

ROXANA BARBA AGUILAR

PERFIL VERTICAL DE CO<sub>2</sub> E SEU FLUXO DO SOLO EM MATA  
NATIVA, FLORESTA DE ARAUCÁRIA, SERINGAL E PASTAGEM

Tese apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Fitotecnia, para obtenção  
do título de “*Magister Scientiae*”.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS-BRASIL  
2001

ROXANA BARBA AGUILAR

PERFIL VERTICAL DE CO<sub>2</sub> E SEU FLUXO NO SOLO EM MATA  
NATIVA, FLORESTA DE ARAUCÁRIA, SERINGAL E PASTAGEM

Tese apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Fitotecnia, para obtenção  
do título de “*Magister Scientiae*”.

Aprovada: 21 de maio de 2001

---

Prof. Marcos Heil Costa  
(Conselheiro)

---

Prof. Júlio César Lima Neves  
(Conselheiro)

---

Prof. Antônio Teixeira de Matos

---

Prof. Moacil Alves de Souza

---

Prof. Liovando Marciano da Costa  
(Orientador)

A Deus, por iluminar meu caminho e não me desamparar nunca.  
À minha mãe Marina, pelo amor, apoio e incentivo que  
me fazem sentir segura mesmo estando distante.

## **AGRADECIMENTOS**

A universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

Ao governo britânico, pelo suporte financeiro, ao International Research Development, por todas as facilidades outorgadas.

Ao Centro de Investigación Agrícola Tropical, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao professor Liovando Marciano da Costa, pelo ensinamento, orientação, estímulo e, acima de tudo, pela amizade e pelo respeito com que sempre me considerou.

Aos professores Marcos Heil Costa e Júlio César Lima Neves, pela disponibilidade, pelas sugestões e pela amizade com que me distinguiram.

Aos professores Antônio Texeira Matos e Moacil Souza Alves, pelas críticas e sugestões, durante a defesa de tese.

Ao Ing. David Ruiz Alderete, coordenador do Projeto Rhizobiología, na Bolívia, pelo crédito e, pelo constante incentivo para a realização do curso.

Aos professores do Departamento de Fitotecnia e Solos, pelos ensinamentos e pelo apoio prestado durante o curso.

Ao professor Mario Puiatti, pela amizade e pela solidariedade nos momentos difíceis.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia Cássia, Marise, Caetano, Luisinho, Mara, Vicente, Itamar, Assis e Domingos, pela amizade e pelo auxílio no momento necessário.

Ao técnico de laboratório Carlos Henriques, por sua preciosa ajuda na condução das análises laboratoriais.

A meu colega de trabalho, Cláudio da Silva, pelo esforço e responsabilidade assumida durante o afastamento de minhas obrigações.

A Lucia Ramirez, minha amiga de maior convivência, pela troca de experiência e pelos bons momentos divididos, fazendo agradável minha vida em Viçosa.

A minhas amigas Gisele Barata da Silva e Eliane Regina, pelo estímulo, carinho e pela amizade.

À Patrícia Luis, pela disponibilidade incondicional em todo momento e sua inestimável amizade e, pela grande ajuda prestada para a realização deste trabalho.

Aos colegas, Adriana Chagas, Paula e Ramon, Rodrigo e Liliana, Luciana, Betty, pela convivência, amizade e pelo apoio.

À dona Dorly que me acolheu em sua família e me fez sentir como se fosse a minha, demonstrando a boa vontade e solidariedade do povo brasileiro.

Às várias outras pessoas que, de alguma forma e nas mínimas coisas, fizeram-se presentes.

## **BIOGRAFIA**

ROXANA BARBA AGUILAR, filha de Marina Aguilar Saucedo e Rosauro Barba Yovió, nasceu em 13 de setembro de 1968, na cidade de Santa Cruz, departamento de Santa Cruz de la Sierra, Bolívia.

Em agosto de 1992, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Gabriel René Moreno, em Santa Cruz de la Sierra, Bolívia.

Desde dezembro de 1992 trabalha no Centro de Investigação Agrícola Tropical (CIAT), desempenhando funções de pesquisadora no Projeto Rhizobiologia.

Em abril de 1999, iniciou o curso de Mestrado em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa, MG, concentrando seus estudos na área de Manejo e Conservação do Solo e da Água, submetendo-se à defesa de tese em 21 de maio de 2001.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Dinâmica do CO <sub>2</sub> na atmosfera.....	4
2.2. Perfil vertical do CO <sub>2</sub> atmosférico na vegetação.....	6
2.3. Variáveis ambientais que influenciam nos valores do CO <sub>2</sub> atmosférico em áreas vegetadas.....	9
2.4. Fluxo de CO <sub>2</sub> liberado do solo.....	13
2.5. Fatores que influenciam os fluxos de CO <sub>2</sub> liberado pelo solo.....	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1. Áreas estudadas.....	18

3.2. Coletas de amostras de solo.....	19
3.3. Medições das variáveis meteorológicas.....	21
	<b>Página</b>
3.4. Instalação do experimento.....	21
3.4.1. Perfil das taxas de CO <sub>2</sub> na atmosfera da vegetação.....	21
3.4.2. Fluxo de CO <sub>2</sub> do solo.....	23
3.4.3. Estudo da manta orgânica.....	24
3.5. Análises estatísticas.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1. Perfil vertical das taxas de CO <sub>2</sub> da atmosfera de áreas com diferentes coberturas vegetais.....	25
4.2. Variação das taxas médias de CO <sub>2</sub> da atmosfera em função do em áreas com diferentes coberturas vegetais.....	36
4.3. Influência das coberturas vegetais no fluxo de CO <sub>2</sub> do solo .....	40
4.4. Manta orgânica.....	46
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE.....	58

## LISTA DE QUADROS

	<b>Página</b>
1 - Caracterização física e química do solo sob diferentes coberturas vegetais .....	20
2 - Taxas médias CO <sub>2</sub> (mg d <sup>-1</sup> ) e desvio padrão (s.d.) em cada altura (cm) a partir da superfície do solo, nas diferentes coberturas vegetais. Em cada mês, as taxas de CO <sub>2</sub> nas diferentes alturas foram determinadas a partir das médias de treze avaliações (31 dias acumulados).....	26
3 - Média dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo (g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) e desvio padrão (s.d.) nos tratamentos de solo com manta orgânica (CMO) e solo sem manta orgânica (SMO), para as quatro coberturas vegetais. Em cada mês, os fluxos de CO <sub>2</sub> foram calculados a partir de treze avaliações (31 dias acumulados).....	41
4 - Quantidade de manta orgânica e nutrientes devolvidos ao solo pelas quatro coberturas vegetais.....	47

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
1 - Taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera na mata nativa, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.....	29
2 - Taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera na floresta de araucária, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.....	29
3 - Taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera na área plantada com seringueira, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.....	30
4 - Taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera na pastagem, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.....	30
5 - Valores de temperatura (a), precipitação pluvial (b) e velocidade do vento (c) no período de outubro de 2000 a janeiro de 2001. Avaliação: 1 a 13 - outubro; 14 a 26 - novembro; 27 a 39 - dezembro e 40 a 52 - janeiro.....	31
6 - Valores de umidade relativa (a), evaporação (b) e insolação (c) no período de outubro de 2000 a janeiro de 2001. Avaliação: 1 a 13 - outubro; 14 a 26 - novembro; 27 a 39 - dezembro e 40 a 52 - janeiro.....	32

7 - Perfil da taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais no mês de outubro de 2000.....	34
8 - Perfil da taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais no mês de novembro de 2000.....	35
	<b>Página</b>
9 - Perfil da taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais no mês de dezembro de 2000.....	35
10 - Perfil da taxa média de CO <sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais no mês de janeiro de 2001.....	36
11 - Variação das taxas de CO <sub>2</sub> da atmosfera de áreas com diferentes coberturas vegetais em função do tempo. As barras indicam o intervalo de confiança a 5%, medição em 9 alturas com 3 repetições.....	37
12 - Fluxo de CO <sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a mata nativa.....	43
13 - Fluxo de CO <sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a floresta de araucária.....	43
14 - Fluxo de CO <sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a floresta com seringueira.....	44
15 - Fluxo de CO <sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a área de pastagem.....	44

## RESUMO

BARBA AGUILAR, Roxana, M. S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2001. **Perfil vertical de CO<sub>2</sub> e seu fluxo do solo em mata nativa, floresta de araucária, seringal e pastagem.** Professor Orientador: Liovando Marciano da Costa. Professores conselheiros: Júlio César Lima Neves e Marcos Heil Costa.

Em uma vegetação natural coexistem plantas de diferentes alturas e com variada densidade de folhagem. Esta situação leva ao desenvolvimento de um micro-clima, onde a interceptação e distribuição da radiação solar, velocidade do vento e concentração de CO<sub>2</sub> podem ser alteradas. Essa é a principal razão para determinar a concentração deste gás na atmosfera de uma área vegetada e, com isso, poder identificar suas possíveis fontes e drenos. Este trabalho, realizado

em uma mata nativa, duas florestas plantadas, uma com araucária e a outra com seringueira e uma de pastagem, teve como objetivo determinar o perfil vertical dos valores de CO<sub>2</sub>, quantificar as mudanças desse perfil no tempo, comparar as mudanças dos perfis dentro e entre os ecossistemas e quantificar os fluxos de CO<sub>2</sub> proveniente do solo dos mesmos locais. Com os dados coletados nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2000 e janeiro de 2001 determinou-se a forma dos perfis dos valores de CO<sub>2</sub> nas quatro coberturas e avaliaram-se as variações temporais desse valores. A biomassa da serapilheira bem como seus teores de macro e micronutrientes foram também avaliados. Os resultados mostraram que nas quatro coberturas vegetais, os menores valores médios de CO<sub>2</sub> (mg d<sup>-1</sup>) foram registrados no mês de novembro e os maiores em janeiro. Independente do tipo de cobertura vegetal, os perfis não mostraram uma tendência definida nos meses de outubro, dezembro e janeiro, provavelmente pelas condições climáticas adversas presentes em grande parte do período do experimento. Tais condições poderiam ter afetado a fisiologia das plantas, causando alta variabilidade no consumo de CO<sub>2</sub>, com as conseqüentes variações diárias e estacionais desses valores na atmosfera. Com relação ao fluxo de CO<sub>2</sub> proveniente da superfície do solo,

nos tratamentos com e sem manta orgânica na mata nativa, do CO<sub>2</sub> total produzido, 51,3% foram atribuídos à respiração microbiana e o restante 48,7% à respiração das raízes do solo. Na floresta com araucária estes valores correspondem a 50,4% e 49,6%, respectivamente. No seringal, para os fluxos totais de CO<sub>2</sub>, a decomposição da manta orgânica contribui com 51,7 % e as raízes do solo com 48,3%. Do total do CO<sub>2</sub> produzido, a respiração dos microrganismos no tratamento com manta orgânica na pastagem foi responsável por 49,8% e a respiração das raízes do solo por 50,2%. As variações nos fluxos de CO<sub>2</sub>, nas diferentes coberturas vegetais, estão relacionadas com a participação de fatores que adicionalmente podem contribuir para a existência de oscilações nesses fluxos, entre eles incluem-se: o conteúdo e grau de decomposição da matéria orgânica, a quantidade de biomassa de raízes finas, a diversidade de plantas dentro da vegetação e a população microbiana. Dentro das coberturas vegetais estudadas, os valores de CO<sub>2</sub> da atmosfera associada com respiração dos microrganismos do solo, expressam alterações em resposta aos fatores climáticos.

## ABSTRACT

BARBA AGUILAR, Roxana, M. S., Universidade Federal de Viçosa, May 2001. **Vertical profile of CO<sub>2</sub> and its flux from soil in native forest, araucaria pine forest, rubber-tree plantation and pasture.** Adviser - Liovando Marciano da Costa. Committee members: Júlio César Lima Neves and Marcos Heil Costa.

In natural vegetation, different-height plants coexist with a varied foliage density. This situation leads to the development of a microclimate, where the interception and distribution of the solar radiation, wind speed and CO<sub>2</sub> concentration may be changed. This is the main reason for determining the concentration of this gas in atmosphere of a vegetated area, so making possible to identify its possible sources and drains. This study was carried out in a native forest, two planted forests, one with araucaria pine and another with rubber tree,

and also a pasture. It was aimed to determining the vertical profile of the CO<sub>2</sub> values, to quantify the changes of this profile over time, to compare the changes of the profiles either inside and among ecosystems, as well as to quantify the CO<sub>2</sub> fluxes from soil in the same places. Using the data collected on October, November and December 2000 and January 2001, the form of the CO<sub>2</sub> value profiles were determined at the four vegetative covers and the time variations of these values were evaluated. The biomass as well as the macro- and micronutrients of the litter were also evaluated. The results showed that in those four vegetative covers, the lowest average values of CO<sub>2</sub> (mg d<sup>-1</sup>) were registered on November and the highest ones on January. Independently from vegetative cover, the profiles did not show any defined tendency on October, December and January, probably due to the occurrence of adverse climatic conditions over a great part of the experimental period. Such conditions could affect the plant physiology, as causing high variability in consumption of CO<sub>2</sub>, with the consequent daily and seasonal variations of those values in atmosphere. In relation to CO<sub>2</sub> flux from the surface of the soil, in the treatments with and without litter in the native forest, 51.3% from the total produced CO<sub>2</sub> were attributed to microbial breathing and the remaining 48.7% to soil root breathing. In araucaria pine forest, these values correspond to 50.4% and 49.6%, respectively. In the rubber tree plantation, for the total CO<sub>2</sub> fluxes, the decomposition of the litter contributes 51.7% and the soil roots 48.3%. In the treatment with litter on pasture, from the total produced CO<sub>2</sub> the microorganism breathing was responsible for 49.8% and the soil root breathing for 50.2%. The variations in CO<sub>2</sub> fluxes, at the different vegetative covers, are related to participation of the factors that can additionally contribute to the existence of oscillations in these fluxes, such as: the decomposition content and degree of the organic matter, the amount of biomass in thin roots, the diversity of plants inside vegetation and the microbial population. In the studied vegetative covers, the CO<sub>2</sub> values in the atmosphere associated with breathing of the soil microorganisms express changes as a result of the climatic factors.



## 1. INTRODUÇÃO

A nova condição da atmosfera provocada pelo incremento da concentração de CO<sub>2</sub>, devido às emissões antropogênicas (KICKERT e KRUPA, 1990) pode alterar as interações existentes entre as plantas e o ambiente, suas estruturas e funções, com potenciais implicações no crescimento e reprodução de determinadas espécies componentes de uma comunidade vegetal. Espera-se que apareçam alguns efeitos compensatórios pelo consumo deste gás, como o incremento da fotossíntese líquida e a diminuição da condutância estomática (EAMUS e JARVIS, 1989).

No meio de uma comunidade vegetal, as plantas, como membro natural dessa comunidade, interagem umas com as outras, dividindo o uso dos recursos como luz, água e nutrientes (REEKIE e BAZZAZ, 1992). Essas interações modificam as condições microclimáticas do local como umidade, temperatura e velocidade do vento (BAZZAZ e McCONNAUGHAY, 1992).

Em locais com vegetação densa, pode ocorrer resistência considerável no suprimento de CO<sub>2</sub> por parte da atmosfera para a superfície individual da folha. Portanto, em locais com

vegetação densa, é realmente necessário medir o subambiente da concentração de  $\text{CO}_2$  (REICOSKY, 1989). Essa concentração pode variar como resultado do incremento da resistência de difusão do  $\text{CO}_2$  à superfície da folha, do consumo diferenciado (fotossíntese) da folhagem (SKELLY et al., 1996) e da variação na contribuição de  $\text{CO}_2$  proveniente das atividades metabólicas das raízes e respiração microbiana. Essas variações devem-se ao fato de o solo ser um meio complexo, formado por agregados, partículas organominerais de diferentes tipos, contendo numerosos organismos que exibem processos fisiológicos diferenciados (DAVIDSON e TRUMBORE, 1995).

A variabilidade vertical da taxa de  $\text{CO}_2$ , dentro de uma vegetação, é, no entanto, influenciada por numerosos fatores abióticos, tais como intensidade de luz, disponibilidade de água e nutrientes e velocidade do vento, e por fatores bióticos como o índice de área foliar (LAI) e a idade da própria planta. A intensidade de luz estabelece o limite superior para a fotossíntese da planta, e o excesso ou escassez de água no solo afeta o estado hídrico da planta e, então, a condutância estomática (GOLDSTEIN et al., 2000) enquanto as eventuais ondas de turbulência (vento) no dossel das plantas podem ser um importante

mecanismo de escape do CO<sub>2</sub> acumulado dentro da floresta para o ar estratificado acima (ZENG e TAKAHASHI, 2000).

A área foliar da planta determina a quantidade de material disponível para a fotossíntese, transpiração e interceptação de luz pela planta (GOLDSTEIN et al., 2000). A fotossíntese aumenta com o incremento do LAI, até que a luz, água e nutrientes tornem-se limitantes (BUCHMANN e EHLERINGER, 1998).

Em culturas com elevado LAI, observam-se fortes efeitos fotossintéticos, manifestado na depleção da concentração de CO<sub>2</sub> dentro do ambiente da cultura (BALDOCCHI et al., 1981a, b). A maior ou menor capacidade para realizar fotossíntese é função da idade da própria planta (GOLDSTEIN et al., 2000).

Freqüentemente, a taxa de absorção de CO<sub>2</sub> pela fotossíntese durante o dia é da mesma magnitude que o CO<sub>2</sub> liberado pela respiração durante a noite (LEE et al., 1996), porém as mudanças nas condições microclimáticas dentro da vegetação podem alterar este equilíbrio. A medição de um perfil vertical das taxas de CO<sub>2</sub> pode fornecer as variações diárias e anuais na concentração deste gás, permitindo identificar as possíveis fontes e sumidouros do CO<sub>2</sub> atmosférico.

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de determinar a forma do perfil vertical das taxas de CO<sub>2</sub> atmosférico, em uma mata nativa, duas florestas plantadas, uma com araucária e a outra com seringueira, e uma área de pastagem, quantificar as mudanças neste perfil no tempo, comparar as mudanças dos perfis dentro e entre os ecossistemas, determinar se entre as alturas estudadas existem diferenças nas taxas de CO<sub>2</sub>, e quantificar os fluxos de CO<sub>2</sub> proveniente do solo dos diferentes ecossistemas estudados.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Dinâmica do CO<sub>2</sub> na atmosfera

O dióxido de carbono é um gás quimicamente pouco reativo no meio ambiente normal da atmosfera, possui vida relativamente longa e sua pressão parcial no ambiente declina com o incremento da altura, sendo o principal gás responsável pelo efeito estufa (KIRCHHOFF, 1992).

