

PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS NAS TAXAS DE RESPIRAÇÃO DE  
SOLOS EM FLORESTA TROPICAL DA AMAZÔNIA ORIENTAL

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do Programa em  
Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2009

PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS NAS TAXAS DE RESPIRAÇÃO DE  
SOLOS EM FLORESTA TROPICAL DA AMAZÔNIA ORIENTAL

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do Programa em  
Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

APROVADA: 29 de julho de 2009

---

Prof. Hernani José Brazão Rodrigues

---

Pesq. Antonio José Steidle Neto

---

Pesq. Ana Cláudia Mendes Malhado

---

Prof. Edson Luis Nunes

---

Prof. José Maria Nogueira da Costa

(Orientador)

A minha mãe Teresinha, fonte de carinho, amor e conforto.

DEDICO

A Elciany e Emanuelle, pelo companheirismo, amor e alegrias juntos.

OFEREÇO

## AGRADECIMENTOS

A DEUS e meu anjo da guarda pela presença em todos os momentos de minha vida.

A minha mãezinha querida, pelo estímulo, pelo amor e carinho, sempre presente, mesmo distante, com palavras de conforto e força.

A minha esposa e companheira Elciany e minha filha “baby” Emanuelle pela alegria e apoio quando precisei.

A minha tia Maria pelas ajudas e carinho quando mais precisei.

A família Faria pelo apoio e incentivo nos meus estudos desde pré-vestibular

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq) e a À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo.

Ao professor José Maria, pela orientação e amizade.

Aos conselheiros Antônio Lola e Luiz Aragão, pelas sugestões e amizade durante as campanhas de campos.

Aos Membros da Banca Examinadora, pelas pertinentes críticas e sugestões apresentadas.

Aos meus colegas de curso, na pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelo apoio e incentivo.

A Graça, secretária da pós, exemplo de competência e eficiência de solucionar nossos problemas.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG pelas oportunidades proporcionadas, e aos que participaram das atividades de campo na Estação Científica Ferreira Penna – ECFPn em Caxiuanã,

Aos projetos ESECAFLOR/LBA, PAN-AMAZÔNIA/PARAMA e TEAM, pelas oportunidades de intercâmbios científicos e bolsas de pesquisas.

Aos amigos da EBP e companheiros de campo Antonio Lola (BL), Alan Braga (CG), João Athaydes (CP), Rafael Costa (CA), Daniel Metcalfe, Luiz Aragão, Yadvinder Malhi, Patrick Meir, Rose Fisher, Samuel Almeida (Tá pai), Almir (Arakem) pelos ensinamentos e aos funcionários de ECFPn.

Aos que compartilharam as inúmeras viagens e estadas na ECFPn: Teobaldo (Téo), Araquém, Cuquinha, Dedé (*In memoriam*), Guanabara, Gemaque, Macaquinho, Martins, Tufão, Paulo (onze meia). E os aos amigos do Barco Leão do Marajó em especial ao Miguel e Marcelo pela paciência nas horas do tecnobrega no bar.

A todos que em algum instante contribuíram para a minha formação até a realização deste trabalho e formação pessoal, valeu!

## **BIOGRAFIA**

PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES, filho de José Ribamar Lopes Gonçalves e Teresinha de Jesus Pereira Lopes, nasceu em 15 de janeiro de 1975, em Belém, no Estado do Pará.

Em abril de 2003, graduou-se em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém, Pará.

