas inclinações das retas podem estar refletindo diferenças na estrutura da vegetação, que na área alterada apresenta-se mais heterogênea que na área protegida. Além disso, as diferenças podem também ser decorrentes do fato dos sensores para R_n e G amostrarem uma área mais restrita do que os utilizados para determinar os valores de H e λE . A concordância obtida está dentro do range da apresentada em outras áreas de Cerrado, Vourlitis *et al.* (2001) determinaram inclinações no range de 0,88 a 0,93 em uma área de cerradão, Santos (1999) e Silva (1999) apresentam valores de 0,87 e 0,93, respectivamente, para campo sujo e Miranda *et al.* (1997) determinaram 0,88 para cerrado

sensu stricto durante a estação seca e 0,80 para a chuvosa. Para florestas boreais Jarvis *et al.* (1997) e Baldocchi *et al.* (1997) obtiveram valores muito próximos a 1. Baldocchi *et al.* (1997) afirma que os erros resultantes para o não fechamento do balanço de energia são maiores quando R_n ultrapassa 50 W m^{-2} , situação frequente no Cerrado.

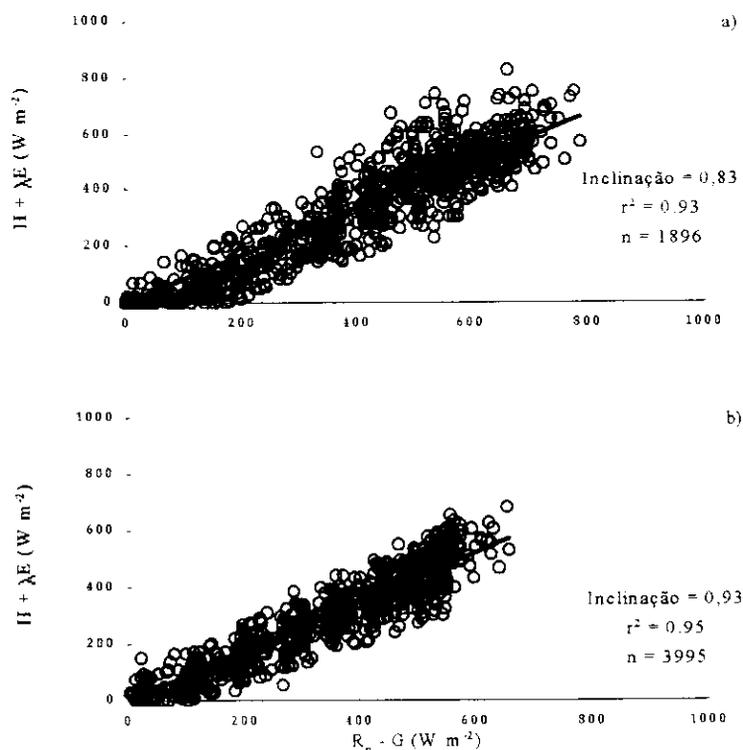


Figura 16. Fechamento do balanço de energia para área de cerrado *sensu stricto* alterada (a) e em área conservada (b) no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas.

3.4 Balanço de Carbono

Curvas médias diárias para os fluxos de carbono medidos sobre o dossel da área protegida contra a ação do fogo por mais de 20 anos são apresentados na Figura 17. Os fluxos negativos representam o saldo de CO₂ absorvido pela vegetação e o positivo o emitido. A área entre as curvas e a linha que marca o valor de fluxo zero representa a quantidade líquida de CO₂ emitida ou absorvida pela vegetação no decorrer do tempo. Pode-se observar que no período de maio a junho a vegetação se comporta como um sumidouro de carbono com os valores máximos ocorrendo por volta de 12:00 horas e sendo da ordem de $-9,5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em maio e $-8,4 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em junho. No mesmo período, os valores máximos da respiração foram cerca de $3,2 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Com o progresso da estação seca, há uma acentuada diminuição nos valores máximos diários de absorção de CO₂, sendo da ordem de $-5,0 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em julho e agosto. Com o início das chuvas os valores máximos tornam-se mais negativos, $-7,0 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em setembro e $-15,5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em novembro, indicando a recuperação da capacidade fotossintética da vegetação.