Desde o início da revolução industrial, houve um aumento gradual na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>, devido principalmente à queima de combustíveis fósseis utilizados na maioria dos processos industriais (TANS et al., 1990).

Estima-se que, entre 1850 e 1950, a quantidade total de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentou em 10,5% (de 285 para 315 ppm); nos 42 anos seguintes, a concentração aumentou para 350 ppm (TAYLOR e LLOYD, 1992). Espera-se

que este aumento seja progressivo, alcançando, na metade do século 21, uma concentração de 680 ppm (CURE e ACOCK, 1986).

A remoção e queima de florestas também contribuem para o aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Em razão deste desmatamento, emitem-se entre 0,5 e 2,5 Gt (bilhões de toneladas) de carbono ano<sup>-1</sup> (TANS et al., 1990).

Outra fonte, que adiciona CO<sub>2</sub> à atmosfera, procede da decomposição de compostos orgânicos, pois o carbono dos tecidos de vegetais e animais mortos é oxidado a CO<sub>2</sub>, e retorna à atmosfera (TAYLOR e LLOYD, 1992).

No hemisfério sul, a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> não é estável durante todo o ano, oscilando entre 348 ppm a 350 ppm (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, 1989, citado por POST et al., 1990). Também apresentam-se diferenças nas concentrações durante o dia e a noite, sendo maior nesta última.. Isto foi verificado por LEAL (2000), que fez a determinação da concentração de CO<sub>2</sub> no ar da região leste da floresta Amazônica. As altas concentrações ocorrem à noite com valores de 385 ppm às 19:00 h, aumentando para 447 ppm às 06:00 h.

Segundo TANS et al. (1990), o incremento das emissões antropogênicas deveria ter provocado aumento contínuo da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. No entanto, essa produção parece estar compensada pela fotossíntese, que absorve aproximadamente 3% da produção total anual de CO<sub>2</sub> do mundo.

O CO<sub>2</sub> é essencial para a fotossíntese e para o crescimento das plantas (CURE e ACOCK, 1986). Os organismos autotróficos, em sua grande maioria plantas verdes superiores, retiram o gás carbônico da atmosfera, e este reage com a água na presença de luz para formar carboidratos, liberando o oxigênio (POORTER et al., 1992).

O aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera pode acelerar a fotossíntese, esperando-se que, em determinadas condições, o aumento de CO<sub>2</sub> funcione como nutriente, com o qual as florestas poderiam crescer mais rapidamente (KIRCHHOFF, 1992).

Do total de energia que entra na planta, parte é utilizada na fotossíntese e parte na respiração. Neste último processo, para suprir-se de energia, a planta consome oxigênio atmosférico e queima parte de seus carboidratos, produzindo água e CO<sub>2</sub>, e libera este para a atmosfera por intermédio das folhas ou das raízes (POORTER et al., 1992).

Na respiração, ocorre um consumo de energia, que está ligado à produção de calor e liberação de gás carbônico. Em relação a este consumo, os valores variam entre 20 e 70% da assimilação, dependendo da espécie, do genótipo e das condições ambientais (AMTHOR, 1994). Plantas C<sub>3</sub> consomem, imediatamente, entre 20-50% do carbono fixado pela fotorrespiração, em contraste com as plantas C<sub>4</sub> que não apresentam este processo e, portanto, possuem taxas fotossintéticas líquidas mais altas.

## **2.2. Perfil vertical do CO<sub>2</sub> atmosférico na vegetação**

As concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico, medidas numa floresta de Pinus em quatro alturas (1, 8, 31 e 46 m), diminuíram nas primeiras horas do dia (7:30 a 10:00 h) de 425 para 350 ppm, respectivamente, conduzindo a um declínio no CO<sub>2</sub> armazenado à noite. Na cultura de trigo, PEARMAN e GARRATT (1973) registraram um comportamento similar, em que o perfil vertical da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico apresentou-se de forma linear (meio-dia) a ligeiramente côncavo na metade da tarde. As concentrações foram aproximadamente constantes desde 10:00 até 16:00 h, com valores que oscilaram entre 310 e 320 ppm, verificando-se maior retirada de CO<sub>2</sub> do ar atmosférico através do processo fotossintético. Durante essas horas, o vento foi suficiente para homogeneizar a concentração de CO<sub>2</sub> perto do solo e mantê-lo próximo à concentração atmosférica, enquanto, a concentração de CO<sub>2</sub> a 2 m de altura, em relação à superfície do solo, permaneceu quase constante.

Entre as alturas 5, 15 e 30 m, utilizadas por MARTINS (1981) para estudar o perfil vertical da concentração de CO<sub>2</sub>, não houve diferenças significativas, mostrando a existência de uma homogeneização do ar atmosférico

no interior da bacia modelo na floresta Amazônica. Os resultados seguiram uma tendência descendente do período da manhã, com 348 ppm, para à tarde, com 331 ppm. A magnitude do primeiro valor deve-se ao acúmulo de CO<sub>2</sub>, durante o período noturno, pela respiração das plantas e do solo, e o segundo valor diminuiu porque o CO<sub>2</sub> é consumido na fotossíntese durante o período diurno.

Os valores da concentração de CO<sub>2</sub> diurna, registrada por ALLEN (1971) na cultura do trigo, oscilaram entre 260 e 320 ppm. Em aveia, a concentração em cada altura (0,5; 1,0; 4,0; e 16,0 m) foi estável entre 10:00 h até aproximadamente 16:00 h. Ao meio-dia, o intervalo da concentração foi 320 e 328 ppm, a 16 m de altura, e entre 310 a 320 ppm a 0,5 m da superfície do solo. Pela manhã, a transição do perfil da condição de respiração para a fotossíntese ocorreu de forma brusca, nas primeiras alturas sobre o solo, embora, à noite, o retorno para o perfil de respiração tenha sido mais lento. A variação do perfil de um dia para outro foi influenciada pelas variáveis ambientais, como a intensidade de luz e a velocidade do vento (ROSENBERG e VERMA, 1976).

Numa floresta de Pinus localizada na Finlândia, os resultados do perfil da concentração de CO<sub>2</sub>, determinados a 2,2; 6,6; 9,0 e 15,0 m de altura sobre a superfície do solo, mostraram que as plantas, ao consumirem o CO<sub>2</sub>, reduzem as concentrações deste gás proveniente, em grande parte, das emissões da decomposição do material orgânico do solo. No inverno, a velocidade de decomposição da matéria orgânica é reduzida, devido às baixas temperaturas do solo e à diminuição da atividade metabólica das plantas. Conseqüentemente, as concentrações de CO<sub>2</sub>, medidas em todas as alturas, apresentaram pequena variação durante o inverno (AHONEN et al., 1997).

Nas culturas de alfafa (C<sub>3</sub>) e milho (C<sub>4</sub>), BUCHMANN e EHLERINGER (1998) mediram o gradiente de concentração de CO<sub>2</sub> (calculado como sendo a diferença de concentração entre duas alturas). Eles encontraram que a depleção na concentração diurna em alfafa foi mais pronunciada entre 378 a 387 ppm devido, provavelmente, à maior densidade de folhas. O padrão diário de concentração de CO<sub>2</sub> foi similar para a altura próxima do solo (0,02 m) e a situada acima da cultura (a 2,65 m de altura, 1,85 m acima da altura média das

plantas), refletindo a forte influência da cultura de alfafa sobre estes valores. No entanto, em um período de 24 h, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, entre plantas da cultura de milho, apresentaram pequena variação, sendo as diferenças de 11 ppm a 1,40 m, 14 ppm a 0,5 m e 21 ppm a 0,02 m.

ANTHONI et al. (1999) indicaram que a concentração de CO<sub>2</sub> no perfil vertical é misturada dentro e sobre a vegetação, logo após o amanhecer. O CO<sub>2</sub> é assimilado pela vegetação nas primeiras horas do dia. Além da assimilação, existem outros processos, como a advecção horizontal ou entrada de ar acima da camada da vegetação, que pode ser responsável pela depleção de CO<sub>2</sub> durante as primeiras horas da manhã.

No período noturno, a concentração de CO<sub>2</sub> em diferentes culturas, incluindo dentre elas o trigo, descrito por ALLEN (1971) variam, em geral, de 360 a 500 ppm. A concentração de CO<sub>2</sub>, determinada por MARTINS (1981) entre 17:00 e 21:00 h no interior de um talhão de eucalipto localizado em São Paulo, variou de 315 a 345 ppm e, após as 18:00 h, tendeu a aumentar, fato este provocado pela interrupção da fotossíntese e acúmulo de CO<sub>2</sub> no ar atmosférico em razão da respiração das plantas, dos microrganismos e das raízes do solo.

Segundo VERMA e ROSENBERG (1976), o acúmulo ou dispersão de CO<sub>2</sub>, proveniente da respiração dos microrganismos e das raízes do solo, depende da estratificação térmica da atmosfera e também da velocidade do vento.

ANTHONI et al. (1999) reportaram que as condições de relativa turbulência, durante a noite, suprimiram o acúmulo de CO<sub>2</sub> proveniente da respiração, e as condições de estabilidade (velocidade de vento < 0,175 m s<sup>-1</sup>), conduziram ao acúmulo de CO<sub>2</sub>. Nessas condições, as concentrações dentro e na parte superior da vegetação excederam o valor de 400 ppm.

Os valores noturnos, registrados por PEARMAN e GARRATT (1973), foram mais elevados e, em geral, mais variáveis (atingindo valores de 500 ppm).

No entanto, os valores médios, encontrados por esses autores durante o desenvolvimento da cultura de trigo apresentaram variação muito pequena, o que indica uma queda do CO<sub>2</sub> em razão da elevada atividade fotossintética.

Uma característica pouco comum dos resultados obtidos por ANTHONI et al. (1999), numa floresta de Pinus localizada em Oregon, EUA, foram os elevados valores da concentração de CO<sub>2</sub> acumulada em elevadas alturas (31 e 41 m sobre o solo) em noites calmas. Comportamento similar foi reportado por GRACE et al. (1995) para a floresta Amazônica.

A concentração noturna de CO<sub>2</sub>, nas proximidades da superfície do solo, registrada por ROSENBERG e VERMA (1976) na cultura de aveia, alcançou valores de 450 a 500 ppm, especialmente em noites calmas. De acordo com ALLEN (1971), a velocidade do vento e a concentração noturna de CO<sub>2</sub> apresentam-se inversamente relacionadas.

Sob condição de velocidade de vento  $< 0,02 \text{ m s}^{-1}$ , o perfil vertical da concentração de CO<sub>2</sub> apresenta-se de forma logarítmica e, o início da parte linear, incrementa-se com a velocidade do vento. Grandes variações, na concentração noturna de CO<sub>2</sub>, também foram observadas em florestas boreais (BALDOCCHI et al., 1997).

### **2.3. Variáveis ambientais que influenciam os valores do CO<sub>2</sub> atmosférico em áreas vegetadas**

No transcurso de uma estação (GOLDSTEIN et al., 2000), as variações em área foliar, luz incidente, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor (DPV) e umidade do solo devem exercer controle sobre a transferência líquida de CO<sub>2</sub> entre a atmosfera e a vegetação.

VESALA et al. (2000) consideram que a capacidade de fixação de CO<sub>2</sub> pela vegetação depende da concentração de nitrogênio nas folhas, da distribuição vertical da capacidade fotossintética e da área foliar, capaz de absorver a radiação fotossinteticamente ativa (PAR). A taxa fotossintética está relacionada às variáveis ambientais, como luz, temperatura, umidade e CO<sub>2</sub>, que variam no tempo e no espaço. Também é conhecido que a fotossíntese responde de forma diferente como resultado da idade da planta, fisiologia, espécie e aclimatação ao ambiente.

Os valores da PAR diminuem à medida que a radiação solar penetra na floresta de Pinus, devido à sombra da própria folhagem (VESALA et al., 2000). A redução nos valores da PAR, de  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (10,7 m) para  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na menor altura (8,3 m), mostra que os galhos e ramos presentes impediram que os raios do sol penetrassem na área do dossel da planta (ROSS et al., 1998). Na altura (9,5 m), 56,7% dos sensores utilizados registraram uma PAR de  $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , os quais são valores médios correspondentes à penumbra, sendo que nesta altura (9,5 m), os raios de sol foram parcialmente cobertos pelos galhos e ramos. O nível superior do dossel (10,7 m) não mostrou nenhuma sombra de manhã (11:00 – 11:30 h), registrando-se uma média de PAR de  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , em contraste com a tarde (14:14 – 14:44 h), período em que há presença de uma pequena sombra da folhagem, como resultado da diferença do ângulo do azimute do sol e a posição das árvores adjacentes.

Segundo GOLDSTEIN et al. (2000), as variáveis que influenciaram fortemente a absorção de  $\text{CO}_2$  das plantas de Pinus, nas montanhas de Sierra Nevada, foram a umidade do solo, PAR, temperatura do ar, duração média do dia e o déficit de pressão de vapor (VPD). A média da PAR foi  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; no entanto, ocorreram pequenas variações devido a céu coberto por nuvens, à esperada progressão do ângulo zenital do sol e à duração do dia. A diminuição gradual da máxima PAR (aproximadamente 15%), provavelmente, conduziu à diminuição na absorção líquida de  $\text{CO}_2$ . A temperatura do ar variou e, no início do experimento, a média foi  $10^\circ\text{C}$ , aumentando e tornando-se mais quente no final do mesmo (média de  $25^\circ\text{C}$ ); as temperaturas afetaram a cinética das enzimas associadas à fotossíntese e respiração. O VPD variou dentro da estação, e foi influenciado pelas mudanças do tempo; o VPD afeta o estado hídrico das plantas e, portanto, a condutância estomática.

A PAR pode variar ao redor do dossel, em que a própria folhagem gera um padrão variável na difusão da direção da radiação solar (VESALA et al., 2000).

A radiação solar é a fonte de energia para o processo fotossintético. AHONEN et al. (1997) indicaram que a dependência da taxa fotossintética de uma floresta de Pinus com a radiação pode ser descrita como uma hipérbole retangular, sendo este resultado observado em condições normais (sem estresse de água). A radiação, usualmente, explica 95% da variação na taxa fotossintética. Então, a radiação parece ser o fator mais importante afetando a produção fotossintética durante o transcurso da estação no ano. É assim que ANTHONI et al. (1999) registraram elevada troca líquida de CO<sub>2</sub> (5,5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), em dias com elevada radiação (radiação global > 20 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

Em relação à temperatura, BUTTERFIELD e MORISON (1992) indicaram que as elevadas temperaturas podem acelerar o desenvolvimento da planta (florescimento precoce) e encurtar o período de crescimento (enchimento de grãos), afetando a fenologia da planta e a produção de matéria seca.

Como conseqüência da diminuição da temperatura do ar, ocasionada pela presença de uma frente fria, a temperatura da folhagem de Pinus reduziu-se a 12,3°C, isto é, a mais baixa, quando comparada com aquelas de outras noites, enquanto a taxa de respiração foi bastante elevada. Esta característica, pouco comum, pode sugerir que a contribuição da respiração da

folhagem na respiração total do ecossistema não seja significativa (LEE et al., 1996).

Num experimento conduzido no verão por ANTHONI et al. (1999), para determinar os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo em uma floresta de Pinus, as condições climatológicas foram de céu nublado, temperatura do ar e VDP baixos. Nessas condições, a respiração dos organismos componentes do ecossistema diminuiu, e a assimilação de carbono elevou-se devido à maior abertura estomática, resultando em uma alta troca líquida do ecossistema (acima de 14,7 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>). Depois que as condições do tempo mudaram, a temperatura do ar e o VDP aumentaram, gradualmente, tendo sido registradas elevadas taxas de respiração dos organismos do ecossistema além de baixa assimilação de carbono.

Em relação à diminuição da temperatura e sua influência sobre os microrganismos do solo, LEE et al. (1996) encontraram que, quando a temperatura do ar diminuiu em 3°C (de 20°C para 17°C), a concentração de CO<sub>2</sub> do ar atmosférico, na cultura de milho, incrementou-se de 360 ppm para 1452 ppm.

Informações sobre a velocidade do vento, em áreas cobertas com vegetação, são importantes em estudos meteorológicos, agrícolas e ecológicos. Numerosos modelos de predição da velocidade do vento, em áreas vegetadas, foram desenvolvidos. Contudo, a precisão é difícil devido à complexidade dos processos de transporte do ar dentro da vegetação, e dos elementos na vegetação, como folhas e ramos (ROSS et al., 1998).

Após testar a influência da arquitetura da vegetação e da densidade da folhagem sobre a velocidade do vento, dentro e acima de seis tipos de vegetação, incluindo culturas agrícolas (milho, trigo e soja), florestas de coníferas decíduas (*Oak hickory* e *Aspen maple*) e uma floresta de Pinus, ZENG e TAKAHASHI (2000) concluíram que as medições do perfil do vento, dentro e acima do dossel, variam grandemente de acordo com a espécie, estrutura da vegetação e índice de área foliar. Isto concorda com os resultados da saída de ar frio do dossel da cultura de milho, determinado por DEVITO e MILLER (1983) à noite. Acima do

dossel registrou-se velocidade do vento de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , e dentro do dossel  $0,4 \text{ m s}^{-1}$ ; aparentemente, o tipo e geometria da vegetação que cobre a superfície apresentam efeitos marcantes sobre o desenvolvimento, persistência, e saída do ar frio.

Sob condições de calma (velocidade do vento  $< 1 \text{ m s}^{-1}$ ), a concentração de  $\text{CO}_2$  na cultura do milho variou grandemente. Entre 04:00 h da madrugada e 08:00 h, registraram-se os valores mais elevados de  $\text{CO}_2$ , entre  $420$  e  $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$  respectivamente, estes valores dentro do dossel foram elevados devido à inversão do ar, à noite, e ao acúmulo de  $\text{CO}_2$  liberado pela respiração das plantas e microorganismos do solo. Com o nascer do sol, o ar tornou-se menos estável, e as plantas começaram assimilar o  $\text{CO}_2$ ; então, a concentração declinou lentamente para valores entre  $330$  a  $350 \mu\text{mol mol}^{-1}$  menor que a concentração da atmosfera livre ( $350 - 360 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), aumentando novamente a partir de 18:00 h. Em dias com fortes períodos de vento (velocidade  $> 5 \text{ m s}^{-1}$ ), o  $\text{CO}_2$  manteve-se relativamente constante, mas aumentou ao pôr-do-sol, quando houve redução da velocidade dos mesmos. XU et al. (1999) encontraram que, entre 04:00 h da madrugada até aproximadamente 16:00 h, a concentração manteve-se entre  $350$  e  $370 \mu\text{mol mol}^{-1}$  aumentando para  $430 \mu\text{mol mol}^{-1}$  às 20:00 h, quando a velocidade do vento diminuiu para  $3 \text{ m s}^{-1}$ .