Em março de 2008, iniciou o Curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola, área de concentração em micrometeorologia de ecossistemas, na UFV, submetendo-se à defesa de dissertação em 29 de julho de 2009.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	6
2.1 Ciclo e dinâmica do carbono nos ecossistemas.....	6
2.2 Dinâmica do carbono nos solos da Amazônia.....	9
2.3 Influência da temperatura nas taxas de respiração do solo.....	12
2.4 Influência da umidade na respiração do solo.....	12
2.5 Fase gasosa do solo.....	13
2.6 Fluxo de CO <sub>2</sub> do solo e respiração do solo.....	14
2.7 Liteira e matéria orgânica.....	15
2.8 Metodologias de medida do fluxo de CO <sub>2</sub> do solo.....	17
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	19
3.1 Base e Análise de dados.....	19
3.2 Descrição da área e coleta de dados.....	19
3.2.1 Local do experimento.....	19
3.2.2 Desenho experimental.....	21
3.2.3 Vegetação.....	21
3.2.4 Clima.....	22
3.2.5 Dados Meteorológicos.....	22
3.2.6 Respiração do solo.....	23
3.2.7 Produção de liteira.....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	25
4.1 Variação sazonal dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo.....	25
4.2 Variação horária dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo em um dia na estação chuvosa e na estação menos chuvosa.....	30
4.3 Influência da temperatura do solo com os fluxos de CO <sub>2</sub> do solo.....	32
4.4 Influência da umidade do solo nos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo.....	33
4.5 Influência da liteira nos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo.....	34
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	36
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	37

## LISTA DE FIGURAS

		Página
1	Ciclo global de carbono com estoques	8
2	Localização da FLONA de Caxiuanã	20
3	Localizações das parcelas e estações meteorológicas automáticas	20
4	Localizações das subparcelas	21
5	Coleta de dados em uma estação meteorológica automática	22
6	Medição de respiração do solo no campo com o analisador de gás CO <sub>2</sub> e Câmara de respiração do solo	23
7	Aparato coletor de liteira	24
8	Variação sazonal dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo	25
9	Alocação de carbono no solo	27
10	Variação mensal da precipitação e dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo em áreas de LA e TP	28
11	Variação horária dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo, em um dia típico da estação chuvosa e da estação menos chuvosa, na parcela de LA	31
12	Distribuição horária dos fluxos de CO <sub>2</sub> do solo, na parcela de LA	32
13	Variação horária dos fluxos de CO <sub>2</sub> e temperatura do solo em um dia do mês de abril, na parcela LA	33
14	Variação horária dos fluxos de CO <sub>2</sub> e temperatura do solo em um dia do mês de agosto, na parcela LA	33
15	Variação horária dos fluxos de CO <sub>2</sub> e umidade do solo em um dia do mês de agosto	34
16	Produção de liteira e fluxo de CO <sub>2</sub> no LA	35
17	Produção de liteira e fluxo de CO <sub>2</sub> na TP	35

## LISTA DE TABELA

		Página
1	Estoque global de carbono na vegetação e no solo	9
2	Estudos realizados de fluxos de CO <sub>2</sub> do solo na região Amazônica	26
3	Médias de fluxos de CO <sub>2</sub> temperatura do solo (Estação chuvosa)	29
4	Médias de fluxos de CO <sub>2</sub> temperatura do solo (Estação menos chuvosa)	29
5	Médias de fluxos de CO <sub>2</sub> temperatura e umidade do solo	30

## RESUMO

GONÇALVES, Paulo Henrique Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009. **Influência de variáveis biofísicas nas taxas de respiração de solos em floresta tropical da Amazônia oriental.** Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Co-Orientadores: Antônio Carlos Lola da Costa e Luiz Eduardo de Oliveira e Cruz de Aragão.