O mesmo padrão pode ser observado para os fluxos medidos na área alterada, porém inferiores aos determinados para a área protegida. Em junho e julho, considerados como período de transição, o valor máximo do fluxo foi de $-5,5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ e de $-4,3 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Em agosto, auge da seca o valor máximo foi de $-2,0 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Com a chegada do período das chuvas os fluxos aumentam, sendo de $-3,4 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em setembro e $-6,8 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ em outubro (Figura 18).

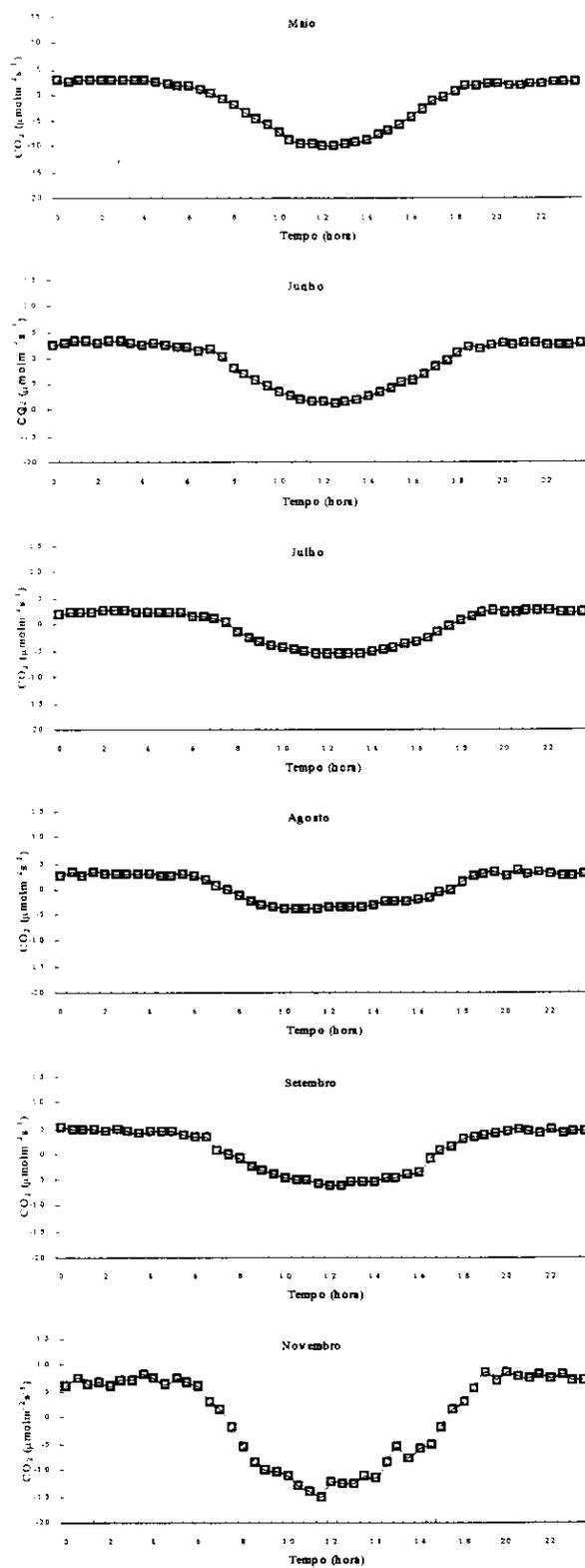


Figura 17. Fluxo médio de carbono para uma área de cerrado *sensu stricto* conservada no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF.