Para avaliar a influência da umidade do solo na atividade microbiana, DUGAS et al. (1999) quantificaram os fluxos de  $\text{CO}_2$  de campos com grama bermuda, pradaria nativa e sorgo. Os valores máximos desses fluxos coincidiram com dias em que o solo apresentou menor temperatura (em média,  $32^\circ\text{C}$ ) e maior conteúdo de umidade, devido à precipitação. Após esses

dias, os fluxos decresceram, significativamente, na grama bermuda e sorgo devido ao decréscimo da umidade do solo associado à baixa precipitação total. Na pradaria, eles permaneceram elevado, devido, provavelmente, ao grande conteúdo de matéria orgânica na superfície do solo, o que diminuiu a perda de água.

Outra fonte de variabilidade na absorção de  $\text{CO}_2$  é a duração do dia (GOLDSTEIN et al., 2000). Com o transcorrer do verão, a duração do dia diminui, influenciando a magnitude de absorção de  $\text{CO}_2$ . Do dia 185 (dia Juliano) ao dia 210, o horário de máxima absorção começou a mudar aproximadamente de 13:00 às 11:00 h. Nos dias em que a temperatura do ar e o VPD foram extremamente altos, o máximo de absorção de  $\text{CO}_2$  foi às 10:00 h, e a partir desse horário diminuiu, rapidamente com a redução das horas de luz. No restante da estação, a absorção diária de  $\text{CO}_2$  diminuiu significativamente,

sugerindo que a fisiologia das plantas componentes do ecossistema teria mudado.

#### **2.4. Fluxo de CO<sub>2</sub> liberado do solo**

Sob o ponto de vista energético, o solo é heterotrófico e constitui um sistema aberto, dependente da energia acumulada pelas plantas verdes fotossintetizantes, que é lentamente liberada através dos processos de decomposição realizados pela população de microorganismos presentes (GOULDEN et al., 1996)

O fluxo de CO<sub>2</sub> da superfície do solo para atmosfera pode ser usado como um índice da atividade metabólica dos microorganismos heterotróficos e das raízes das plantas (BALDOCCHI et al., 1997). Este fluxo varia nos diferentes ecossistemas, de ano para ano, e com as condições ambientais do local. Mediante as variações detectadas no fluxo de CO<sub>2</sub>, nas diferentes superfícies, podem ser identificadas mudanças no manejo do solo e crescimento das plantas, que, por sua vez, podem afetar a quantidade de carbono armazenado (GOULDEN et al., 1996).

Os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo são controlados pelas taxas de CO<sub>2</sub> produzidas pelas raízes e microorganismos do solo. Há vários métodos para estimar esses fluxos, tais como os métodos de câmara contendo álcali (WITKAMP, 1966; EDWARDS, 1982; RAICH, 1998), de câmara estática (LAW et al., 1999), de câmara com fluxos de ar (EDWARDS e SOLLINS, 1973), e o método <sup>222</sup>Rn (DÖRR e MÜNNICH, 1990; UCHIDA et al., 1997).

No método da câmara contendo álcali, os fluxos de CO<sub>2</sub> são determinados por titulação da solução alcalina presente dentro da câmara que absorve o CO<sub>2</sub>. O tamanho da câmara influi na precisão do método. Com o método da câmara com fluxos de ar, podem-se medir fluxos contínuos de CO<sub>2</sub>. No entanto, sua aplicabilidade é dificultada em regiões remotas, de difícil acesso. As vantagens deste método são: ser portátil e permitir identificar a

heterogeneidade dos fluxos de CO<sub>2</sub> proveniente do solo, através de medidas múltiplas. O método <sup>222</sup>Rn é mais trabalhoso, quando comparado com o método da câmara estática, pois, requer medições da concentração de CO<sub>2</sub> na profundidade do perfil e na superfície do solo; no entanto, proporciona informação adicional sobre a difusão do gás dentro do solo (UCHIDA et al., 1997).

Independentemente do método utilizado, os valores apresentados na literatura para as taxas de respiração, em florestas tropicais e subtropicais úmidas, encontram-se no intervalo de 8,9 a 14,5 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (RAICH e SCHLESINGER, 1992).

A taxa de respiração entre 6,5 e 8,9 g de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, em três florestas no Hawaí, encontrada por RAICH (1998), pode ser considerada baixa, quando comparada com outras apresentadas na literatura, o que pode ser reflexo das temperaturas relativamente baixas, que ocorreram durante a coleta de dados nas áreas experimentais.

LEE et al. (1996) descreveram que, mesmo em uma floresta decídua de clima frio do Canadá e com ventilação deficiente, a taxa média de respiração noturna foi 18 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>, similar aos valores de verão encontrados em outras florestas (PRICE e BLACK, 1990; WOFSEY et al., 1993; HOLLINGER et al., 1994). No entanto, esses valores foram significativamente menores que os valores medidos sob culturas agrícolas (BALDOCCHI, 1994; ROCHETTE et al., 1994).

Em geral, as taxas de respiração durante o verão tendem a ser mais elevadas que no inverno, em todas as florestas, como foi constatado por LAW et al. (1999). Em uma floresta de Pinus em Oregon, EUA, a taxa de respiração do solo no inverno foi 0,5 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, alcançando um máximo de 5,8 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> em maio; em julho e agosto, a média foi 2,5 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Os elevados valores dos fluxos de CO<sub>2</sub> encontrados são similares aos descritos por ANTHONI et al. (1999), tendo sido atribuídos à elevada concentração de raízes e micorrizas no solo. Outra causa poderia ser as freqüentes chuvas registradas no verão, no ano

de estudo, que podem ter aumentado a respiração microbiana, presumivelmente porque o solo permaneceu mais úmido.

O CO<sub>2</sub> liberado pela superfície do solo é derivado da decomposição de materiais orgânicos e da respiração das raízes (RAICH, 1998). A maior produção de CO<sub>2</sub> ocorre entre a superfície do solo e os primeiros 15 cm de profundidade, onde a quantidade de detritos é maior, a decomposição é rápida, e existe uma grande proporção de biomassa de raízes finas (BOWDEN et al., 1993). Esta camada contribui com 32% dos fluxos anuais (MONCRIEFF e FANG, 1999).

De acordo com MONCRIEFF e FANG (1999), do total de CO<sub>2</sub> liberado pela superfície do solo sob Pinus, 53% foram provenientes da respiração das raízes e 47% da decomposição da matéria orgânica. No entanto, em locais onde se pratica a rotação de culturas a contribuição da matéria orgânica na liberação de CO<sub>2</sub> para o ar foi maior. Em uma área cultivada com milho, 62% do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo foram derivados dos resíduos orgânicos das plantas de alfafa, que foram cultivadas neste local antes de semear o milho (BUCHMANN e EHLERINGER, 1998).

Além da decomposição da matéria orgânica, outros processos influenciam a respiração do solo, como a fotossíntese e respiração da própria vegetação (LAW et al., 1999), embora a respiração de caules e ramos contribui com somente 5% do total da respiração do ecossistema, com médias inferiores a  $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no verão.

## **2.5. Fatores que influenciam os fluxos de CO<sub>2</sub> liberado pelo solo**

A liberação de CO<sub>2</sub> da superfície do solo é o resultado de numerosos processos que incluem a produção de CO<sub>2</sub>, o transporte deste gás e a interação entre fatores físicos e biológicos dentro do solo. A importância de

processos ou fatores individuais, que controlam os fluxos de CO<sub>2</sub> pode variar em diferentes ecossistemas e condições climáticas (RAICH e SCHLESINGER, 1992).

A emissão de CO<sub>2</sub> do solo tem sido considerada como o resultado da combinação de dois processos: a produção de CO<sub>2</sub> dentro do solo, principalmente pela respiração das raízes das plantas e pelos microrganismos, e o transporte deste gás através do solo, que controla o movimento de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera e de O<sub>2</sub> na direção oposta (MONCRIEFF e FANG, 1999).

Numerosos estudos (CHAPMAN, 1979; BRIDGE, et al., 1983; SCHLENTNER e VAN CLEVE, 1985; HOWARD e HOWARD, 1993; FERNANDEZ et al., 1993) indicam que a respiração do solo poderia ser influenciada por fatores ambientais, tais como a temperatura, conteúdo de umidade e propriedades do solo (porosidade e conteúdo de matéria orgânica), e pelo tipo e

quantidade de biomassa microbiana.

A temperatura do solo pode servir para prever os fluxos de CO<sub>2</sub>. RAICH e SCHLESINGER (1992) reportaram que 94% (solo sob floresta) e 90% (solos minerais) da variabilidade dos fluxos de CO<sub>2</sub> foram explicados pela variação na temperatura. A temperatura, além de afetar o fluxo de CO<sub>2</sub>, afeta também a decomposição da matéria orgânica e a atividade microbiana (FANG e MONCRIEFF, 1999).

Recentemente, LAW et al. (1999) concluíram que temperaturas elevadas, ocorridas no verão, resultaram em aumento nas taxas de respiração das árvores e do solo. Entretanto, severos estresses ambientais, como temperaturas acima de 42°C e uma intensa seca, com um conteúdo de umidade entre 5 e 8%, limitam o desenvolvimento da biota do solo. Estas condições limitam a decomposição dos detritos orgânicos, refletindo-se em baixas taxas de respiração, sendo um reflexo da condição climática (SHULZE, 1977).

É amplamente aceito que a respiração da microbiota do solo aumenta com o incremento da umidade até que o conteúdo de umidade ótimo seja alcançado (MONCRIEFF e FANG, 1999).

A umidade do solo também influencia os processos autotróficos e heterotróficos do solo. HOWARD e HORWARD (1993) observaram que o déficit de umidade do solo diminui a respiração das raízes em 17%, e GOULDEN et al. (1996) indicaram que a respiração heterotrófica diminui mais que a respiração autotrófica, durante períodos prolongados de seca, dentro de florestas decíduas temperadas.

MONCRIEFF e FANG (1999), simulando a taxa de respiração no solo, incluindo a respiração das raízes e dos microrganismos, encontraram um total produzido de  $5098 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ; neste caso, dentro do fluxo total anual, a contribuição da água do solo para movimentar e liberar  $\text{CO}_2$  foi desprezível. Porém, a variação nos fluxos de  $\text{CO}_2$  do solo sob pastagem, detectada por DUGAS et al. (1999), foi causada pelo conteúdo de água no solo.

Baixos ou elevados conteúdos de umidade no solo,

em geral, restringem a respiração. Com baixo conteúdo de água no solo, ocorre redução na respiração, causada pela carência de água, inibindo as atividades metabólicas dos microrganismos e raízes. Em elevados conteúdos de umidade, a redução na respiração do solo é causada pela carência de oxigênio e acúmulo de  $\text{CO}_2$ , em razão dos macroporos do solo ficarem preenchidos com água. Nos limites do intervalo das baixas e elevadas umidades, a mudança no conteúdo de umidade tem pouco ou nenhum efeito significativo sobre a respiração do solo (TESAROVÁ e GLOSER, 1976).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Áreas estudadas

Selecionaram-se quatro áreas, uma mata nativa, duas florestas plantadas com araucária e seringueira, respectivamente, e uma área de pastagem. As áreas encontravam-se localizadas no campus da Universidade Federal de Viçosa, Município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, situada a 20°45'14" de latitude Sul e 42°52'54" de longitude oeste e a 620 m de altitude. O clima da região foi classificado pelo sistema de Köppen, citado por ESPOSTI (2000), como Cwa-mesotérmico úmido, com verões quentes e invernos secos, sendo a média anual das temperaturas máximas 26,1°C e das mínimas 14,0°C, com pluviosidade anual de 1.340 mm e umidade relativa média anual de 80%.

Na unidade experimental com mata nativa, encontravam-se árvores de diferentes diâmetros com uma altura média de 12 m. Na floresta com araucária (*Araucaria* spp.), as árvores presentes tinham uma idade aproximada de 40 anos, com altura média de 15 m, distribuídas no espaçamento de 4 x 6 m (em linha e entre linhas). Tanto na mata nativa como na floresta com araucária, encontrou-se uma elevada diversidade de espécies de plantas, que formavam um sub-bosque, principalmente de arbustos com uma altura média de 2 m.

A floresta plantada com seringueira (*Hevea* spp.) era composta por árvores com uma altura média de 18 m, distribuídas em espaçamento de 6 m em linha x 10 m entre linhas, sendo que, após o período de chuva (fins de novembro) apareceu um sub-bosque de gramíneas, cucurbitáceas e algumas leguminosas. A idade desta floresta é aproximadamente 23 anos.

A área de pastagem ocupada com capim gordura (*Melinis minutiflora* Pal. de Beauv) encontrava-se na encosta de um morro, em virtude da não aplicação de técnicas adequadas de manejo, e estava bastante degradada; o capim registrou uma altura média de plantas de 1,1 m.

Em cada ecossistema, a área útil da unidade experimental foi 625 m<sup>2</sup> (25 x 25 m).

### **3.2. Coletas de amostras de solo**

Para determinar as características físicas e químicas do solo (Quadro 1), em cada ecossistema, fez-se uma amostragem da camada de 0 a 20 cm de profundidade, em quatro repetições. O solo foi desterrado, homogeneizado e seco ao ar por 48 h, e posteriormente, peneirado em malha de 2 mm, obtendo-se Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Na TFSA foi feita a análise textural, pelo método da pipeta associado à peneiragem para a fração areia, e a determinação da densidade de partículas, pelo método do balão volumétrico, conforme a metodologia proposta por EMPRESA BRASILEIRA de PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA (1997).

Realizaram-se as seguintes determinações químicas: elementos trocáveis extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>) e potássio disponível por Mehlich-1. A determinação do cálcio e magnésio foi feita por espectrofotometria de absorção atômica e a de potássio por fotometria de emissão de chama. A acidez titulável (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) foi medida pela extração com acetato de cálcio 1 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0 e a determinação foi feita por titulometria. O fósforo foi extraído por Mehlich-1 sendo a determinação feita por colorimetria. O carbono orgânico foi

Quadro 1 - Caracterização física e química do solo sob diferentes coberturas vegetais

Determinação	Mata nativa	Araucária	Seringal	Pastagem
Areia grossa	25,5	28,4	31,2	23,9
Areia fina	12,3	17,0	15,9	12,5
Silte	13,5	9,9	7,6	7,1
Argila	48,7	44,7	45,3	56,5
Classe textural	Argila	Argila	Argilo-arenosa	Argila
Densidade de partículas (g cm <sup>-3</sup> )	2,7	2,6	2,6	2,6
pH em água (1:2,5)	4,4	4,9	4,7	4,4
P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,1	4,6	9,1	3,8
K <sup>+</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	24,9	21,3	9,5	14,6
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,0	0,9	0,9	0,3
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,6	0,7	0,3	0,1
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,2	1,2	0,9	2,1
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	11,7	13,1	10,4	14,9
Soma de Bases (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,7	1,7	1,3	0,5
CTCe (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,9	2,9	2,2	2,6
CTCt (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	13,4	14,9	11,7	15,4
Carbono orgânico (dag kg <sup>-1</sup> )	2,4	2,7	1,9	2,5
MO (dag kg <sup>-1</sup> )	4,2	4,6	3,2	4,3
N (dag kg <sup>-1</sup> )	0,2	0,2	0,3	0,2
C/N	12,0	13,5	6,3	12,5

pH em água: 1:2,5; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, e Al<sup>3+</sup>: Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; P e K<sup>+</sup>: Extrator Mehlich-1; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>:

Extrator Ca(OAc)<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0 (EMPRESA ..., EMBRAPA, 1997).

CTCe, CTCt = Capacidade de Troca de Cátions efetiva (e) e total (t).

determinado pelo método de Walkley-Black, e o nitrogênio total pelo método de Kjeldahl.

As características físicas e químicas encontradas em cada tipo de cobertura vegetal permitiram, explicar as variações medidas no fluxo de CO<sub>2</sub> do solo e nos perfis na atmosfera de cada uso do solo.

### **3.3. Medições das variáveis meteorológicas**

Devido à influência dos fatores climáticos sobre a distribuição do dióxido de carbono dentro e sobre a vegetação, foram medidas as temperaturas mínima e máxima do ar, insolação, precipitação, umidade relativa e velocidade do vento. Os dados meteorológicos foram obtidos da Estação Meteorológica de Viçosa, instalada próxima à área com pastagem. Nas proximidades da floresta com seringal, havia uma estação portátil. Os dados coletados nas duas estações foram utilizados neste estudo. Na divisa entre a mata nativa e a floresta com araucária, no dia 28 de novembro de 2000 foi instalada outra estação climatológica portátil que funcionou deste dia até o final do experimento.

Para medir a umidade relativa, insolação, temperaturas mínimas e máximas e velocidade do vento, os sensores foram colocados a 2 m de altura, e o aparelho que determina a precipitação pluvial foi colocado a 1 m de altura em relação à superfície do solo.

Os resultados da variável evaporação, medida pela Estação Meteorológica de Viçosa e, proporcionados para este estudo foram determinados em Tanque classe A.

### **3.4. Instalação do experimento**

### 3.4.1. Perfil das taxas de CO<sub>2</sub> na atmosfera da vegetação

Para determinar as taxas de CO<sub>2</sub> (mg d<sup>-1</sup>), em cada cobertura vegetal instalaram-se três torres de 2 m de altura, distribuídas em triângulo, com uma separação entre elas de 20 m. A distribuição permitiu detectar as flutuações de CO<sub>2</sub> influenciadas pela velocidade do vento. Cada torre, por sua vez, foi subdividida em diferentes alturas, correspondendo a 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150 e 175 cm a partir do solo.

Em cada uma destas altura de cada torre, colocou-se um recipiente de plástico, perfurado lateralmente (30 furos) para permitir a troca gasosa, contendo 20 mL de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>. Para prevenir a mistura com material estranho (folhas e insetos), a abertura de cada recipiente foi coberta com plástico e papel alumínio.