A floresta tropical amazônica tem grande diversidade biológica e está entre os mais complexos ecossistemas florestais do planeta. Qualquer sistema florestal é composto por componentes físicos (climáticos, edáficos, topográficos entre outros) e por componentes biológicos (animais e plantas). A interdependência entre esses componentes dificulta a compreensão do funcionamento do sistema como um todo. Apesar da floresta amazônica ser a maior reserva contínua de floresta tropical úmida do mundo, ainda há pouco entendimento sobre o seu funcionamento, particularmente em relação ao ciclo do carbono. Pesquisas recentes têm demonstrado a importância do carbono no solo como estoque, fonte e potencial sumidouro de CO<sub>2</sub>. Todavia, poucos estudos experimentais têm sido realizados sobre a quantificação desses fluxos e suas variações sazonais associadas com variáveis biofísicas que influenciam a magnitude desses fluxos. Os objetivos deste trabalho são: Analisar as variações sazonais das taxas de respiração na superfície do solo com liteira em áreas de terra preta (TP) e de latossolo amarelo (LA); Identificar a relação de dependência das taxas de respiração na superfície do solo com a precipitação pluvial, temperatura do solo, umidade do solo e produção de liteira; Comparar as estimativas de carbono alocado no solo entre as áreas de TP e de LA. Os resultados evidenciam uma variação sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, tanto nas áreas de LA como nas áreas de terra preta, em resposta à sazonalidade observada no regime pluviométrico, e da temperatura e umidade do solo. As magnitudes dos fluxos de CO<sub>2</sub> variaram de 1,52 a 3,98  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e média de  $2,84 \pm 0,20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  em LA e em TP os fluxos variaram de 1,95 a 5,73  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e média de  $3,73 \pm 0,35$ . A precipitação pluvial nesses períodos foi de 37 mm em agosto e 373 mm em abril. A temperatura média do solo próximo à superfície, nos meses de agosto e abril, variou de 25,4° C a 23,9° C, respectivamente, enquanto a umidade do solo variou de 12,5 % a 21,5 %



para os respectivos períodos. As maiores magnitudes dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, de um modo geral, ocorreram no período chuvoso em ambas as áreas experimentais. Os fluxos horários de CO<sub>2</sub> na área de LA em agosto (menos chuvoso) apresentaram pequena variação entre o período diurno e noturno, enquanto em abril (chuvoso) a variação nos fluxos foi bem mais acentuada. Os resultados desse trabalho indicam uma maior alocação de C na TP em relação a LA, provavelmente pela maior quantidade de matéria orgânica na superfície do solo.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Paulo Henrique Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2009. **Influence of biophysical variables on the respiration rates of soil in the oriental tropical Amazon forest.** Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-Advisers: Antônio Carlos Lola da Costa and Luiz Eduardo de Oliveira e Cruz de Aragão.

The Amazon rainforest has great biological diversity and it is among the most complex forest ecosystems of the planet. Any forest system is composed of physical components (climatic, edaphic, topographical and among others) and by biological components (animals and plants). Because of the interdependence of these components it is difficult to understand the functioning of the system as a whole. Despite the Amazon forest being the largest continuous reserve of tropical rainforest in the world, there is still little understanding about its functioning, particularly in relation to the carbon cycle. Recent studies have demonstrated the importance of carbon stocks in the soil as a source and potential sink of CO<sub>2</sub>. However, few experimental studies have been conducted on the quantification of these fluxes and their seasonal variations associated with biophysical variables that influence the magnitude of these fluxes. The objectives of this study are: a) To analyze the seasonal variations of soil rates of respiration with litter in areas of black soil (TP) and yellow Oxisol (LA); b) To identify the function of dependency between the soil respiration rates at the soil surface, with soil temperature, soil moisture and litter production; c) To make a comparison of flux estimates of soil allocated carbon in sites of black soil and yellow Oxisol. The results showed a seasonal variation of the flux soil CO<sub>2</sub>, the sites of yellow oxisol and black soil in fluxes in both response to the observed seasonality in rainfall, soil temperature and soil moisture. The magnitudes of the CO<sub>2</sub> fluxes in the LA site ranged from 1.52 to 3.98  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  with an average of  $2.84 \pm 0.20 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  in LA, while the CO<sub>2</sub> fluxes in the TP site ranged from 1.95 to 5.73  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  and with an average of  $3.73 \pm 0.35 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . The rainfall in these periods was 37 mm in August and 373 mm in April. The average temperature near the soil surface, in August and April, were 25.3° C and 23.9° C, respectively, while soil moisture ranged from 12.5 % to 21.5 % in respective months. The magnitudes of soil CO<sub>2</sub> fluxes, in general, were

greater in the rainy season in both experimental sites. The hourly fluxes of soil CO<sub>2</sub> in the LA site showed little variation between daytime and night, time in august while in April (rainy season) there was evidence of a diurnal variation. The results of this study indicate a greater allocation of C in TP site compared to the LA site.