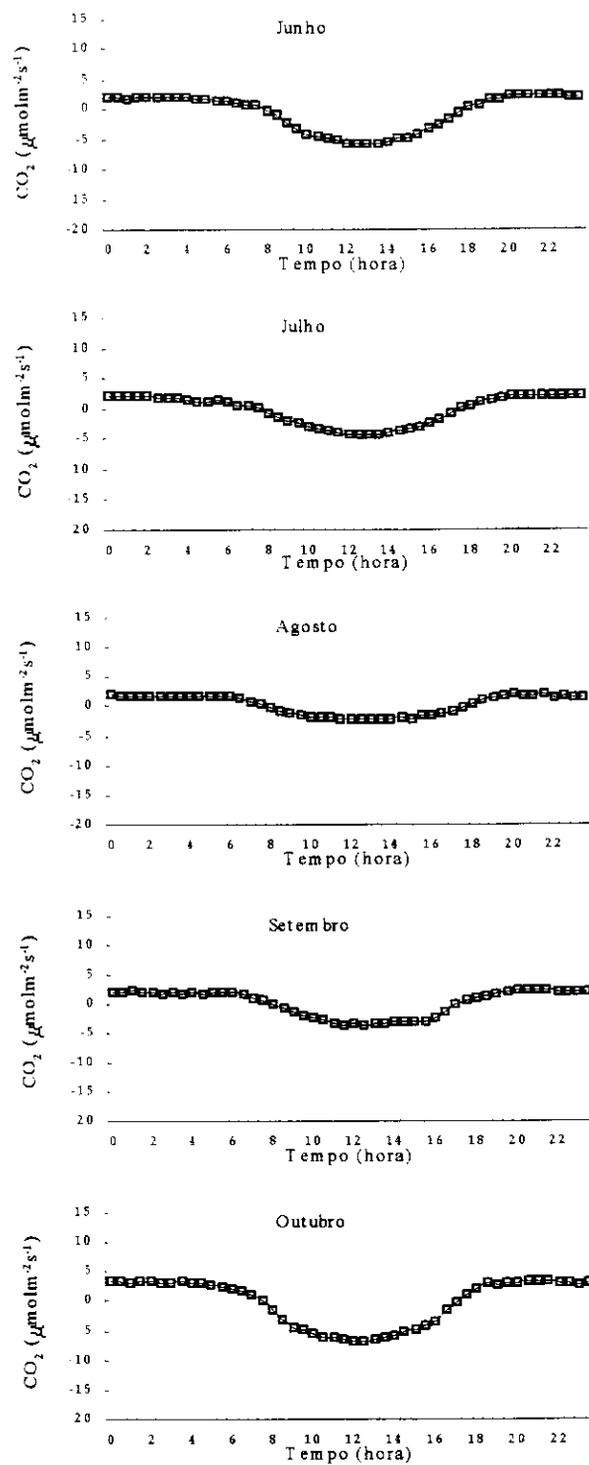


Figura 18. Fluxo médio de carbono para uma área de cerrado *sensu stricto* alterada no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF.

Os fluxos máximos medidos na área de cerrado durante os meses da estação chuvosa foram similares aos apresentados por Miranda *et al.* (1997) para cerrado *sensu stricto* durante o período chuvoso ($-12 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) e inferiores aos apresentados por Vourlitis *et al.* (2001) para cerradão ($-20 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Durante o período da seca, os valores estão dentro da faixa de -6 a $-5 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ apresentado por Monteiro (1995) para cerrado *sensu stricto* e são similares aos apresentados por Vourlitis *et al.* (2001) para cerradão ($-8,0 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Para a área alterada, os valores máximos dos fluxos determinados, tanto para os meses da estação chuvosa quanto os da estação seca, são inferiores aos apresentados na literatura para cerrado *sensu stricto* e para cerradão, estando mais próximos aos apresentados por Silva (1999) e Santos (1999) para áreas de campo sujo ($-2,5$ a $-5,0 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) no mesmo período de amostragem.

Quando comparados a outros ecossistemas os fluxos máximos determinados foram similares aos apresentados por Le Roux & Mordelet (1995) para savana úmida africana (-12 a $-15 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) e florestas temperadas ($-15 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; Hollinger *et al.* 1994; Wofsy *et al.* 1993), sendo inferiores aos apresentados para floresta tropical (Grace *et al.* 1996) e superiores aos de floresta boreal ($-6 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; Jarvis *et al.* 1997).

A alteração no acúmulo de carbono, com o avançar da estação seca para as duas áreas de estudo, é apresentado na Figura 19. Com o secamento das gramíneas, principal componente do estrato herbáceo e renovação das folhas dos estratos arbóreo-arbustivo, a respiração passa a representar proporções cada vez maiores em relação ao fluxo total de carbono. Assim, durante a estação seca e início da estação chuvosa, as duas áreas passam a se comportar como fontes de carbono para a atmosfera. Padrão similar ao apresentado para campo sujo (Santos 1999; Silva 1999) e cerrado *sensu stricto* (Miranda *et al.* 1997;

Monteiro 1995). Embora uma acentuada redução no fluxo líquido de carbono tenha sido reportada por Vourlitis *et al.* (2001) para cerradão, os autores não registraram a inversão para fonte de carbono para essa forma fisionômica de Cerrado.