Nos primeiros 30 dias, a solução de NaOH dos recipientes foi substituída por outra livre de CO<sub>2</sub> e titulada a cada dois dias, posteriormente e até completar 125 dias, quando passou a ser substituída e titulada a cada três dias. Em cada área das diferentes coberturas vegetais e próximo a cada torre, colocaram-se três brancos (testemunha), contendo a solução de NaOH em recipientes completamente fechados. Os brancos foram colocados para quantificar o CO<sub>2</sub> absorvido pelo hidróxido de sódio, durante a preparação e o transporte até o campo.

De cada recipiente, tomou-se uma alíquota de 5 mL da solução de NaOH remanescente que foi titulada com HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>, utilizando-se duas a três gotas de fenolftaleína como indicador, após a adição de 5 mL de BaCl<sub>2</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> para precipitar os carbonatos formados.

A titulação de NaOH permitiu calcular, por diferença, a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvido, usando-se a equação (1):

$$mg\ de\ CO_2\ d^{-1} = \frac{22 \times (B - T) \times N_{ac} \times F \times V_1}{V_2} \quad (1)$$

em que 22 = peso equivalente de CO<sub>2</sub>; B = branco, média dos volumes de HCl obtidos na titulação dos três recipientes com NaOH (mL); T = volume de HCl gasto na titulação de cada amostra (mL); N<sub>ac</sub> = normalidade do ácido usado na titulação; f = fator de padronização do HCl; V<sub>1</sub> = volume de NaOH usado na absorção de CO<sub>2</sub> (mL); V<sub>2</sub> = volume de NaOH titulado (mL).

Durante os 125 dias de duração do experimento, outubro de 2000 a janeiro de 2001, foram feitas 52 leituras. Durante o desenvolvimento do experimento, manteve-se a ordem de coleta das amostras do campo. Iniciou-se na floresta de araucária aproximadamente às 8:00 h da manhã, mata nativa às 9:30 h e a área de pastagem às 11:00 h. As avaliações no seringal foram feitas às 14:00 h.

### **3.4.2. Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo**

Para medir a respiração proveniente do solo, em cada local foram distribuídas, ao acaso, seis câmaras de alumínio de 20 x 20 x 30 cm. Para minimizar a troca gasosa entre o exterior e interior da câmara, cada câmara foi introduzida no solo à profundidade de 2 cm, apertando-se o solo ao redor da mesma. Em três câmaras, mediram-se os fluxos de CO<sub>2</sub> da manta orgânica e do solo e, nas outras três, os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo sem manta orgânica.

Para absorver o CO<sub>2</sub> liberado pelo solo, dentro de cada câmara colocou-se um recipiente de plástico contendo 45 mL de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>. Em cada amostragem, os recipientes eram substituídos por outros contendo o NaOH, na solução proveniente do campo. Determinou-se a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvido pela solução de hidróxido de sódio, seguindo-se o procedimento descrito no item 3.4.1.

Para permitir um equilíbrio (entrada de oxigênio) entre o interior e exterior de cada câmara, em cada amostragem, cada câmara foi invertida por 30 minutos.

Nos primeiros 30 dias após estabelecido o experimento (outubro 2000), as amostragens foram feitas a cada dois dias e, posteriormente, a cada três dias até a finalização em janeiro de 2001 (125 dias), totalizando 52 avaliações. As amostragens foram feitas pela manhã, seguindo-se idêntica ordem durante o desenvolvimento do experimento, ou seja, primeiro na floresta de araucária, mata nativa e a área de pastagem, sendo no seringal feito à tarde. Foram mantidos os horários de amostragem, 9:00 h na floresta de araucária, 10:30 h na mata nativa, 12:00 h na pastagem e 15:00 h na floresta com seringueira.

### **3.4.3. Estudo da manta orgânica**

Para avaliação quantitativa da manta orgânica, em cada tipo de uso do solo, coletaram-se, ao acaso, quatro amostras, todo o material presente sobre o solo (folhas, galhos, ramos pequenos) de uma área de 30 x 30 cm. O material amostrado em cada parcela (30 x 30 cm) foi submetido à secagem em estufa a 70°C por 72 horas, para posteriormente determinar o peso da matéria seca por parcela.

As amostras da manta orgânica, depois de secas e moídas em moinho tipo Wiley (de aço inoxidável), foram analisadas quimicamente. Para determinação dos teores de nutrientes do material moído, de cada repetição foram pesadas duas sub-amostras, para proceder-se, respectivamente, às digestões sulfúrica e nítrico-perclórica. As amostras oriundas das digestões sulfúricas foram utilizadas nas análises dos teores de nitrogênio, enquanto as amostras processadas pela digestão nítrico-perclórica foram usadas nas análises dos teores de P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>.

O K<sup>+</sup> foi dosado em fotômetro de chama, o Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> em espectrofotômetro de absorção atômica, o P, em espectrofotômetro, pelo método

da vitamina C, modificado por BRAGA e DEFILIPO (1974). O N-orgânico foi dosado pelo método de Nessler (JOHNSON e ULRICH, 1959).

### **3.5. Análises estatísticas**

Utilizou-se estatística inferencial para determinar os desvios-padrão tanto das taxas de CO<sub>2</sub> atmosférico (mg d<sup>-1</sup>) determinado nas diferentes alturas utilizadas em cada ecossistema, quanto do fluxo de CO<sub>2</sub> (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) proveniente do solo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Perfil vertical das taxas de CO<sub>2</sub> da atmosfera de áreas com diferentes coberturas vegetais

As taxas médias de CO<sub>2</sub> com os respectivos desvios-padrão, obtidas entre os meses de outubro de 2000 e janeiro de 2001, nas quatro coberturas vegetais, são apresentadas no Quadro 2.

Nas quatro coberturas vegetais, as menores taxas de CO<sub>2</sub>, dados médios, foram registradas no mês de novembro e as maiores em janeiro. Em outubro e dezembro, os valores foram intermediários (Figuras 1, 2, 3 e 4).

Em geral, os menores valores de CO<sub>2</sub> para os meses de outubro, dezembro e janeiro, dentro das três florestas (Figuras 7, 9 e 10), registraram-se nas alturas próximas à superfície do solo (5 e 10 cm), exceto para pastagem nos referidos meses, e seringueira no mês de dezembro. Na floresta com araucária, novamente foram verificadas menores taxas de CO<sub>2</sub> no mês de novembro na altura de 5 cm (Figura 8).

No mês de outubro, houve semelhança entre as formas adotadas pelos perfis da mata nativa (Figura 1) e do seringal (Figura 3). Todavia, as mudanças nas taxas de CO<sub>2</sub> entre as alturas do perfil da mata nativa foram mais suaves, quando comparadas com o seringal, exceto no mês de dezembro.

Quadro 2 - Taxas médias de CO<sub>2</sub> (mg d<sup>-1</sup>) e desvio-padrão (sd) em cada altura (cm) a partir da superfície do solo, nas diferentes coberturas vegetais. Em cada mês, as taxas de CO<sub>2</sub> nas diferentes alturas foram determinadas a partir das médias de 13 avaliações (31 dias acumulados)

Meses	Altura (cm)	Mata Nativa (média ± sd)	Araucária (média ± sd)	Sringal (média ± sd)	Pastagem (média ± sd)
Outubro	5	50,2 ± 6,6	51,9 ± 6,0	51,3 ± 6,4	55,2 ± 5,3
	10	53,2 ± 5,7	52,7 ± 7,7	52,5 ± 5,5	54,2 ± 7,4
	25	55,0 ± 5,7	57,3 ± 6,9	49,8 ± 6,2	51,1 ± 5,2
	50	54,2 ± 4,3	56,9 ± 4,4	52,4 ± 3,0	54,5 ± 6,7
	75	55,5 ± 5,1	54,2 ± 5,1	54,2 ± 4,6	56,3 ± 5,8
	100	57,5 ± 4,3	57,6 ± 7,6	50,5 ± 3,6	58,6 ± 10,0
	125	57,0 ± 4,7	57,5 ± 4,7	54,3 ± 7,1	60,7 ± 3,2
	150	59,1 ± 6,1	57,4 ± 6,3	56,5 ± 8,5	58,3 ± 6,2
	175	56,6 ± 5,9	57,5 ± 6,8	50,3 ± 4,3	58,2 ± 4,2
Média		55,4 ± 6,5	55,9 ± 6,6	52,4 ± 6,7	56,3 ± 7,1
Novembro	5	49,8 ± 4,2	46,2 ± 4,2	45,7 ± 3,4	49,7 ± 3,6
	10	49,8 ± 3,3	48,3 ± 3,9	46,4 ± 2,9	49,5 ± 4,5
	25	50,5 ± 1,0	48,3 ± 2,9	45,6 ± 3,6	47,2 ± 4,5
	50	49,8 ± 2,5	46,3 ± 4,7	44,5 ± 2,6	45,3 ± 4,0
	75	49,3 ± 4,6	47,6 ± 3,8	45,0 ± 3,6	45,2 ± 3,4
	100	50,4 ± 1,6	46,9 ± 2,3	43,5 ± 3,4	44,5 ± 3,3
	125	48,2 ± 3,0	47,0 ± 2,6	42,0 ± 3,6	45,3 ± 2,6
	150	49,1 ± 2,6	46,5 ± 3,8	42,1 ± 4,0	44,2 ± 4,1
	175	48,4 ± 4,2	46,4 ± 3,1	41,7 ± 3,3	42,1 ± 5,8
Média		49,5 ± 4,0	47,1 ± 3,9	44,0 ± 4,1	45,9 ± 5,0
Dezembro	5	60,5 ± 7,0	57,9 ± 5,5	61,1 ± 7,3	64,7 ± 8,7
	10	60,7 ± 7,5	60,7 ± 6,7	58,3 ± 5,7	60,4 ± 6,1
	25	61,7 ± 3,4	62,9 ± 5,9	59,8 ± 3,9	59,7 ± 5,2
	50	64,1 ± 4,7	64,1 ± 5,6	61,8 ± 3,6	59,5 ± 5,1
	75	65,0 ± 4,5	63,5 ± 7,2	60,5 ± 5,3	61,2 ± 6,2
	100	64,4 ± 6,4	63,9 ± 5,1	60,5 ± 3,9	59,6 ± 4,0
	125	63,3 ± 4,6	64,9 ± 5,6	61,3 ± 3,5	61,6 ± 5,3
	150	66,3 ± 3,1	62,8 ± 6,2	63,0 ± 2,5	61,1 ± 3,9
	175	66,4 ± 6,0	63,0 ± 5,3	64,3 ± 6,9	60,4 ± 3,2
Média		63,6 ± 6,1	62,6 ± 6,6	61,2 ± 5,5	61,0 ± 6,7
Janeiro	5	59,7 ± 9,2	58,9 ± 10,4	57,8 ± 10,2	62,5 ± 5,9
	10	60,3 ± 5,7	63,0 ± 11,7	60,8 ± 8,1	60,1 ± 5,1
	25	67,2 ± 7,3	63,4 ± 6,3	61,4 ± 6,8	61,1 ± 4,8
	50	65,7 ± 5,3	65,8 ± 6,0	63,6 ± 3,6	58,4 ± 5,6
	75	65,1 ± 5,7	67,3 ± 7,3	63,7 ± 5,1	59,4 ± 4,3
	100	66,3 ± 5,3	67,3 ± 5,3	63,8 ± 5,1	61,0 ± 4,3
	125	67,5 ± 8,2	65,7 ± 5,9	65,6 ± 4,2	63,0 ± 5,2
	150	69,0 ± 4,8	65,8 ± 4,9	65,7 ± 5,7	62,7 ± 5,5
	175	65,3 ± 7,9	64,0 ± 6,1	65,5 ± 4,1	63,0 ± 3,6
Média		65,1 ± 8,1	64,6 ± 7,9	63,1 ± 7,1	61,2 ± 7,4

Na floresta de araucária (Figura 2), as taxas de CO<sub>2</sub> entre as alturas a 5 e 25 cm acima do solo foram incrementando-se gradualmente. No mês de outubro, a 75 cm observou-se redução desse valor (54,2 mg d<sup>-1</sup>) em relação à altura 100

cm ( $57,6 \text{ mg d}^{-1}$ ) e, entre 100 e 175 cm de altura, as taxas tenderam a estabilizar-se.

Na área com pastagem (Figura 4), as menores taxas de  $\text{CO}_2$  no mês de outubro, ocorreram entre 10 e 50 cm acima do solo. A partir dos 50 cm, observou-se um acréscimo no  $\text{CO}_2$ , quando a altura aumentou até 125 cm. Nas restantes duas alturas (150 e 175 cm), houve uma redução do  $\text{CO}_2$  atmosférico em relação a 125 cm.

As diferentes formas dos perfis das quatro coberturas vegetais no mês de outubro (Figura 7), mostraram a existência de alta variabilidade entre as taxas de  $\text{CO}_2$  determinadas nas alturas utilizadas. Neste mês, a elevada temperatura média nos locais do experimento (Figura 5a), aliada à inadequada disponibilidade de água no solo (Figura 5b), resultado da baixa precipitação agravada pelo aumento na evaporação de  $3,4 \text{ mm d}^{-1}$  para  $5,4 \text{ mm d}^{-1}$  no início e final do mês, respectivamente, (dado proporcionado pela Estação Meteorológica de Viçosa), poderia ter afetado o estado hídrico da vegetação causando variações na fixação de  $\text{CO}_2$ .

No mês de novembro, as taxas de  $\text{CO}_2$  da atmosfera do seringal e da pastagem tenderam a reduzir com o aumento da altura em relação à superfície do solo (Figura 8). O perfil das taxas de  $\text{CO}_2$ , para este mês, foi similar ao obtido na floresta de Oak-hickory em Missouri, obtido por GARRETT et al. (1978) na primavera e parte do verão.

Na floresta de araucária (Figura 2), para o mês de novembro, a forma do perfil construído com as taxas de  $\text{CO}_2$  não teve uma tendência definida como nas outras três coberturas vegetais, em que os dados de  $\text{CO}_2$  nas primeiras três alturas acima do solo desta floresta (araucária) foram maiores ( $47,6 \text{ mg d}^{-1}$  média das três alturas) que nas demais alturas ( $46,8 \text{ mg d}^{-1}$ , média de seis alturas).

Para o mês de novembro, no seringal (Figura 3), à semelhança do que ocorreu na floresta com araucária, nas primeiras duas alturas sobre a superfície do solo houve leve incremento nas taxas de  $\text{CO}_2$  de  $45,7 \text{ mg d}^{-1}$  (5 cm) para  $46,4 \text{ mg d}^{-1}$  (10 cm), e acima dos 25 cm registrou-se queda nas taxas, sendo a média de  $43,5 \text{ mg d}^{-1}$  (sete alturas).

Os perfis formados pelas taxas de CO<sub>2</sub> da atmosfera, no mês de novembro, no ambiente das quatro coberturas vegetais (Figura 8), estão relacionados com o aumento da precipitação pluviométrica de 0,8 mm d<sup>-1</sup> para 8,6 mm d<sup>-1</sup> nos meses de outubro e novembro, respectivamente, o que provavelmente conduziu ao restabelecimento da umidade do solo com o conseqüente aumento na capacidade de fixação de CO<sub>2</sub> por parte da vegetação. Pode-se supor que a maior parte da água de chuva armazenada no solo foi aproveitada pela vegetação, em função da baixa taxa de evaporação em novembro (2,3 mm d<sup>-1</sup>) em relação a outubro (4,4 mm d<sup>-1</sup>).

No mês de dezembro, na mata nativa, foi registrada tendência de aumento nas taxas de CO<sub>2</sub> da atmosfera, desde as proximidades da superfície do solo (60,5 mg d<sup>-1</sup>) até 100 cm de altura (64,4 mg d<sup>-1</sup>), diminuindo ligeiramente a 125 cm (63,3 mg d<sup>-1</sup>) para novamente aumentar nas duas alturas restantes (Figura 1).

Na floresta com araucária (Figura 2), a partir de 5 cm até 125 cm de altura acima da superfície do solo, observou-se, no mês de dezembro, aumento gradual nas taxas de CO<sub>2</sub>, de 57,9 mg d<sup>-1</sup> para 64,9 mg d<sup>-1</sup>, respectivamente. Nas alturas restantes (150 e 175 cm), a concentração diminuiu em 3,5% em relação à altura de 125 cm (Quadro 2).

Em outubro, as taxas de CO<sub>2</sub> na atmosfera do seringal (Figura 3) apresentaram padrão de comportamento similar ao descrito para a mata nativa.

Na área de pastagem, no mês de dezembro, as taxas de CO<sub>2</sub> diminuíram entre 5 e 10 cm e, a partir desta altura, mantiveram-se quase constantes. Este resultado pode estar relacionado à disponibilidade de água no solo, que propiciou maior atividade microbiana e conseqüente incremento na quantidade de CO<sub>2</sub> atmosférico nas posições próximas à superfície do solo.

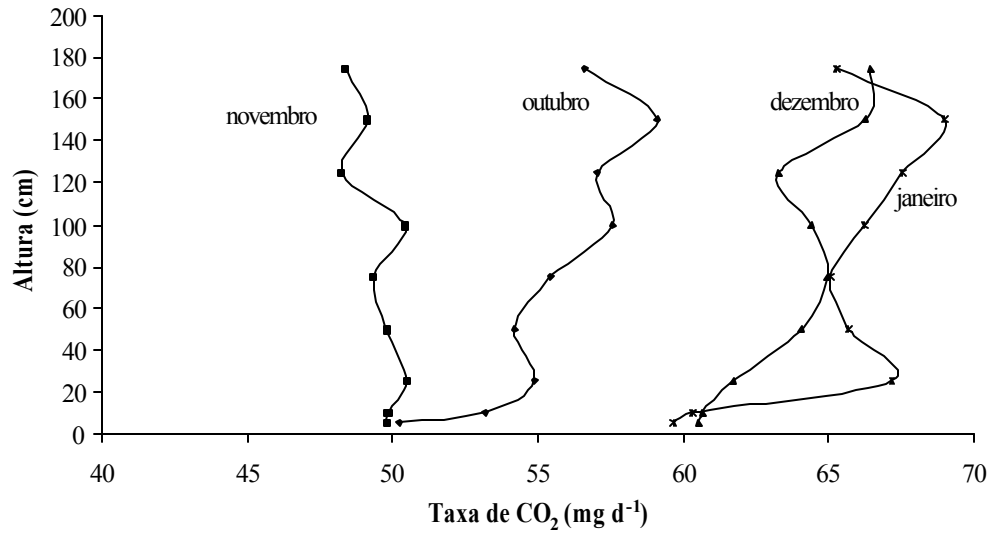


Figura 1 - Taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera na mata nativa, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.