## 1. INTRODUÇÃO

A floresta tropical amazônica possui altíssima diversidade biológica e está entre os mais complexos ecossistemas florestais do planeta. Qualquer sistema florestal é composto por componentes físicos (climáticos, edáficos, topográficos entre outros) e por componentes biológicos (animais e plantas). Segundo Moscovich (2004), a interdependência entre esses componentes dificulta a compreensão do funcionamento do sistema como um todo.

A Amazônia, devido sua localização e dimensão, tem função importante no clima global, como regulador térmico e hídrico. Medidas micrometeorológicas realizadas na região têm mostrado a sua importância no equilíbrio do clima regional e global. Apesar da floresta amazônica ser a maior reserva contínua de floresta tropical úmida do mundo, ainda há pouco entendimento sobre o seu funcionamento, particularmente em relação ao ciclo do carbono (PHILLIPS et al., 2009). Segundo Malhi e Grace (2000), a floresta amazônica corresponde a 45% da área das florestas tropicais da terra e armazena cerca de 40% do carbono em sua vegetação terrestre. Florestas primárias (maduras) na Amazônia armazenam 120 Pg de carbono em sua biomassa (MALHI, 2008), por meio da fotossíntese e respiração processam anualmente 18 Pg C (MALHI e GRACE, 2000), mais de duas vezes a taxa de emissão causada por combustíveis fósseis.

Portanto, mudanças relativamente pequenas na estrutura e/ou na função dessas florestas podem ter consequências regionais e/ou globais para a biodiversidade, ciclo do carbono, mudanças climáticas e também contribuir de maneira decisiva nas alterações do microclima. Na região amazônica, essas mudanças são agravadas pelo intenso desmatamento para a exploração agropecuária, exploração de madeiras, e outras atividades antrópicas, que além de modificarem a cobertura florestal nativa, produzem gases de efeito estufa que afetam as propriedades físicas e biológicas da superfície terrestre.

Pesquisas recentes (METCALFE et al., 2007; MEIR et al., 2008; MALHI et al., 2008; ARAGÃO et al., 2009) demonstraram a importância do carbono (C) no solo como estoque, fonte e potencial sumidouro de CO<sub>2</sub>. A liberação desse

C para a atmosfera em forma de CO<sub>2</sub> pode causar sérios impactos no clima. Em florestas, estima-se que 50-84% do dióxido de carbono emitido sejam oriundos do solo (MEIR et al., 1996; MALHI et al., 1999; CHAMBERS et al., 2004). Portanto práticas de manejo que contribuam para a estabilização e fixação de C no solo são necessárias para diminuir a emissão de gases e mitigar o efeito estufa.

Segundo Sotta et al. (2004) e Salimon et al. (2004) o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo é fortemente correlacionado com a temperatura do solo e com a umidade do solo. Entretanto, esses autores afirmaram que nem sempre uma função exponencial representa à melhor resposta do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo à variação de temperatura. Outros fatores, tais como teor de nutrientes no solo, respiração das raízes, processos microbióticos, matéria orgânica, aeração do solo, porosidade do solo, disponibilidade de água e tipo vegetação podem interferir nas taxas de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo.

Vários projetos de pesquisa, de âmbito nacional e internacional, foram realizados em ecossistemas de florestas tropicais úmidas para entender e quantificar a dinâmica de carbono e ampliar nossa compreensão sobre o funcionamento da floresta tropical de terra firme (NOBRE et al., 1991; GRACE et al., 1996; MALHI et al., 2006; METCALFE et al., 2007; MALHI et al., 2008; PHILLIPS et al., 2009; ARAGÃO et al., 2009). Essas pesquisas obtiveram dados fundamentais sobre o crescimento da biomassa aérea e subterrânea, produção de liteira e respiração do solo, que estão disponíveis para a Floresta Nacional de Caxiuanã (FLONA Caxiuanã). Todavia, poucos estudos comparativos foram realizados sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> em solo antropogênico, conhecido como “terra preta de índio” (TPI) ou “terra preta arqueológica” ou antropogênica (TPA) ou simplesmente “terra preta” (TP) e latossolo amarelo (LA) sob condições climáticas normais.