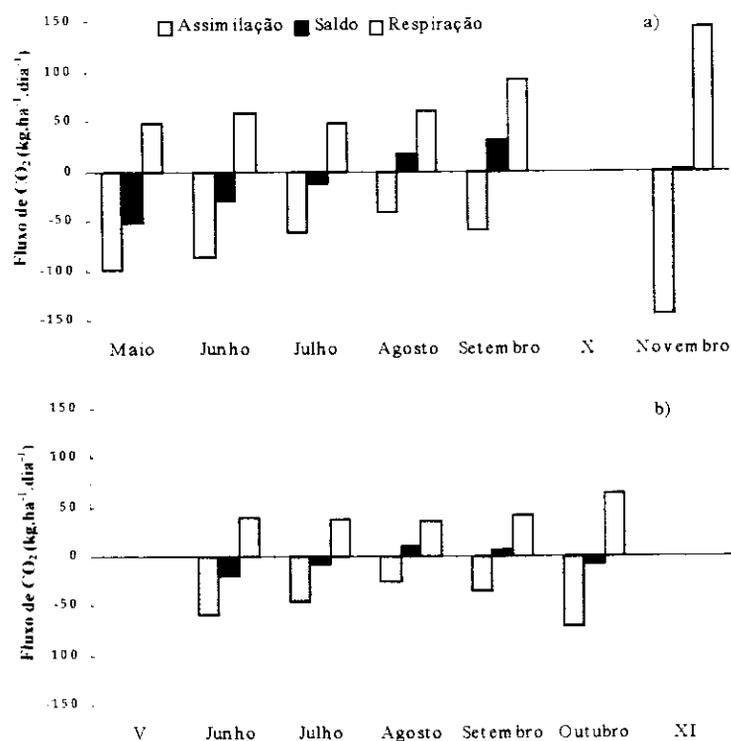


Figura 19. Médias mensais dos valores diários, integrados para 1 ha, dos fluxos de carbono distribuídos entre as proporções assimiladas, respiradas e o fluxo líquido em área conservada (a) e alterada (b) durante o período de maio a novembro de 2000 na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF. (Os meses em numerais romanos não foram determinados)

A assimilação líquida de carbono para as duas áreas de estudo é apresentada na Figura 20. Pode-se observar que embora as duas áreas apresentem períodos em que se comportam como sumidouro de carbono da atmosfera, e períodos em que se comportam como fonte de carbono para a atmosfera, a intensidade dos fluxos e a duração desses períodos é bastante diferente. A área protegida é fonte de carbono de agosto a novembro.

Monteiro (1995) determinou em 1994, para a mesma área em que foi realizado este estudo, a liberação de $0,6 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ durante o mês de outubro. Considerando esse valor para o mês de outubro, foram liberadas cerca de $2,0 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (ou $0,6 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$) no período de agosto a novembro de 2000. Se considerarmos que nos meses mais úmidos a vegetação absorve carbono na mesma taxa determinada para o mês de maio ($-1,6 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mês}^{-1}$), a área fixaria cerca de $2,6 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ou $9,4 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Valor semelhante ao determinado por Miranda *et al.* (1997) e Monteiro (1995) para cerrado *sensu stricto*.