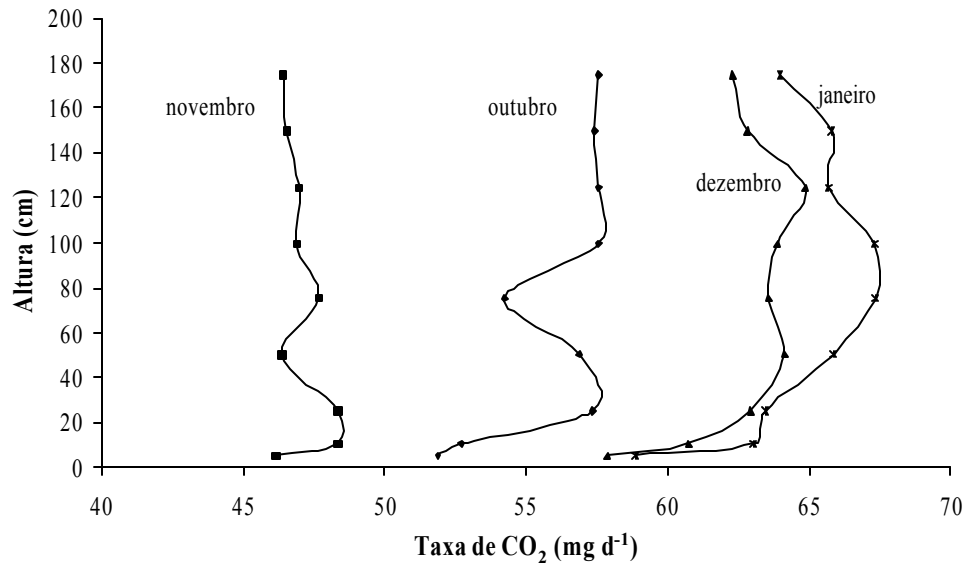


Figura 2 - Taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera floresta de araucária, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.

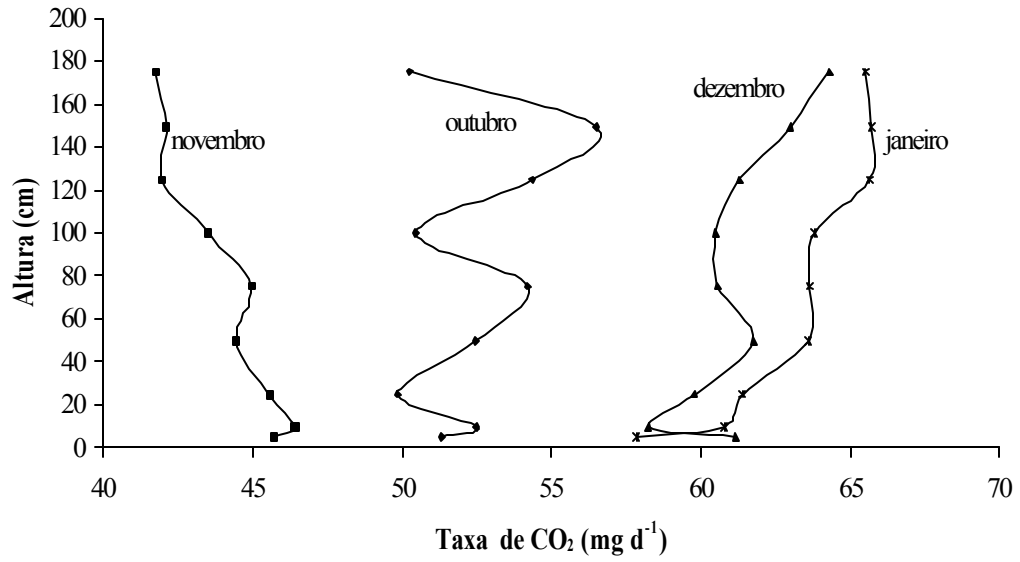


Figura 3 - Taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera na área plantada com seringueira, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.

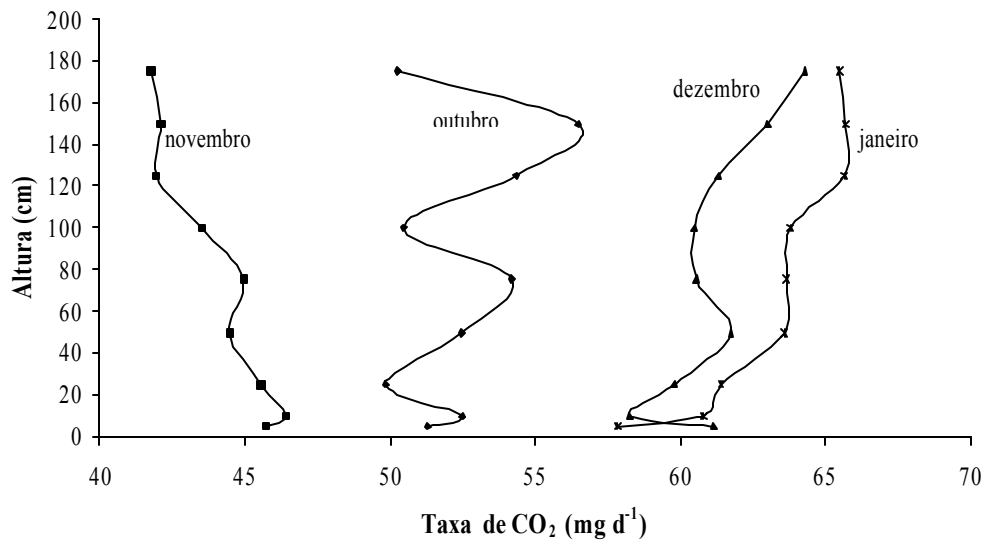


Figura 4 - Taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera na pastagem, entre outubro de 2000 a janeiro de 2001.

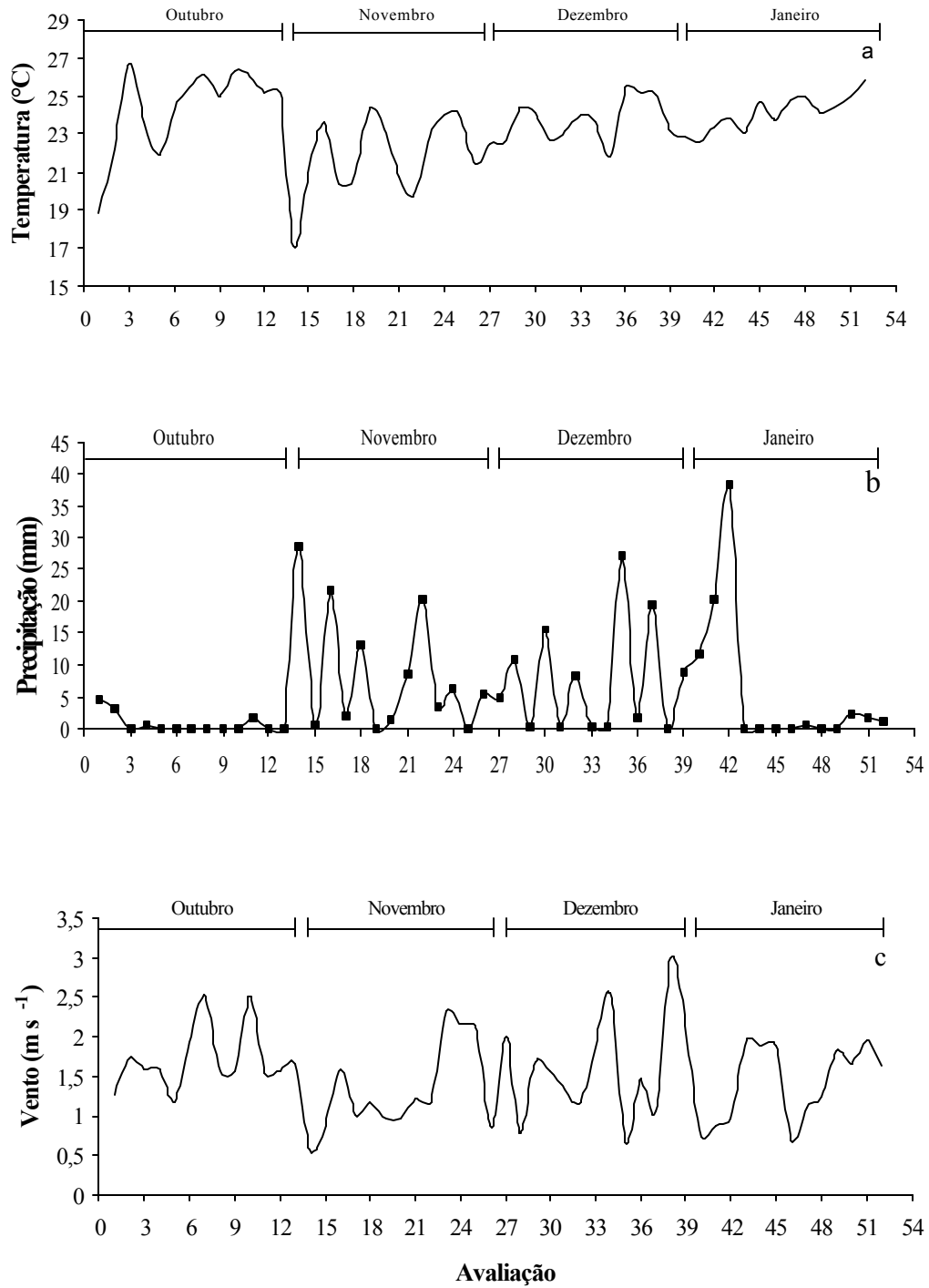


Figura 5 - Valores de temperatura (a), precipitação pluvial (b) e velocidade do vento (c) no período de outubro de 2000 a janeiro de 2001. Avaliação : 1 a 13 - outubro; 14 a 26 - novembro; 27 a 39 - dezembro e 40 a 52 - janeiro.

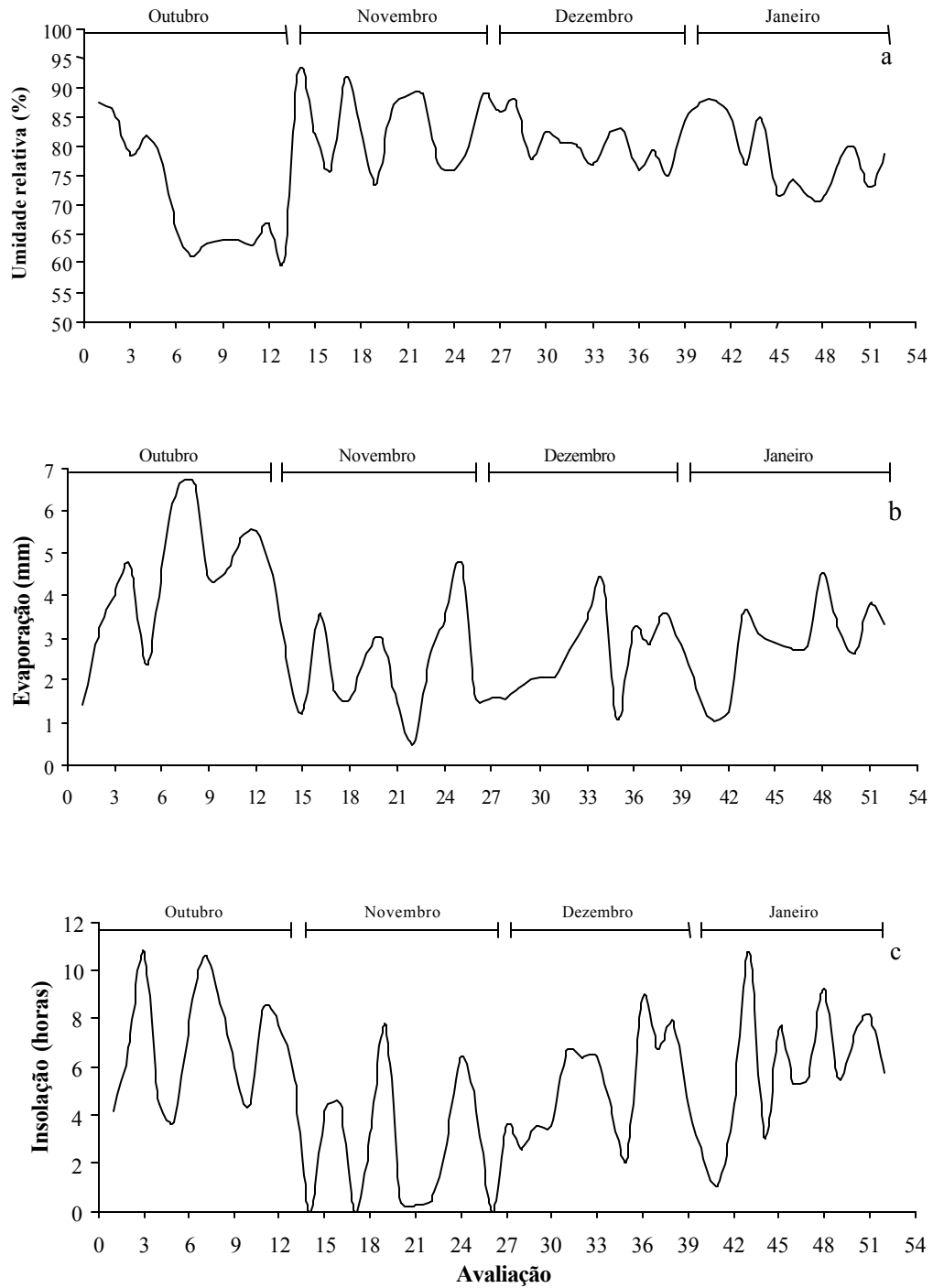


Figura 6 - Valores de umidade relativa (a), evaporação (b) insolação (c) no período de outubro de 2000 a janeiro de 2001. Avaliação: 1 a 13 - outubro; 14 a 26 - novembro; 27 a 39 - dezembro e 40 a 52 - janeiro.

O incremento nas taxas de CO<sub>2</sub> da atmosfera no ambiente da mata nativa e das duas florestas, no mês de dezembro, pode ser atribuído à redução na taxa fotossintética e à possível advecção do CO<sub>2</sub> nessas coberturas vegetais.

Por outro lado, a frequência de precipitação no mês de dezembro (Figura 5b) aumentou o conteúdo de água no solo, proporcionando condições favoráveis para o aparecimento de vegetação rasteira dentro das florestas. Segundo Dougherty (1977), citado por GARRETT et al. (1978), em folhas novas, as quantidades de CO<sub>2</sub> liberadas na respiração são maiores que as absorvidas na fotossíntese. Isto poderia ter acontecido nas áreas com espécies arbóreas e com menor intensidade na pastagem, causando maiores acúmulos de CO<sub>2</sub> nas maiores alturas (Figura 9).

No mês de janeiro, as taxas de CO<sub>2</sub> da atmosfera tenderam a incrementar quando houve aumento da altura em relação à superfície do solo. Este comportamento foi similar nas três florestas e na pastagem (Figura 10). No início deste mês (primeiras 3 avaliações), as condições climáticas foram favoráveis. A precipitação acumulada nessas primeiras três avaliações foi 70,3 mm, valor este elevado em relação ao acumulado nas 10 avaliações restantes (5,7 mm). A umidade relativa do ar também foi elevada no início do mês, diminuindo gradualmente com a redução da chuva (Figura 6a).

A partir da quarta avaliação (mês de janeiro), houve diminuição da chuva e da umidade relativa do ar, o que, possivelmente, teria provocado diminuição na abertura estomática da planta para reduzir a perda de água por transpiração, limitando a entrada de CO<sub>2</sub> para o interior da folha e aumentando a concentração deste gás no ambiente.

É possível inferir que a atividade fotossintética não foi ótima durante o mês de janeiro e a respiração foi elevada. Assim, a taxa média de CO<sub>2</sub> na atmosfera das florestas alcançou o máximo de 64,3 mg d<sup>-1</sup>, e na pastagem 61,2 mg d<sup>-1</sup> (Quadro 2).

Outro fator que teria contribuído para o incremento nas taxas de CO<sub>2</sub> da atmosfera, em relação à superfície do solo, poderia ser a respiração da vegetação

rasteira que apareceu no mês de dezembro e que, neste mês, ainda encontrava-se em estágio de desenvolvimento.

De acordo com os dados obtidos neste trabalho, infere-se que a concentração de dióxido de carbono, dentro de uma comunidade vegetal, é variável porque o  $\text{CO}_2$  participa de processos biológicos vitais. Dentre esses processos, encontra-se a fotossíntese realizada pelas plantas, que consome significativas quantidades de  $\text{CO}_2$ . Contudo, parte deste  $\text{CO}_2$  é liberada ao ambiente por meio da respiração. Conseqüentemente, no ambiente da vegetação ocorrem variações diurnas e estacionais nas taxas de  $\text{CO}_2$  da atmosfera.

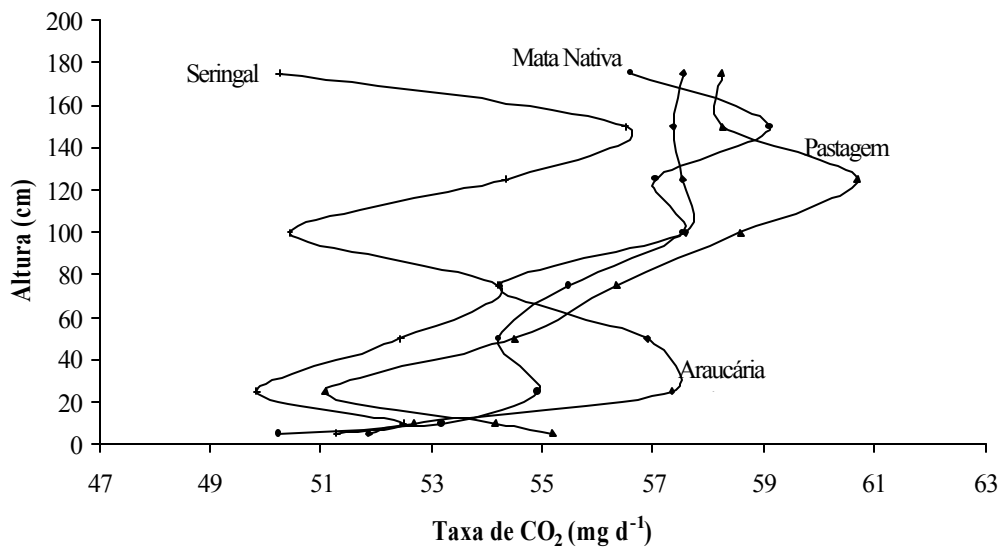


Figura 7- Perfil da taxa média de  $\text{CO}_2$  da atmosfera de diferentes coberturas vegetais, no mês de outubro de 2000.