Os solos de TP existem principalmente na Amazônia e estão localizadas geralmente em terra firme. Os solos tipo TP contêm elevado teor nutricional, matéria orgânica, quartzo, caulinita e oxihidróxidos de ferro Segundo Kern et al. (2003a) as áreas de terras pretas são consideradas pequenas, medem de 1 a 3

hectares, mas há exceções, como o caso da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn), na FLONA Caxiuanã, no Estado do Pará, onde se encontram terras pretas com mais de 100 ha. Segundo Glaser et al. (2000) e Glaser et al. (2001), materiais carbonizados são responsáveis pela manutenção dos altos níveis de matéria orgânica estável em solos de TP. A elevada quantidade de carvão nesses solos explica a provável estabilidade do carbono orgânico (de até 150 gramas de carbono por quilograma) (GLASER et al., 2000), pois podem contribuir com a fixação de carbono (C) no solo e virem a ser reservatórios importantes de CO<sub>2</sub> atmosférico, participando na redução da liberação de gases de efeito estufa para atmosfera.

Há várias hipóteses cientificamente fundamentadas sobre o comportamento dos grandes ciclos naturais do planeta envolvendo carbono, água e nutrientes. No caso da floresta amazônica, em condições naturais, esta serve como sumidouro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), retirando o CO<sub>2</sub> da atmosfera e fixando-o em sua biomassa por meio da fotossíntese. Esses grandes sumidouros naturais, segundo Nobre e Nobre (2002) poderiam reduzir sua magnitude no futuro em virtude das mudanças climáticas. Alguns cálculos do balanço de carbono da floresta Amazônica a partir de modelos (excluindo mudanças dos usos da terra) sugerem que a floresta não-perturbada é fonte de carbono durante anos de El Niño (mais secos no norte e leste da Amazônia) e sumidouro em anos de La Niña (chuvas mais abundantes) (TIAN et al., 1998). Entretanto, com o aquecimento global, esse sumidouro aparente pode saturar e tornar-se fonte, uma vez que um solo mais aquecido pode acelerar a respiração heterotrófica. Mudanças climáticas podem levar as mudanças drásticas na vegetação da Amazônia, principalmente uma tendência a "savanização" (COX et al., 2000).

As enormes quantidades de carbono são armazenadas naturalmente nas árvores e outras plantas da floresta, assim como no solo. Diferentes usos do solo podem alterar a quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) trocado entre a floresta amazônica e a atmosfera. Essa diferença, resultante do desmatamento

e da exploração da floresta pelo homem, poderia contribuir para as mudanças climáticas e ambientais em escala regional e global.

Segundo Higuchi et al. (1998) a Amazônia é capaz de fixar nas árvores cerca de 1,2 toneladas de carbono por hectare a cada ano. Este resultado está consistente com a média de acumulação de carbono na Amazônia, de 0,97 t/ha/ano estimada por Phillips et al., (1998). Segundo Phillips et al. (2009) a seca de 2005, uma das mais intensas dos últimos 100 anos, causou perda de biomassa florestal, invertendo o processo de sequestro de carbono que ocorre em grande escala temporal e espacial.

O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C) (MACHADO, 2005). Um dos mecanismos para realçar o sequestro de carbono no solo é a conservação de áreas naturais.

Há, portanto uma necessidade de aperfeiçoar o entendimento do comportamento biofísico das florestas tropicais, especialmente na região amazônica, onde há grande carência de informações sobre as interações entre tipo de solo, vegetação e a atmosfera.