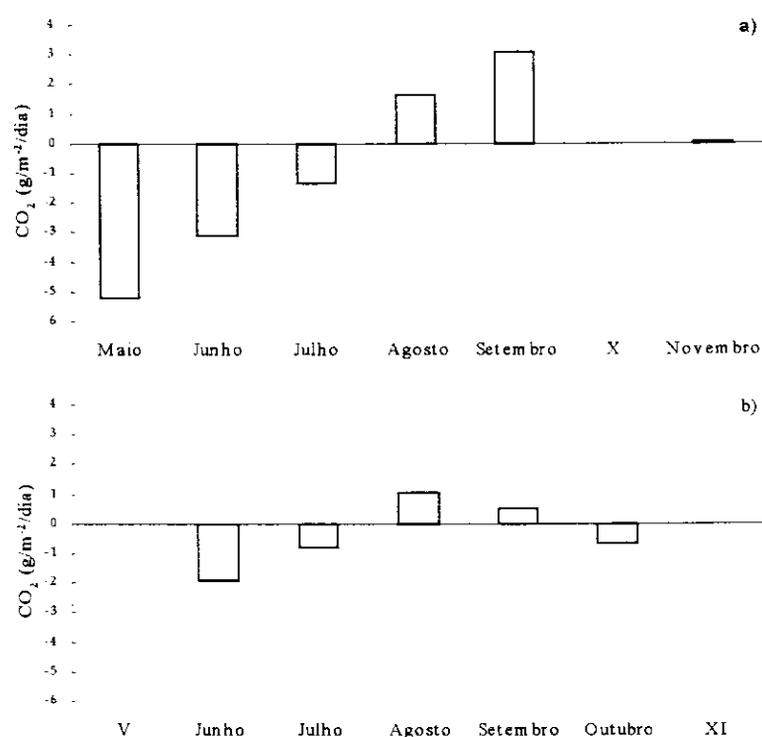


Figura 20. Saldo de CO_2 para área de cerrado *sensu stricto* conservada (a) e alterada (b), no período de maio a novembro de 2000, na Reserva Ecológica de Águas Emendadas, DF. (O mês em numeral romano não foi determinado)

A área alterada comportou-se como fonte de carbono para a atmosfera apenas em agosto e setembro, liberando um total de $0,5 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mês}^{-1}$ (ou $0,1 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mês}^{-1}$), retornando a se comportar como sumidouro em outubro fixando $0,2 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Uma vez

que para essa área não foram determinados valores de fluxo de carbono durante a estação chuvosa, se utilizarmos o valor de $0,4 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ determinado por Miranda *et al.* (1996) como o valor médio na estação chuvosa em cerrado *sensu stricto* protegido de queima por cerca de 14 anos, para os meses da estação chuvosa, a área alterada acumulou cerca de $1,4 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ou $4,6 \text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Metade do acumulado na área protegida no mesmo período.

A diferença no padrão e na magnitude dos fluxos pode estar associada a diferenças na estrutura (Figuras 7 e 8) e composição de espécies (Tabelas 1 e 2) da vegetação do estrato arbóreo-arbustivo das duas áreas. A área protegida apresenta uma densidade maior de indivíduos e uma estratificação vertical mais acentuada, o que pode favorecer microclima diferenciado para os estratos, resultando em taxas menores de assimilação. De fato, o ponto de compensação para radiação solar é de cerca de $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para a área alterada e $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para a conservada. Além disso, a área protegida apresenta também um número maior de espécies (67 espécies na área protegida e 43 na área alterada), cujas fases fenológicas podem estar influenciando o funcionamento do ecossistema como fonte de carbono no período de agosto a novembro, uma vez que grande parte da vegetação do Cerrado renova suas folhas durante a estação seca (Bucci 1997; Pinto 1999). Já a área alterada, por apresentar densidade menor de lenhosas, pode estar refletindo principalmente o funcionamento da vegetação do estrato herbáceo, especialmente as gramíneas que lançam novas folhas com o início da estação chuvosa (Batmanian 1983; Andrade 1998; Neto *et al.* 1998).

4. CONCLUSÕES

A hipótese inicial: um cerrado *sensu stricto* submetido à queima periódica, ao tornar-se protegido do fogo, acumulará mais carbono por ano do que outro semelhante, porém, protegido do fogo por um período mais longo de tempo, não foi confirmada. A área conservada transpirou por dia em média 3000 litros de água por hectare a mais do que a área alterada, dado este confirmado por uma maior taxa de resistência do dossel (também chamada de resistência estomática ou resistência de superfície), menor na área conservada ao longo de todo o período de estudo. Os padrões das medidas máximas do fluxo de CO₂, também, mostram a área conservada com valores sempre superiores aos da área alterada. As duas áreas apresentaram-se em certos períodos como sumidouro e fonte de carbono atmosférico em padrões e magnitudes diferenciadas que podem estar refletindo suas distinções na estrutura e composição das espécies.