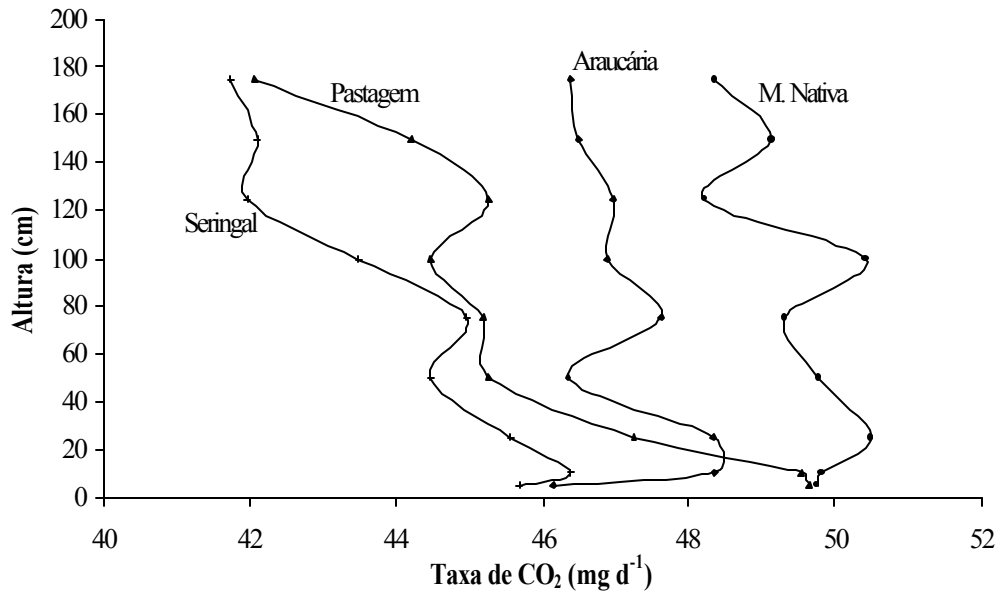


Figura 8 - Perfil da taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais, no mês de novembro de 2000.

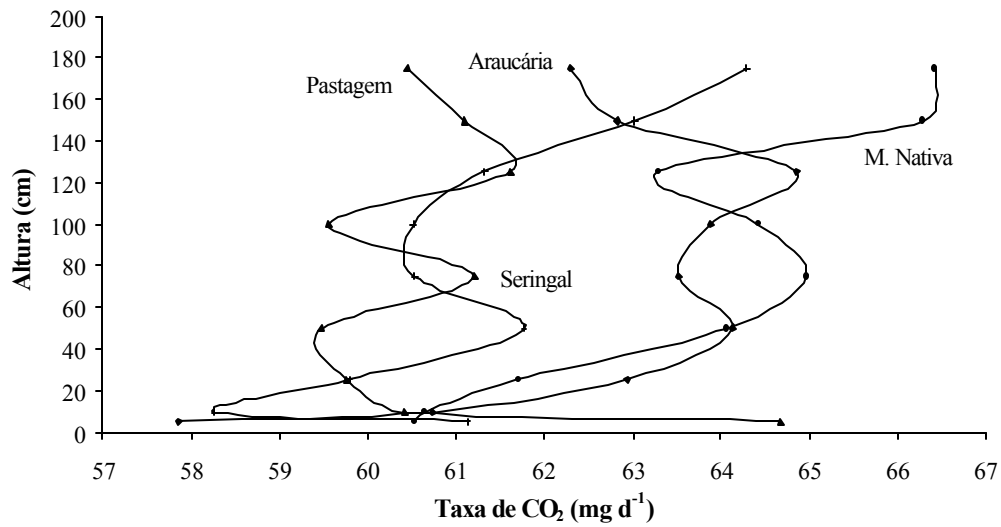


Figura 9 - Perfil da taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais, no mês de dezembro de 2000.

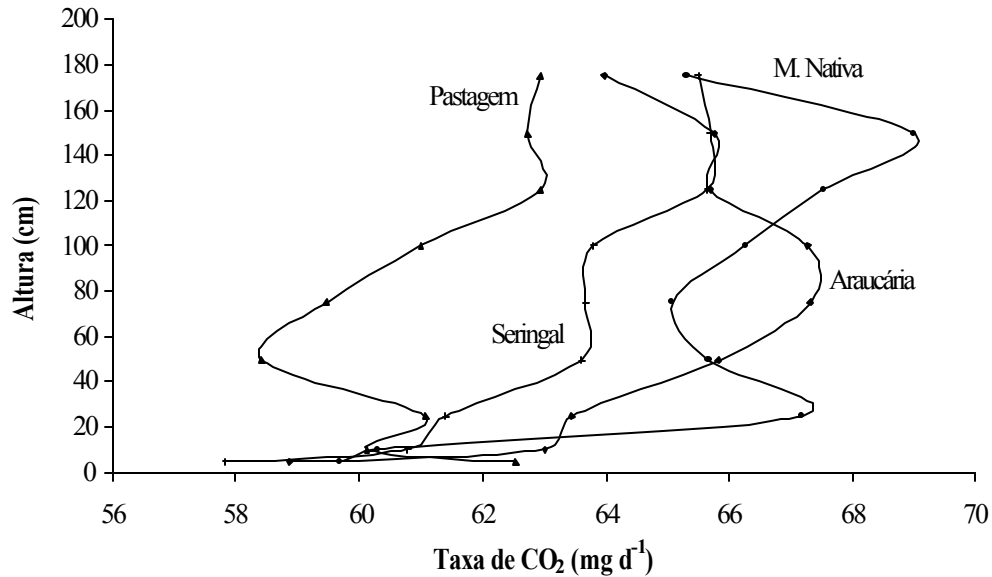


Figura 10 - Perfil da taxa média de CO<sub>2</sub> da atmosfera de diferentes coberturas vegetais, no mês de janeiro de 2000.

#### 4.2. Variação das taxas médias de CO<sub>2</sub> da atmosfera em função do tempo em áreas com diferentes coberturas vegetais

A variação das taxas médias de CO<sub>2</sub>, desde outubro de 2000 até janeiro de 2001, no ambiente das quatro coberturas vegetais, é apresentada na Figura 11.

Nas primeiras dez avaliações, que corresponde ao mês de outubro, houve um período prolongado de seca, redução da umidade relativa e elevadas temperaturas. Nesta situação, para reduzir a perda de água por meio da transpiração, a planta teria diminuído a abertura dos estômatos, diminuindo a entrada de CO<sub>2</sub> para o interior das folhas, o que reduziu a absorção deste gás pela vegetação, aumentando seu conteúdo no ambiente.

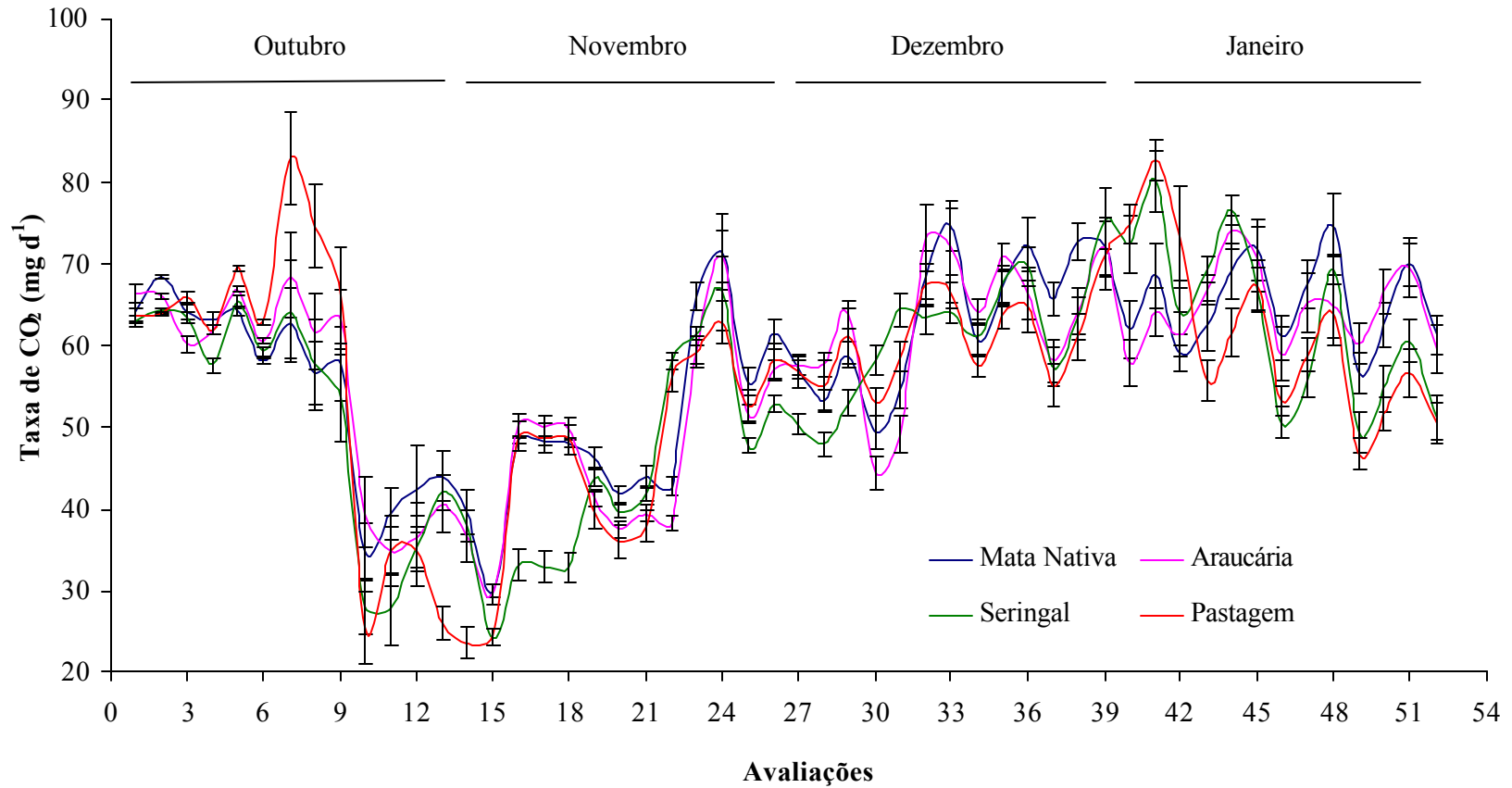


Figura 11 - Variação da taxa de CO<sub>2</sub> da atmosfera de áreas com diferentes coberturas vegetais em função do tempo. As barras indicam o intervalo de confiança a 5%, medição em 9 alturas com 3 repetições.

A maior taxa de CO<sub>2</sub> na atmosfera foi registrada no ambiente da área de pastagem, sendo obtido um valor médio de 82,5 mg d<sup>-1</sup>. Devida à arquitetura da planta, os raios do sol penetram com maior facilidade no meio, podendo atingir diretamente o solo, o que teria provocado maior perda de água em função da menor quantidade de manta orgânica que apresentou esse uso do solo (Quadro 4).

Em virtude do solo da mata nativa estar protegido com maior quantidade de manta orgânica, e os raios do sol alcançarem em menor proporção a superfície do solo, a taxa de CO<sub>2</sub> no ar atmosférico desta floresta foi menor (62,8 mg d<sup>-1</sup>) que na pastagem (82,5 mg d<sup>-1</sup>).

Na décima primeira avaliação, observou-se queda na taxa de CO<sub>2</sub> no ambiente, coincidindo com a precipitação pluvial (1,8 mm d<sup>-1</sup>) ocorrida. Embora o valor absoluto da precipitação pluvial tenha sido baixo, aparentemente esta foi capaz de induzir o aumento na absorção deste gás pela vegetação.

Pode-se deduzir que o aumento na frequência da precipitação pluvial, em novembro (entre a 14<sup>a</sup> até 26<sup>a</sup> avaliação), teria provocado o aumento da taxa fotossintética das diferentes espécies. De modo geral, o seringal deve ter sido mais eficiente, pois registrou a menor taxa de CO<sub>2</sub> no ar (44,0 mg d<sup>-1</sup>) em relação ao valor encontrado na mata nativa (49,5 mg d<sup>-1</sup>), na floresta com araucária (47,0 mg d<sup>-1</sup>) e na pastagem (45,9 mg d<sup>-1</sup>).

A baixa velocidade do vento (média de 1,30 m s<sup>-1</sup>) também poderia ter contribuído para o aumento da absorção de CO<sub>2</sub> pela vegetação, com sua conseqüente redução no ambiente.

8

Em dezembro (da avaliação 27<sup>a</sup> até a 39<sup>a</sup>), em razão da maior disponibilidade de água no solo proveniente da chuva, criaram-se condições favoráveis para a atividade microbiana, incrementando-se a evolução de CO<sub>2</sub> do solo (Figuras 12, 13, 14 e 15) fornecendo-o ao ambiente e, dessa forma, explicam-se essas maiores taxas de CO<sub>2</sub> no ambiente das diferentes coberturas vegetais.

A área de pastagem, localizada em uma encosta, foi exposta à maior velocidade do vento no mês de dezembro (1,6 m s<sup>-1</sup>), quando comparado com novembro (1,3 m s<sup>-1</sup>), causando uma rápida mistura do CO<sub>2</sub>. GARRETT et al.

(1978) confirmaram esta interpretação, indicando que, quando a velocidade do vento diminuiu de  $1,4 \text{ m s}^{-1}$  para  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , foi registrado um incremento de 29% nas taxas de  $\text{CO}_2$  da atmosfera da floresta de Oak–hickory, localizada em Missouri-EUA.

No período final do experimento (janeiro, da avaliação 40<sup>a</sup> até 52<sup>a</sup>), houve distribuição irregular de chuva. A precipitação pluvial acumulada nesse mês foi 76 mm, dos quais 70,4 mm caíram no período compreendido pelas três primeiras avaliações. A umidade relativa média do ar foi baixa (78,4%) e, nesta condição, a atmosfera recebe mais água por meio da evapotranspiração. Em resposta, a vegetação reduz a abertura estomática com a conseqüente diminuição da fixação de  $\text{CO}_2$ , mantendo-se elevadas as taxas deste gás na atmosfera.

As variações nas taxas de  $\text{CO}_2$  do ar da pastagem, no mês de janeiro (Figura 11), indicam que nesta cobertura deve ter havido maior mistura dos componentes atmosféricos. Isto aconteceu porque a altura média da vegetação (1,10 m) facilitou essa mistura no ambiente.

A amplitude nas taxas de  $\text{CO}_2$ , registrada ao longo do experimento, foi de  $44,7 \text{ mg d}^{-1}$  na mata nativa,  $44,3 \text{ mg d}^{-1}$  na floresta com araucária,  $48,1 \text{ mg d}^{-1}$  no seringal e  $59,3 \text{ mg d}^{-1}$  na pastagem. A magnitude destas taxas é mais elevada que o reportado por GARRETT et al. (1978) que foi de 21 ppm, expressos em amplitude de concentração, sendo este último resultado baseado em uma série de 30 dados (15 na primavera e 15 no verão). Esta é a principal diferença em relação a este estudo, em que os dados baseiam-se em uma série de 52 avaliações (125 dias). Quanto maior o espaço de tempo utilizado no experimento, maior deve ser a amplitude das taxas de  $\text{CO}_2$ , porque este gás é fortemente influenciado pelas condições climáticas.

### 4.3. Influência das coberturas vegetais no fluxo de CO<sub>2</sub> do solo

A diferença entre os fluxos de CO<sub>2</sub> dos tratamentos com e sem manta orgânica, sob as quatro vegetações, foi mínima (Quadro 3). Não obstante, na mata nativa e nas duas florestas (araucária e seringueira) houve maior quantidade de manta orgânica sobre o solo em relação à área com pastagem.

Nas quatro coberturas vegetais, e durante todo o período estudado, os fluxos do CO<sub>2</sub> evoluído do solo foram semelhantes entre os tratamentos com e sem manta orgânica (Figuras 12, 13, 14 e 15). Este comportamento pode estar relacionado ao prolongado período de seca, registrado nos meses de outubro e janeiro. Essa situação conduziu a um decréscimo na atividade microbiana, dificultando a detecção de diferenças entre os tratamentos com e sem manta orgânica, já que a atividade microbiana é sensível ao estresse hídrico (MEIKLE et al., 1995, GULLEDGE e SCHIMEL, 1998).

No mês de outubro, nas primeiras 6 avaliações sob as quatro coberturas vegetais (Figuras 12, 13, 14 e 15), registraram-se os menores fluxos de CO<sub>2</sub>, os quais possivelmente foram afetados pela reduzida precipitação quando comparados com aqueles obtidos no mês de novembro (Figura 5b). Os valores desses fluxos entre os tratamentos com e sem manta orgânica foram semelhantes.

Os dados obtidos no mês de outubro comprovaram que a baixa disponibilidade de água no solo restringiu a atividade microbiana, conduzindo à queda na evolução de CO<sub>2</sub>. Resultados similares foram encontrados por UCHIDA et al. (1997) em duas florestas (uma floresta de coníferas, e uma floresta mista, de coníferas e decíduas). Esses autores indicaram que a redução na umidade do solo diminuiu a produção de CO<sub>2</sub>. Contudo, RAICH (1998), determinando os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo de três florestas tropicais no Hawai, encontrou que a relação entre as taxas de respiração dos microrganismos do solo e o conteúdo de umidade não foi estatisticamente significativa, em nenhum dos locais estudados.