Com relação aos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, algumas questões são de interesse:

1. Qual a relação de dependência entre o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo e a temperatura do solo?
2. Como variam esses fluxos de CO<sub>2</sub> na estação chuvosa e menos chuvosa?
3. Qual o efeito da fertilidade, em área de terra preta, na magnitude dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo comparadas com o latossolo amarelo?

Os objetivos deste trabalho são:

1. Analisar as variações sazonais das taxas de respiração na superfície do solo com liteira em áreas de TP e de LA;
2. Identificar a relação de dependência das taxas de respiração na superfície do solo com a precipitação pluvial, temperatura do solo, umidade do solo e produção de liteira;
3. Comparar as estimativas de carbono alocado no solo entre as áreas de TP e de LA.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Ciclo e dinâmica do carbono nos ecossistemas

O carbono é um dos principais elementos para os seres vivos, pois, é o componente fundamental das moléculas orgânicas. Os teores de carbono total da biomassa variam de 40 a 55% com base na sua matéria seca. Utilizado primariamente pelos seres vivos está presente no ambiente, combinado ao oxigênio e formando as moléculas de gás carbônico presente na atmosfera ou dissolvidas nas águas dos mares, rios e lagos. O carbono passa a fazer parte da biomassa através do processo da fotossíntese. Os seres fotossintetizantes incorporam o gás carbônico atmosférico, transformando-se em moléculas orgânicas. Isto evidencia a operação de mecanismos altamente concentradores de carbono em determinadas frações de biomassa. Estes mecanismos concentradores de carbono são representados pelos processos autotróficos da fotossíntese e quimiossíntese, realizados tanto por plantas quanto microrganismos. Deste modo, estes processos representam, numa primeira etapa, uma imobilização do carbono através do  $\text{CO}_2$ . Por outro lado, o carbono está sendo continuamente devolvido à atmosfera através da oxidação da matéria orgânica, representados pelos processos de respiração e combustão, processos estes denominados de mineralização da matéria orgânica. Assim, os teores de carbono total na atmosfera e da superfície terrestre, dependem de um delicado equilíbrio entre processos de imobilização (redução) e mineralização (oxidação) do carbono (MILLER, 1984; HEINRICH, 1990; SCHUMACHER, 1995).

O equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização do carbono vem sendo alterado desde o século XIX, pós-revolução industrial. Desde aquela época, os teores de  $\text{CO}_2$  na atmosfera vêm aumentando, provenientes, principalmente, da queima de combustíveis fósseis. Parte do  $\text{CO}_2$  assim produzido pode ser absorvida pelos oceanos como  $\text{HCO}_3^-$  – e/ou fixado na biomassa de plantas. Entretanto, a capacidade tamponante limitada de  $\text{CO}_2$  dos oceanos juntamente com o desmatamento sem a devida reposição de culturas, vem criando as condições para o surgimento do “efeito de estufa”, resultando em alterações sazonais na superfície terrestre, devido ao acúmulo

crescente de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> na atmosfera. A concentração de gás carbônico na atmosfera, e a grande preocupação dos pesquisadores são de que esse aumento possa provocar mudanças climáticas em nosso planeta, uma que vez que o gás carbônico é do ponto de vista quantitativo, o mais importante gás causador do efeito estufa (HOUGHTON, 1994; NOBRE, 2002).

Outro fator potencializador, na alteração desse processo cíclico natural (fotossíntese, a respiração e a dissolução) do carbono e provavelmente resultando nas mudanças climáticas, é a mudança no uso da terra pelo corte de floresta e queima de biomassa, que tem sido considerada como um sério agravante na liberação de carbono da biosfera para a atmosfera. Existe atualmente um aumento do carbono na atmosfera através de atividades antrópicas na forma de CO<sub>2</sub>. A metade do C permanece na atmosfera, e passam a contribuir efetivamente para o efeito estufa, sendo o restante dissolvido no oceano, ou sequestrado pela atividade fotossintética, ficando retido como biomassa viva, ou matéria orgânica do solo (GRACE, 2001).