O tempo de resposta de um cerrado à ação do fogo só poderá ser determinado em estudos de longo prazo. Assim como, os padrões sazonais e interanuais dos fluxos de CO₂ e vapor de água imprescindíveis ao refinamento de modelos de amplo espectro regional e temporal não podem prescindir de dados obtidos no campo ao longo de um dilatado período de tempo. Para isto o método da covariância dos vórtices turbulentos, apesar de suas limitações e de necessitar elevada especialização técnica, é um instrumento de escolha no estudo de fluxos de energia x água e CO₂, cada dia mais importantes e próximos ao palco político.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdala, G.C.; Caldas, L.S.; Haridasan, M. & Eiten, G. 1998. Above and belowground organic matter and root:soil ratio in a cerrado in Central Brazil. *Brazilian Journal of Ecology* 2:11-23.
- Alho, C.J.R. & Martins, E.(eds.) 1995. *Bit by bit the Cerrado loses space*. WWF, Brasília, Brazil. 66p.
- Andrade, S.M.A. 1998. *Dinâmica do combustível fino e produção primária do estrato rasteiro de áreas de campo sujo de cerrado submetidas a diferentes regimes de queima*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- André, R.G.B. & Viswanadham, Y. 1983. Distribuição de energia em uma cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1:29-37.
- Aubinet, M.; Grelle, A.; Ibrom, A.; Rannik, U.; Moncrieff, J. & Foken, T. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances on Ecological Research* 30: 113-175.
- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B. & Meyers, T.P. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* 69:1331-1340.
- Baldocchi, D.D. & Wilson, K.B. 2001. Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. *Ecological Modeling* 142: 155-184.
- Baldocchi, D.D. 1997. Measuring and modeling carbon dioxide and water vapor exchange over a temperate broad-leave forest during the 1995 summer drought. *Plant, Cell and Environment* 20: 1108-1122.

- Batmanian, G.J. 1983. *Efeitos do fogo na produção primária e na acumulação de nutrientes no estrato rasteiro de um cerrado*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Bucci, F.F.B. 1997. *Floração de algumas espécies de Melastomataceae do Distrito Federal: uso de dados de herbário para obter padrões sazonais*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília. 50p.
- Campbell, G.S. & Norman, J.M. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd ed. New York: Springer, 286p.
- Cardinot, G.K. 1998. *Efeitos de diferentes regimes de queima nos padrões de rebrotamento de Kielmeyera coriacea Mart. e Roupala montana Aubl., duas espécies típicas do cerrado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- CEPA/DF 1984. *Características hidroclimáticas do Distrito Federal*. Secretaria de Agricultura do DF. GDF. 41p.
- Condé, R.C.C. & Pedrosa, S.A. 1993. *Estação Ecológica de Águas Emendadas e Regiões Limitrofes*. Monografia de Curso de Especialização em Sensoriamento Remoto Aplicado a Análise Ambiental. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Condé, R.C.S. 1995. *Fluxos de vapor d'água em um cerrado sensu stricto do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 37p.
- Coutinho, L. M. 1990. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: J. G. Goldammer (ed.). *Fire in the tropical biota*. Ecological Studies v. 8. Springer-Verlag, Berlin. p.82-105.

- Dyer, A.J., Hicks, B.B. & King, K.M. 1967. The fluxatron, a revised approach to the measurement of eddy fluxes in the lower atmosphere. *Journal of Applied Meteorology* 6: 408-413.
- Eiten, G. 1972. The cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review* 38(2): 201-341.
- Eiten, G. 1984. Vegetação de Brasília. *Phytocoenologia* 12: 271-292.
- Eiten, G. 1994. Vegetação. In: M. N. Pinto (ed.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Editora da Universidade de Brasília, Brasília. p.17-73.
- Eiten, G. 2001. *Vegetação Natural do Distrito Federal*. Brasília: SEBRAE/Editora Universidade de Brasília, 162p.
- EMBRAPA 1978. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal*. Rio de Janeiro. 451p.
- Field, C.B., Behrenfeld, J., Randerson, J.T. & Falkowsky, P. 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281:237-240.
- Ford, K.W. 1972. *Classical and Modern Physics*. Vol. I. Lexington: Xerox, 577p.
- Goodland, R. & Ferri, M.G. 1979. *Ecologia do Cerrado*. São Paulo: Editora Itatiaia/EDUSP, 193p.
- Grace, J. 1983. *Plant-atmosphere relationships*. Chapman and Hall, London. 91p.
- Grace, J., Malhi, Y, Lloyd, J, McIntyre, J., Miranda, A.C., Meir, P. & Miranda, H.S. 1996. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of a Brazilian rain forest. *Global Change Biology* 2:209-217.
- Graedel, T.E. & Crutzen, P.J. 1993. *Atmospheric change: an Earth perspective*. New York: Freeman, 446p.