Quadro 3 - Média dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e desvio-padrão (sd) nos tratamentos de solo com manta orgânica (CMO) e solo sem manta orgânica (SMO), para as quatro coberturas vegetais. Em cada mês, os fluxos de CO<sub>2</sub> foram calculados a partir de treze avaliações (31 dias acumulados)

Meses	Solo	Mata nativa média ± sd	Araucária média ± sd	Seringal média ± sd	Pastagem média ± sd
Outubro	CMO	2,53 ± 0,15	2,71 ± 0,25	2,78 ± 0,20	2,57 ± 0,11
	SMO	2,31 ± 0,29	2,61 ± 0,18	2,40 ± 0,14	2,67 ± 0,21
Novembro	CMO	2,73 ± 0,15	2,66 ± 0,05	2,76 ± 0,22	2,79 ± 0,12
	SMO	2,59 ± 0,10	2,60 ± 0,05	2,56 ± 0,17	2,73 ± 0,16
Dezembro	CMO	3,47 ± 0,08	3,34 ± 0,07	3,27 ± 0,15	3,23 ± 0,12
	SMO	3,35 ± 0,07	3,32 ± 0,06	3,25 ± 0,14	3,23 ± 0,12
Janeiro	CMO	3,82 ± 0,10	4,07 ± 0,11	3,73 ± 0,14	3,70 ± 0,10
	SMO	3,68 ± 0,13	4,08 ± 0,09	3,49 ± 0,17	3,72 ± 0,11

Apesar da persistência na escassez de chuva, a partir da sétima avaliação houve aumento nos fluxos de CO<sub>2</sub>. A possível causa para este comportamento estaria relacionada à amplitude térmica (12°C), pois durante o dia registrou-se elevada temperatura (27,9°C), e à noite essa temperatura diminuiu (15,9°C). Temperaturas elevadas durante o dia e baixas durante a noite teriam incrementado a condensação da umidade do ar (orvalho), causando um aumento, ainda que superficial, na umidade do solo. Tudo indica que a quantidade de água adicionada dessa forma pode ter sido suficiente para manter a atividade biológica.

Entre a décima quarta e a vigésima sexta avaliação, correspondente ao mês de novembro (Quadro 3), nas áreas com as quatro coberturas vegetais, a tendência dos fluxos de CO<sub>2</sub> nas primeiras três avaliações foi diminuir. Esse comportamento coincidiu com alta precipitação acumulada (50,8 mm) nessas três avaliações, o que pode ter provocado uma redução na concentração de O<sub>2</sub>, que, por sua vez, promoveu redução nos fluxos de CO<sub>2</sub>. Os dados obtidos concordam

com os resultados encontrados por GOULDEN et al. (1996), que obtiveram taxas médias de fluxos de CO<sub>2</sub> de 3,8 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> em uma área mal drenada, e fluxos de 7,5 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> em uma área bem drenada. Segundo UCHIDA et al. (1997), o incremento no conteúdo de umidade do solo diminui a disponibilidade de espaço poroso para o transporte de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, os fluxos são reduzidos. Valores extremos de conteúdo de umidade no solo reduzem a eficiência da comunidade microbiana. O excesso no conteúdo de umidade prejudica os fluxos de CO<sub>2</sub>, já que eles tendem a ser reduzidos pela condição de anaerobiose e diminuição da temperatura do solo. Quando existe déficit de umidade no solo, a temperatura tende a aumentar e o fluxo de CO<sub>2</sub> a reduzir em razão da diminuição da atividade microbiana (HOWARD e HOWARD, 1993; WAGAI et al., 1998).

A distribuição homogênea da chuva, em relação às demais avaliações, gerou condições favoráveis para manter e inclusive incrementar os fluxos de CO<sub>2</sub> sob mata nativa (Figura 12), floresta de araucária (Figura 13), e área de pastagem (Figura 15). Mas, no seringal (Figura 14), na vigésima segunda avaliação, observou-se uma queda na evolução de CO<sub>2</sub> de 45,6% em relação à próxima avaliação (vigésima terceira) E esses fluxos dos tratamentos com e sem manta orgânica foram extremamente baixos e atípicos, em relação à tendência geral.

Em dezembro, desde a vigésima sétima até a trigésima nona avaliação, a distribuição de chuva foi adequada (Figura 5b), e a temperatura média do ar (23,6°C) foi amena (Figura 5a). Essas condições favoreceram para que os fluxos do CO<sub>2</sub> do solo apresentassem pequenas variações sob as quatro coberturas vegetais (Figuras 12, 13, 14 e 15). A média dos maiores fluxos de CO<sub>2</sub> na, mata nativa, foi 4,4 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, na floresta com araucária 4,3 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, no seringal 4,0 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, e na pastagem 4,0 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Em janeiro, a média da precipitação foi menor (5,8 mm d<sup>-1</sup>) que a registrada em dezembro (7,5 mm d<sup>-1</sup>), e a temperatura do ar foi relativamente elevada (24,1°C). O CO<sub>2</sub> evoluído do solo das quatro coberturas vegetais manteve-se constante e, em algumas avaliações, aumentou.

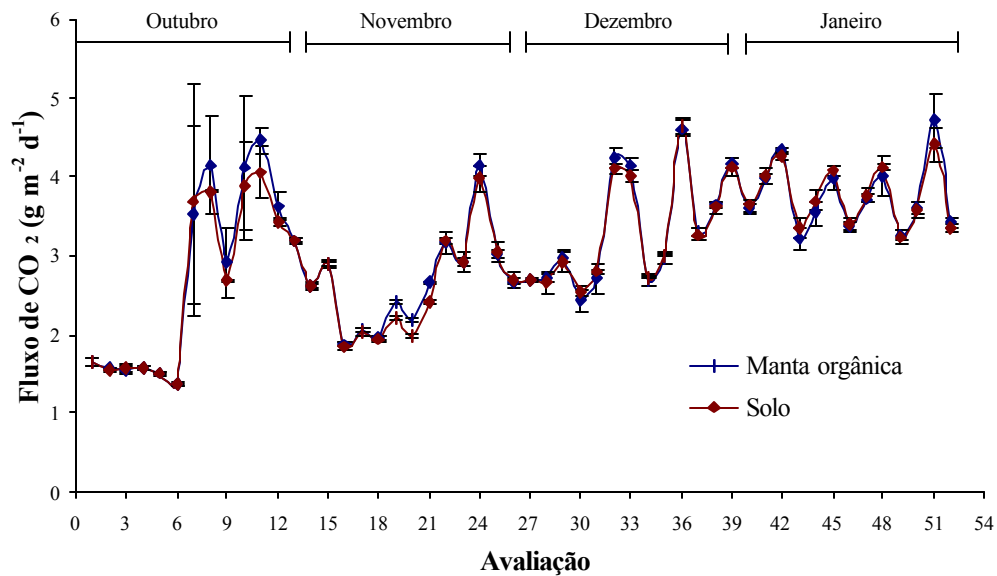


Figura 12 - Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a mata nativa.

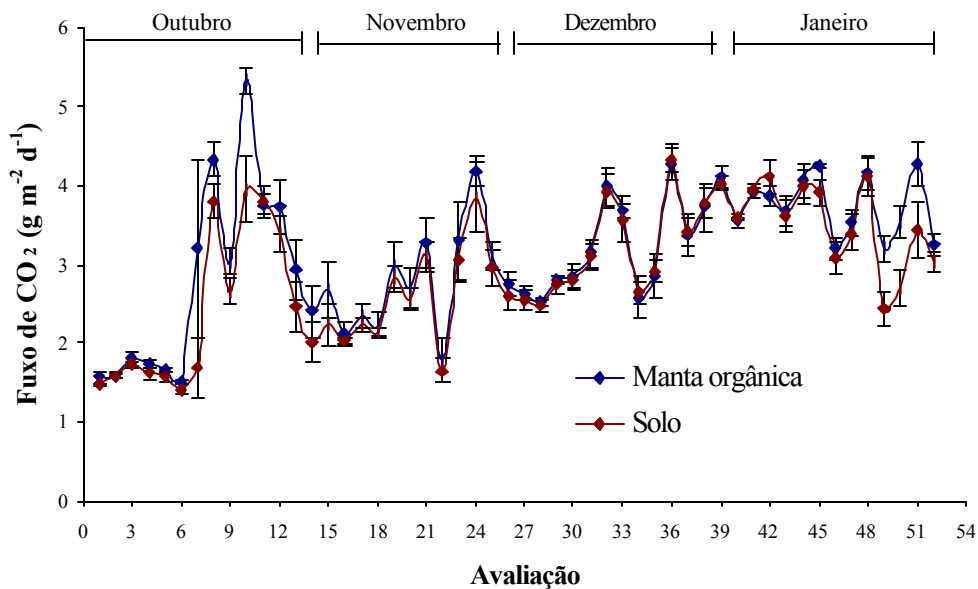


Figura 13 - Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a floresta de araucária.

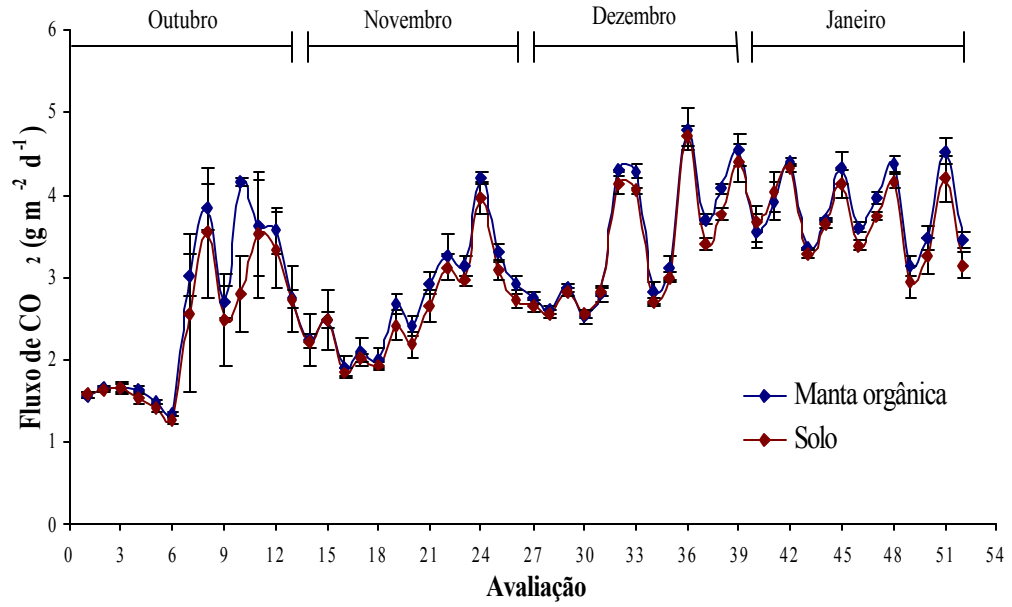


Figura 14 - Fluxos de CO<sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a floresta com seringueira.

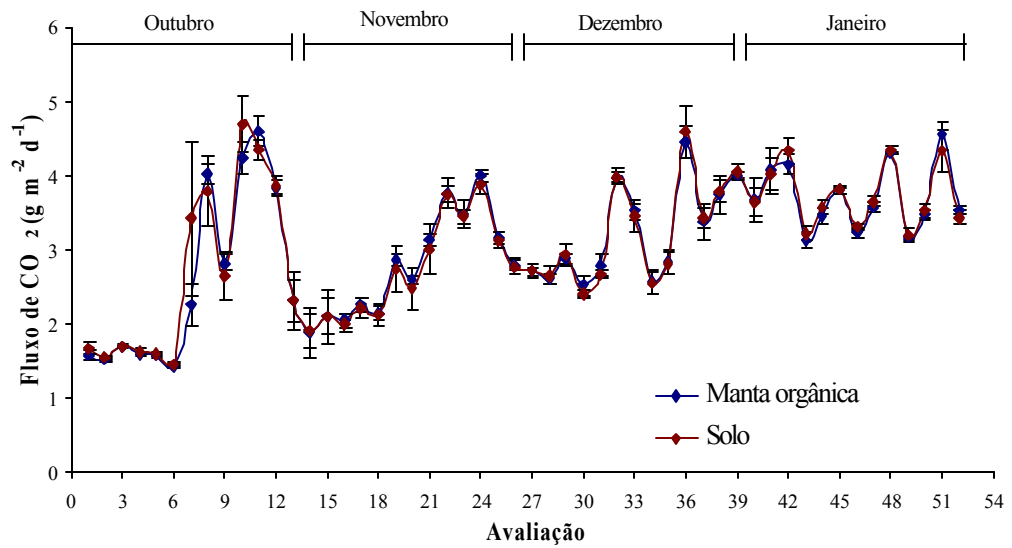


Figura 15 - Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo com manta orgânica e do solo sem manta orgânica sob a área de pastagem.

A maior parte da precipitação pluvial (70,4 mm de precipitação acumulada), ocorrida durante as primeiras quatro avaliações do mês de janeiro, aparentemente proporcionou aumento na quantidade de água armazenada no solo. Este armazenamento foi favorecido pela reduzida velocidade dos ventos ( $1,4 \text{ m s}^{-1}$ , Figura 5c) registrada após o período de chuva (quinta avaliação).

Outra possível causa para que os fluxos de  $\text{CO}_2$  do solo se mantivessem estáveis, no mês de janeiro, pode ser atribuída à amplitude térmica ( $11^\circ\text{C}$ ) registrada entre as temperaturas do dia ( $30,3^\circ\text{C}$ ) e da noite ( $19,3^\circ\text{C}$ ). O resfriamento atmosférico noturno provocou a condensação de vapor d'água atmosférico sobre a vegetação e sobre o solo (orvalho), sendo que, aparentemente, a umidade proveniente dessa fonte foi suficiente para manter a atividade microbiana.

A média dos fluxos de  $\text{CO}_2$  durante as 52 avaliações do tratamento com manta orgânica, na mata nativa, foi  $3,14 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , na araucária  $3,12 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e no seringal  $3,14 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Os valores médios dos fluxos de  $\text{CO}_2$  entre as florestas não refletiram a magnitude da variabilidade existente entre as avaliações dentro do ambiente de cada área vegetada. Contudo, essas variações estão relacionadas com a participação de outros fatores que, adicionalmente, podem ter contribuído para a existência de oscilações nos fluxos de  $\text{CO}_2$  da superfície do solo. Dentre eles, incluem-se: o conteúdo de matéria orgânica e grau de sua decomposição, a quantidade de biomassa de raízes finas, a diversidade de plantas na área vegetada e a biodiversidade da comunidade microbiana (WAGAI et al., 1998).

68

Na área de pastagem, a média dos fluxos de  $\text{CO}_2$  do solo com manta orgânica foi  $3,1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Este valor é baixo, quando comparado com os encontrados na literatura. No verão, numa pastagem em Wisconsin-EUA, WAGAI et al. (1998) encontraram fluxos do solo de  $7,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . No entanto, numa pastagem nativa em Missouri-EUA (BUYANOVSKY et al., 1987), os fluxos foram em média  $11,0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Os mais elevados valores foram gerados em uma pastagem de “tallgrass”, em Kansas, EUA, oscilando entre  $30,4$  e  $53,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (NORMAN et al., 1992).

Na mata nativa, do total de CO<sub>2</sub> produzido no solo, 51,3% foram atribuídos à respiração microbiana e o restante (48,7%) à respiração das raízes do solo. Na floresta de araucária, esses valores corresponderam, respectivamente, a 50,4% e 49,6%. No seringal, para os fluxos totais de CO<sub>2</sub>, a decomposição da manta orgânica contribuiu com 51,7 %, e o solo com 48,2%. A taxa de respiração no tratamento com manta orgânica, na pastagem, foi 49,8% e a taxa de respiração no solo foi 50,2%. Entretanto, EWEL et al. (1987b) estimaram que 62% dos fluxos anuais de CO<sub>2</sub> da superfície do solo são atribuídos à respiração das raízes do solo e os 38% restantes à decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos. Estas estimativas são as mais elevadas, exceto pela grande contribuição da respiração das raízes reportadas para locais áridos, que chegaram a 70% (CHAPMAN, 1979) e florestas decíduas que chegaram a 90% (THIERRON e LAUDELOUT, 1996). As contribuições relativas à respiração das raízes e aos microrganismos são influenciadas por muitos fatores, que variam entre locais e entre os diferentes métodos com que foram feitas as medições. A relação entre a respiração das raízes e a respiração total no solo, em várias florestas com diferentes climas, tem sido reportada variar entre 22% e 50% (BOWDEN et al., 1993). Contudo, NAKANE et al. (1983) mostraram que, quando um ecossistema florestal está em equilíbrio, a respiração das raízes contribui com 50% da respiração total no solo, independentemente do tipo de floresta, o que concorda com os percentuais encontrados neste estudo.

#### **4.4. Manta orgânica**

A manta orgânica, também denominada serapilheira, é composta por folhas, caules, cascas, ramos, frutos, flores que, após a senescência, depositam-se na superfície do solo.

A quantidade da manta orgânica, obtida nas três florestas, foi maior que na pastagem. O mesmo ocorreu quanto à quantidade total de nutrientes,

determinada na matéria seca (Quadro 4). A porção de manta orgânica da araucária foi 1,5 vezes maior que a encontrada na manta nativa, e a quantidade de macronutrientes seguiu, aproximadamente, a mesma proporção.

Quadro 4 - Quantidade de manta orgânica e nutrientes devolvidos ao solo pelas quatro coberturas vegetais

Descrição	Mata nativa	Araucária	Seringal	Pastagem
Manta orgânica (t ha <sup>-1</sup> )	8,2	12,7	6,9	3,3
Macronutrientes (kg ha <sup>-1</sup> )				
Nitrogênio	106,6	160,0	72,5	37,0
Fósforo	32,6	54,6	33,2	18,0
Potássio	274,3	387,4	252,6	108,4
Cálcio	123,8	194,9	136,6	42,2
Magnésio	12,7	22,1	13,1	6,0

A insuficiência de dados sobre a ciclagem de nutrientes, em florestas plantadas do trópico úmido, não permite uma comparação mais adequada das quantidades de manta orgânica, produzidas nas três florestas. Contudo, os resultados obtidos neste estudo são considerados altos, quando comparados àqueles obtidos para floresta de eucalipto, mata nativa e pastagem (FONSECA, 1984).

A maior ou menor quantidade de nutrientes, que retorna ao solo por meio da manta orgânica, é função, dentre outros fatores, da densidade de plantas, da composição da espécie, da época do ano, da maturidade das plantas e da atividade dos microrganismos do solo (ASHTON, 1975; ATTIWILL, 1980).

A menor massa de manta orgânica da seringueira, comparada com araucária,

possivelmente esteja associada à menor densidade de folhagem e à produção de biomassa. Além disso, a presença de um sub-bosque desenvolvido na parte baixa, dentro da floresta de araucária, teria contribuído para o aumento na massa de material orgânico.

A menor quantidade de nutrientes imobilizados na manta orgânica da mata nativa, em relação à araucária, assim como o menor peso de matéria seca por hectare, resulta, provavelmente, da maior heterogeneidade na serapilheira dessa unidade e maior velocidade de decomposição da manta orgânica.

Diferenças consideráveis nas quantidades de cálcio e nitrogênio da matéria seca foram detectadas entre as coberturas vegetais, observando-se o menor valor na pastagem. Nas três florestas, a quantidade de fósforo, potássio e magnésio permaneceu relativamente próximas; entretanto, a pastagem apresentou os menores valores de fósforo, potássio e magnésio.