- Grant, R.F. & Nalder, I.A. 2000. Climate change effects on net carbon exchange of a boreal aspen-hazelnut forest: estimates from the ecosystem model *ecosys*. *Global Change Biology* 6: 183-200.
- Hollinger, D.Y.; Kelliher, F.M.; Byers, J.N.; Hunt, J.E.; McSeveny, T.M. & Weir, P.L. 1994. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology* 75(1): 134-150.
- Horie, T. & Luchiari Jr., A. 1988. Uso do método do balanço de energia para determinar a evapotranspiração da soja no cerrado. In: *Anais do Simpósio sobre o cerrado: savanas - alimento e energia*. EMBRAPA/CPAC. p.211-226.
- Hueck, K. 1972. *As florestas da América do Sul*. Brasília: Editora Universidade de Brasília/Editora Polígono.
- Jarvis, P.G. 1995. Scaling processes and problems. *Plant and Cell Environment* 18:1079-1089.
- Jarvis, P.G. & Dewar, R.C. 1993. Forests in the carbon balance: from stand to region. In: J.R. Ehleringer & C.B. Field (eds). *Scaling physiological processes - Leaf to globe*. Academic Press, San Diego. p.191-208.
- Jarvis, P.G.; James, G.B. & Landsberg, J.J. 1976. Coniferous forest. In: J. L. Monteith (ed.). *Vegetation and the atmosphere*. Academic Press, London. p.171-240.
- Jarvis, P.G.; Massheder, J.M.; Hale, S.E.; Moncrieff, J.B.; Rayment, M. & Scott, S.L. 1997. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24): 28953-28966.
- Jones, H. G. 1992. *Plants and Microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press, Cambridge. 418p.

- Landsberg, J. 1977. Some useful equations for biological studies. *Experimental Agriculture* 13: 273-286.
- Le Roux, X. & Mordelet, P. 1995 Leaf and canopy assimilation in a West African humid savanna during the early growing season. *Journal of Tropical Ecology* 11: 1-17.
- Leuning, R.; Kelliher, F.M.; dePury, D. & Sculze, E.D. 1995. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: scaling from leaves to canopies. *Plant and Cell Environment* 18: 1183-1200.
- Lloyd, J. 1999. Current perspectives on the terrestrial carbon cycle. *Tellus* 51B: 336-342.
- Luke, R. H. & McArthur, A. G. 1978. *Bushfires in Australia*. Australian Government Publishing Service, Canberra. 357p.
- Lüttge, U. 1997. *Physiological Ecology of Tropical Plants*. Springer-Verlag, Berlin. 384p.
- Maitelli, G.T. & Miranda, A.C. 1991. Evapotranspiração e fluxos de energia no Cerrado-estação chuvosa. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 63: 265-272.
- Malhi, Y.; Baldocchi, D.D. & Jarvis, P.G. 1999. The carbon balance of Tropical, Temperate and Boreal Forests. *Plant and Cell Environment* 22: 715-740.
- Miranda, A.C. & Miranda, H.S. 1992. Estresse hídrico. In: *Alternativas de Desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis*. B.F.S. Dias (org.). FUNATURA/IBAMA, Brasília, p.30-34.
- Miranda, A.C. & Santos, A.A.M. 1997. Características aerodinâmicas de um cerrado sensu stricto In: L.L. Leite & C.H. Saito. *Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado*. Depto de Ecologia - UnB, Brasília. p.3-5.
- Miranda, A.C., Miranda, H.S., Lloyd, J., Grace, J.A., Francey, R.J., McIntyre, J.A., 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.
- Miranda, A.C., Miranda, H.S., Lloyd, J., Grace, J.A., McIntyre, J.A., Meir, P., Riggan, P., Lockwood, R. & Brass, J. 1996. Carbon dioxide fluxes over a cerrado *sensu stricto* in Central Brazil. In: J. H. C. Gash *et al.* (eds.). *Amazonian Deforestation and Climate*. John Wiley & Sons, New York. p.353-363.
- Moncrieff, J.B., Valentini, R., Greco, S, Seufert, G. & Ciccioli, P. 1997a. Trace gas exchange over terrestrial ecosystems: methods and perspectives in micrometeorology. *Journal of Experimental Botany*, 48:1133-1142.
- Moncrieff, J.B., Massheder, J.M., Bruin, H. de, Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H & Verhoef, A. 1997b. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. *Journal of Hydrology* 188-189:589-611.
- Monteiro, J. M. G. 1995. *Fluxos de CO₂ em um cerrado sensu stricto*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 61p.
- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London. 91p.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*. 19: 205-234.
- Nardoto, G.B. 2000. *Efeito de queimadas na mineralização de nitrogênio e em processos de ciclagem de nutrientes em uma área de cerrado sensu stricto*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