A quantidade de nutrientes na manta orgânica das coberturas florestais foi superior às quantidades apresentadas na pastagem (Quadro 4). Esta diferença sugere que a heterogeneidade da vegetação, associada às características químicas do solo, tenha grande influência na composição da manta orgânica.

O elevado conteúdo de nitrogênio da manta orgânica, na araucária e mata nativa, pode ser atribuído à presença de espécies da família leguminosa na vegetação da mata nativa, e ao abundante sub-bosque na floresta de araucária. Aparentemente, a importância do sub-bosque baseia-se no fato de que ele pode suprir mais adequadamente o nitrogênio para o desenvolvimento vegetal.

Ecossistemas que atingiram o equilíbrio entre a absorção e o retorno de nutrientes ao solo têm grande parte das necessidades nutricionais das plantas supridas pelo processo de ciclagem. Para manter o estado de equilíbrio alcançado pelas florestas estudadas, devem ser evitadas práticas inadequadas no manejo da vegetação, que possam aumentar a velocidade de decomposição, ou mesmo destruir a manta orgânica.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado na região de Viçosa, Minas Gerais, em quatro coberturas vegetais, sendo uma mata nativa, duas florestas plantadas, uma com araucária e outra com seringueira, e uma área de pastagem. Objetivou-se determinar o perfil vertical das taxas de CO<sub>2</sub> do ar atmosférico, avaliar as variações temporais dessas taxas dentro e entre os ecossistemas, e quantificar os fluxos de CO<sub>2</sub> provenientes da respiração da microbiota e das raízes do solo.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

Condições adversas como estresse hídrico, elevada temperatura do ar e baixa umidade relativa limitam a absorção de CO<sub>2</sub> pela vegetação, incrementando a taxa deste gás no ambiente.

O perfil vertical das taxas de CO<sub>2</sub> no ar, varia em função das condições microclimáticas no ambiente das diferentes coberturas vegetais.

A arquitetura das plantas da pastagem facilitou maior mistura de CO<sub>2</sub> ao ar, o que provocou maior diminuição com a altura em relação à superfície do solo.

O aumento da frequência de precipitação pluvial promoveu condições favoráveis para o aparecimento de plantas, que formaram um sub-bosque sob a

mata nativa e sob as duas florestas plantadas, que contribuíram para o aumento das taxas de  $\text{CO}_2$  no ar em virtude da elevada taxa de respiração que apresentam nas primeiras etapas de desenvolvimento.

As diferenças dos fluxos de  $\text{CO}_2$  na superfície do solo, sob diferentes coberturas vegetais é, em grande parte, o resultado dos efeitos indiretos da manta orgânica sobre características como temperatura do solo, biomassa microbiana e quantidade de massa de raízes finas.

Os resultados indicaram que a inadequada distribuição da precipitação pluvial, registrada em grande parte do período do experimento, ocasionou um insuficiente conteúdo de umidade no solo, limitando a atividade microbiana com a conseqüente redução nos fluxos de  $\text{CO}_2$  da manta orgânica, em todas as coberturas vegetais.

A taxa de  $\text{CO}_2$  da atmosfera das diferentes coberturas vegetais, associada à respiração de microrganismos do solo, mostrou variações em resposta aos fatores climáticos.

A metodologia utilizada neste estudo, que envolve o uso de uma solução alcalina de NaOH para absorver o  $\text{CO}_2$  do ambiente, é rápida, prática e dispensa o uso de equipamentos sofisticados, podendo ser utilizada na quantificação do  $\text{CO}_2$  atmosférico próximo à superfície do solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHONEN, T.; ALTO, P.; RANNIK, Ü.; KULMALA, M.; NILSSON, D. E.; PALMROTH, S.; YLITALO, H.; HARI, P. Variations and vertical profiles of trace gas and aerosol concentrations and CO<sub>2</sub> exchange in eastern Lapland. **Atmospheric Environment**. v. 31, p. 3351-3362, 1997.
- ALLEN, L. H. Carbon dioxide concentration over an agricultural field. **Agricultural Meteorology**. v. 8, p. 5-24, 1971.
- AMTHOR, J. S. Plant respiratory responses to the environment and their effects on the carbon balance. **Plant-environment interactions**. Ed. By Robert E. Wilkinson, The University Georgia Griffin, Georgia. p. 501-540, 1994.
- ANTHONI, P. M.; LAW, B. E.; UNSWORTH, M. H. Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 95, p. 151-168, 1999.
- ASHTON, D. H. Studies of litter in *E. regnant* forest. **Australian Journal Botany**. v.23, p. 413-433, 1975.
- ATTIWILL, P. M. Nutrient cycling in *E. oblicua* (L'Hérit) forest. IV – Nutrient uptake and nutrient return. **Australian Journal Botany**. v. 28, p. 199-222, 1980.
- BALDOCCHI, D. D.; VERMA, S. B., ROSENBERG, N. J. Seasonal and diurnal variation in the CO<sub>2</sub> flux and CO<sub>2</sub>-water flux ratio of alfalfa. **Agricultural Meteorology**. v. 23, p. 231-244, 1981a.

- BALDOCCHI, D. D.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Environmental effects on the CO<sub>2</sub> flux and CO<sub>2</sub>-water flux ratio of alfalfa. **Agricultural Meteorology**. v. 24, p.175-184, 1981b.
- BALDOCCHI, D.D. A comparison study of mass and energy exchange over a closed (wheat) and an open (corn) canopy. II: CO<sub>2</sub> exchange and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 67, p. 291-321, 1994.
- BALDOCCHI, D. D.; VOGEL, C. A.; HALL, B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine Forest. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 83, p. 147-170, 1997.
- BAZZAZ, F. A.; McCONNAUGHAY, K. D. M. Plant-plant interactions in elevated CO<sub>2</sub> environments. **Australian Journal of Botany**. v. 40, p. 547-563, 1992.
- BOWDEN, R. D.; NADELHOFFER, K. J.; BOONE, R. D.; MELILLO, J. M.; GARRISON, J. B. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. **Canadian Journal Forest Res**. v. 23, p. 1402-1407, 1993.
- BRAGA, J. M., DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo com extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**. v. 21, n. 113, p. 73-85, 1974.
- BRIDGE, B. J.; MOTT, J. J.; HARTIGAN, R. J. The formation of degraded areas in dry savanna woodlands of northern Australia. **Australian Journal Soil Research** v. 21, p. 91-104, 1983.
- BUCHMANN, N.; EHLERINGER, J. R. CO<sub>2</sub> concentration profile, and carbon and oxygen isotopes in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> crop canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 89, p. 45-58, 1998.
- BUTTERFIELD, R. E.; MORISON, J. I. L. Modelling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 62, p. 241-261, 1992.
- BUYANOVSKY, G. A.; KUCERA, C. L.; WAGNER, G. H. Comparative analyses of carbon dynamics in native and cultivated ecosystem. **Ecology**. v. 68, p. 2023-2031, 1987.
- CHAPMAN, S. B. Some interrelationships between soil and root respiration in lowland Calluna heathland in southern England. **Journal Ecology**. v. 67, p. 1-20, 1979.

- CURE, J. D.; ACOCK, B. Crop responses to carbon dioxide doubling—a literature survey. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 38, p.12-145, 1986.
- DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. S. Gas diffusivity and production of CO<sub>2</sub> in deep soils of the eastern Amazon. **Tellus**. v. 47B, p. 550-565, 1995.
- DEVITO, A. S.; MILLER, D. R. Some effects of corn and oak forest canopies on cold air drainage. **Agricultural Meteorology**. v. 29, p. 39-55, 1983.
- DÖRR, H.; MÜNNICH, K. O. <sup>222</sup>Rn flux and soil air concentration profile in West-Germany, Soil <sup>222</sup>Rn as tracer for gas transport in the unsaturated soil zone. **Tellus**. v. 42B, p. 20-28, 1990.
- DUGAS, W.A.; HEUER, M.L.; MAYEUX, H.S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 93, p. 121-139, 1999.
- EAMUS, D.; JARVIS, P. G. The direct effects of increase in the global atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on natural and commercial temperate forests and trees. **Adv. Ecol. Res.** v.19, p. 1-55, 1989.
- EDWARDS, N. T. The use of soda-lime for measuring respiration rates in terrestrial systems. **Pedobiologia**. v. 23, p. 321-330, 1982.
- EDWARDS, N. T.; SOLLINS, P. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. **Ecology**. v. 54, p. 406-412, 1973.
- ESPOSTI, D. M. D. **Adubação e nutrição nitrogenada de porta-enxertos de citros produzidos em citrovassos**. Viçosa-MG. UFV, 2000, 95 p. (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- 97 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA **Manual de métodos de análise de solo**. 2<sup>a</sup> edição. Centro Nacional de Pesquisa de solos. Rio de Janeiro. 212 p. 1997.
- EWEL, K. C.; CROPPER, W. P. Jr.; GHOLZ, H. L. Soil CO<sub>2</sub> evolution in Florida slash pine plantation. II. Importance of root respiration. **Canadian Journal Forest Research**. v. 17, p. 325-329, 1987.
- FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. A model for soil CO<sub>2</sub> production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 95, p. 225-236, 1999.

- FERNANDEZ, I. J.; SON Y.; KRASKE, C. R.; RUSTAD, L. E.; DAVID, M. B. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. **Soil Science Society of America Journal**. v. 51, p. 1115-1121, 1993.
- FONSECA, S. **Propriedades físicas, químicas e microbiológicas de um Latossolo Vermelho Amarelo sob eucalipto, mata natural e pastagem**. Viçosa-MG. UFV, 1984, 68 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, 1984.
- GARRETT, H. E.; COX, G. S.; ROBERTS, J. E. Spatial and temporal variations in carbon dioxide concentrations in an Oak-Hickory forest Ravine. **Forest Science**. v. 24, n. 2, p. 180-190, 1978.
- GOLDSTEIN, A. H.; HULTMAN, N. E.; FRACHEBOUD, J. M.; BAUER, M. R.; PANEK, J. A.; XU, M.; QI, Y.; GUENTHER, A. B.; BAUGH, W. Effects of climate variability on the carbon dioxide, water, and sensible heat fluxes above a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada (CA). **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 101, p. 113-129, 2000.
- GOULDEN, M. L.; MUNGER, J. W.; FAN, S. M.; DAUBE, B. C.; WOFSY, S. C. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability. **Science**. v. 271, p. 1576-1578, 1996.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; McINTYRE, J.; MIRANDA, A. C.; MEIR, P.; MIRANDA, H. S.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science**. v. 270, p. 778-780, 1995.
- GULLEDGE, J. E.; SCHIMEL, J. P. Moisture control over atmospheric CH<sub>4</sub> consumption and CO<sub>2</sub> production in diverse Alaskan soils. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 30, p. 1127-1132, 1998.
- HOLLINGER, D.Y.; KELLINHER, F. M.; BYERS, J. N.; HUNT, J. E.; McSEVENY, T.; WEIR, P. L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. **Ecology**. v. 75, p. 134-150, 1994.
- HOWARD, D. M.; HOWARD, P. J. A. Relationships between CO<sub>2</sub> evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 25, p. 1537-1546, 1993.
- JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. **Analytical methods for use in plant analysis**. Los Angeles: University of California, 1959. p.32-33, (Bulletin, 766).

- KICKERT, R. N.; KRUPA, S. V. Forest response to O<sub>3</sub> and global change. **Environmental Pollution**. v. 68, p. 29-65, 1990.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. Conseqüências do efeito estufa. In: **Queimadas na Amazônia e o efeito estufa**. São José dos Campos, SP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), p.78-83, 1992.
- LAW, B. E.; BALDOCCHI, D. D.; ANTHONI, P. M. Below-canopy and soil CO<sub>2</sub> fluxes in a ponderosa pine forest. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 94, p. 171-188, 1999.
- LEAL, M. L. S. **Variação sazonal do fluxo e da concentração de CO<sub>2</sub> na região leste da floresta amazônica – PA**. Viçosa-MG. UFV, 2000, 37 p. (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- LEE, X.; BLACK, T. A.; den HARTOG, G.; MEUMANN, H. H.; NESIC, Z.; OLEJNIK, J. Carbon dioxide exchange and nocturnal processes over a mixed deciduous forest. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 81, p. 13-29, 1996.
- MARTINS, D. **Variações naturais da concentração de CO<sub>2</sub> e da razão isotópica <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C no ar atmosférico**. Piracicaba, São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 115 p., 1981, Tese de Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura.
- MEIKLE, A.; SOHEILA, A. H.; GLOVER, A. L.; KILLHAM, K.; PROSSER, J. I. Matric potential and the survival and activity of a *Pseudomonas fluorescens* inoculum in soil. **Soil Biology Biochemistry**. v. 27, p. 881-892, 1995.
- MONCRIEFF, J. B.; FANG, C. A model for soil CO<sub>2</sub> productions and transport 2: Application to a Florida *Pinus Elliotte* plantation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 95, p. 237-256, 1999.
- NAKANE, K.; YAMAMOTO, M.; TSUBOTA, H. Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. **Journal Ecology**. v. 33, p. 397-408, 1983.
- NORMAN, J. M.; GARCIA, R.; VERMA, S.B. Soil surface CO<sub>2</sub> fluxes and the carbon budget of a grassland. **Journal of Geophysical Research**. v. 97, p. 18845-18853, 1992.
- PEARMAN, G. I.; GARRATT, J. R. Carbon dioxide measurements above a wheat crop, 1. Observation of vertical gradients and concentrations. **Agricultural Meteorology**. v. 12, p. 13-25, 1973.

- POORTER, H.; GIFFORD, M. R.; KRIEDEMANN, E. P.; WONG, CH. S. A quantitative analysis of dark respiration and carbon content as factors in the growth of plants to elevated CO<sub>2</sub>. **Australian Journal Botany**. v. 40, p. 501-513, 1992.
- POST, M. W.; PENG, T. H.; EMANUEL, R. W.; KING, W. A.; DALE, H. V.; DeANGELIS, L. D. The global carbon cycle. **American Scientist**. v. 78, p. 310-326, 1990.
- PRICE, D. T.; BLACK, T. A. Effects of short-term variation in weather on diurnal canopy CO<sub>2</sub> flux and evaporation of juvenile Douglas-fir stand. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 50, p. 139-158, 1990.
- RAICH, J. W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests. **Forest Ecology and Management**. v. 107, p. 309-318, 1998.
- RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**. v. 44B, p. 81-99, 1992.
- REEKIE, E. G.; BAZZAZ, F. A. Phenology and growth in four annual species grown in ambient and elevated CO<sub>2</sub>. **Canadian Journal of Botany**. v. 69, p. 2475-2488, 1992.
- REICOSKY, D. C. Diurnal and seasonal trends in carbon dioxide concentrations in corn and soybeans canopies as affected by tillage and irrigation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 48, p. 285-304, 1989.
- ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTY, E.; LESSARD, R. Measurement of crop net carbon dioxide exchange rate in soybean. **21st AFM Conference on Agricultural and Forest Meteorology**. p. 259-260, 1994.
- ROSENBERG, N. J.; VERMA, S. B. A system and program for monitoring CO<sub>2</sub> concentration, gradient, and flux in an agricultural region. **Agronomy Journal**. v. 68, p. 414-418. 1976.
- ROSS, J.; SULEV, M.; SAARELAID, P. Statistical treatment of the PAR variability and its application to willow coppice. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 91, p.1-21, 1998.
- SCHLENTNER, R. E.; VAN CLEVE, K. Relationships between CO<sub>2</sub> evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. **Canadian Journal Forest Research**. v. 15, p. 97-107, 1985.

- SKELLY, J. M.; FREDERICKSEN, T. S.; SAVAGE, J. E.; SNYDER, K. R. Vertical gradients of ozone and carbon dioxide within a deciduous forest in central Pennsylvania. **Environmental Pollution**. v. 94, n. 2, p. 235-240, 1996.
- SCHULZE, E. D. Soil respiration of tropical vegetation types. **Ecology**. v. 48, n. 4, p. 652-653, 1977.
- TANS, P. P.; FUNG, I. Y.; TAKAHASHI, T. Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. **Science**. v. 247, p. 1431-1438, 1990.
- TAYLOR, J. A.; LLOYD, J. Source and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Australian Journal of Botany**. v. 40, p. 407-418, 1992.
- THIERRON, V.; LAUDELOUT, H. Contribution of root respiration total CO<sub>2</sub> efflux from the soil of a deciduous forest. **Canadian Journal Forest Res.** v. 26, p. 1142-1148, 1996.
- TESAROVÁ, M.; GLOSER, J. Total CO<sub>2</sub> output from alluvial soils with two types of grassland communities. **Pedobiologia**. v. 16, p. 364-372, 1976.
- UCHIDA, M.; NOJIRI, Y.; SAIGUSA, N.; OIKAWA, T. Calculation of CO<sub>2</sub> flux from forest soil using <sup>222</sup>Rn calibrated method. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 87, p. 301-311, 1997.
- VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Vertical profile of carbon dioxide in stable stratification. **Agricultural Meteorology**. v. 16, p. 359-369, 1976.
- VESALA, T.; MARKKANEN, T.; PALVA, L.; SIIVOLA, E.; PALMROTH, S.; HARI, P. Effect of variations of PAR on CO<sub>2</sub> exchange estimation for Scots pine. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 100, p. 337-347, 2000.
- WAGAI, R.; BRYE, K. R.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.; BUNDY, L. G. Land use and environmental factors influencing soil surface CO<sub>2</sub> flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. **Soil Biology Biochemistry**. v.30, p. 1501-1509, 1998.
- WITKAMP, M. Rates of carbon dioxide evolution from the forest floor. **Ecology**. v. 47, p. 492-504, 1966.
- WOFSY, S. C.; GOULDEN, M. L.; MUNGER, W.; FAN, S. M.; BAKWIN, P. S.; DAUBE, B. C.; BASSOW, S. L.; BAZZAZ, F. A. Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. **Science**. v. 260, p. 1314-1317, 1993.

**XU, L. K.; MATISTA, A. A.; HSIAO, T. C. A technique for measuring CO<sub>2</sub> and water vapor profile within and above plant canopies over short periods. Agricultural and Forest Meteorology. v. 94, p. 1-12, 1999.**

**ZENG, P.; TAKAHASHI, H. A first-order closure model for the wind flow within and above vegetation canopies. Agricultural and Forest Meteorology. v. 103, p. 301-313, 2000.**