- Nascimento, N.M.P. 1992. Intercepção de Chuva pela Vegetação do Cerrado. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília.
- Neto, W.N.; Andrade, S. M. A. & Miranda, H.S. 1998. The dynamics of the herbaceous layer following prescribed burning: a four year study in the Brazilian savanna. In: D. X. Viegas, (ed.), *Proceedings of the 14th Conference on Fire and Forest Meteorology* 2:1785-1792. Coimbra, Portugal: University of Coimbra.
- Ottmar, R.; Vihnanek, R. E.; Miranda, H. S.; Sato, M. N. & Andrade, S. M. A. 2001. Stereo photo series for quantifying Cerrado fuels in Central Brazil - Volume I. *Gen. Tech. Rep.* PNW-GTR-519. Portland, USA. 87p.
- Penman, H.L. 1953. The physical basis for irrigation control. Report of 13th International Horticultural Congress, 2, p. 913-914.
- Pieri, P. & Fuchs, M. 1990. Comparison of Bowen ratio and aerodynamic estimates of evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 49:243-256.
- Pinto, A.S. 1999. *A relação entre a fenologia de espécies lenhosas e a disponibilidade hídrica em um cerrado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Raven, P.H.; Evert, R.Y. & Eichhorn, S.E. 1986. *Biology of Plants* 4th ed. New York: Worth Publishers, 775p.
- Rizzini, C.T. 1979. *Tratado de fitogeografia do Brasil* 2^o vol. São Paulo: HUCITEC/EDUSP, 374p.
- Ruimy, A., Jarvis, P.G., Baldocchi, D.D. & Saugier, B. 1995. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: a review. In: M. Begon & A.H. Fitter, (eds). *Advances in Ecological Research*. 26:1-68. Academic Press, London.

- Santos, A.A.M. 1995. *Características aerodinâmicas de uma vegetação de cerrado sensu stricto na estação chuvosa*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 68p.
- Santos, A.J.B. 1999. *Fluxos de energia, carbono e água em vegetação de campo sujo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 53p
- Santos, J.R. 1988. *Biomassa aérea da vegetação do cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor "thematic mapper" do satélite Landsat*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the global carbon cycle. *Global Change Biology* 1: 77-91.
- Scholes, R.J. & Archer, S.R. 1997. Tree-grass interactions in savannas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 28: 517-544.
- Schuepp, P. H., Leclerc, M. Y., MacPherson, J. I. & Desjardins, R. L. 1990. Footprint prediction from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary Layer Meteorology* 50: 355-373.
- Silva, F. C. 1990. *Compartilhamento de nutrientes em diferentes componentes da biomassa aérea em espécies arbóreas de um cerrado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Silva, G. T. 1999. *Fluxos de CO₂ em um campo sujo submetido à queimada prescrita*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 64p
- Sims, P.L. & Bradford, J.A. 2001. Carbon dioxide fluxes in southern plains prairie. *Agriculture and Forest Agriculture* 109: 117-134.

- Souza, A.J.B. 1999. Fluxos de Energia, Carbono e Água em Vegetação de Campo Sujo. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- Stull, R.B. 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 666p.
- Tans, P.P.; Fung, I.Y. & Takahashi, T. 1990. Observational constrains on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247: 1431-1438.
- Uchijima, Z. 1976. Maize and rice. In: *vegetation and atmosphere*. J. L. Monteith (ed.), Academic Press, London.
- Valentini, R.; Gamon, J. & Field, C.B. 1995. Ecosystem gas exchange in a California grassland: seasonal patterns and implications for Scaling. *Ecology* 76(6): 1940-1952.
- Vicentini, K.R.C. 1992. Análise palinológica de uma vereda em Cromínia-GO. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- Vicentini, K.R.C. 1999. História do fogo no cerrado: uma análise palinológica. *Tese de Doutorado*. 208p., Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- Vourlitis, G. L.; Priante Filho, N.; Hayashi, M. M. S.; Nogueira, J. de 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* 15:388-395.
- Wofsy, S.C.; Goulden, M.L.; Munger, J.W.; Fan, S.M.; Bakwin, P.S.; Daube, B.C.; Bassow, S.L. & Bazzaz, F.A. 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science* 260:1314-1317.
- World Energy Council. 1996. Anthropogenic carbon emission. *Nature* 390: 215.