Na Figura 1 constata-se que o maior compartimento de carbono na Terra é aquele presente no oceano (38000 Pg C), seguido do compartimento nas formações geológicas (5000 Pg C). O carbono das formações geológicas consiste de 4000 Pg C presentes no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural. O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C). O carbono orgânico representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para as águas profundas e, finalmente, para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido (0,4 Pg C) ou para a atmosfera via atividade microbiana como dióxido de carbono em solos aerados ou metano em solos saturados com água. Entretanto, pouco se sabe sobre valores precisos de perdas de carbono do solo para a atmosfera (MACHADO, 2005).

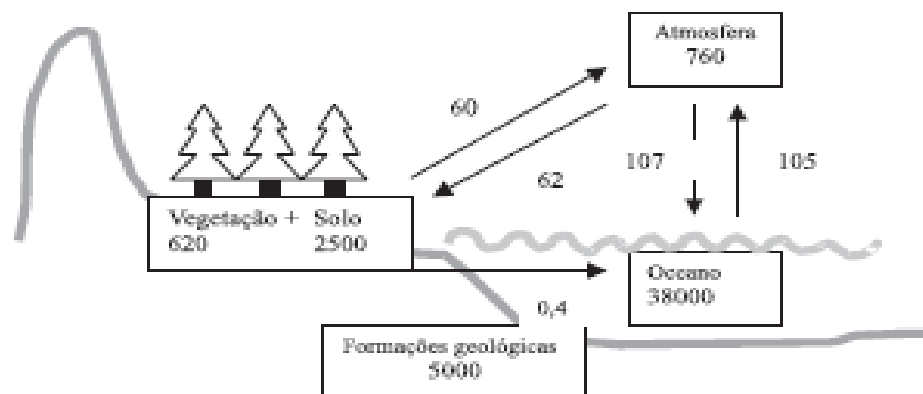


Figura 1. Ciclo global de carbono com estoques (em Pg =  $10^{15}$  g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano<sup>-1</sup>).

Fonte: Machado, 2005.

O sistema climático global e o ciclo do carbono interagem intensamente, e o CO<sub>2</sub> constitui um fator dominante na definição do clima, através do equilíbrio ou desequilíbrio de sua concentração na atmosfera. Desta forma, torna o clima um determinante das características da superfície, pois atua no processo de formação do solo (processos físicos, químicos e biológicos da superfície do solo), do tipo de vegetação, das feições do relevo e da estrutura de drenagem e ao mesmo tempo, a superfície exerce uma marcante influência sobre o clima, pois desenvolve um papel relevante no controle do balanço térmico da atmosfera (MACHADO, 2005).

Segundo Houghton (1994), o carbono existente no ecossistema terrestre nas diversas formas, incluindo, os microrganismos, folhas vivas, respiração das raízes, madeira, decomposição da matéria orgânica, metade desse carbono encontra-se nas florestas tropicais. Entretanto, os solos de florestas tropicais têm participação na dinâmica de processos químicos e físicos da atmosfera, uma vez que atuam como fonte ou sumidouro desse gás.

## 2.2. Dinâmica do carbono nos solos da Amazônia

Os ecossistemas terrestres que compreendem a vegetação e o solo são considerados atualmente como um grande sumidouro de carbono, especialmente os solos. Há várias maneiras pelas quais o manejo apropriado da biosfera terrestre, particularmente do solo, possa resultar em significativa redução no aumento dos gases de efeito estufa. Conforme demonstrado na Tabela 1, os solos das diferentes florestas no mundo apresentam maior estoque de carbono que a vegetação, especialmente os solos de floresta boreal (regiões geladas) e os campos das regiões temperadas (ex. pradarias nos EUA e pampas da América do Sul).

Tabela 1. Estoque global de carbono na vegetação e no solo (profundidade 100 cm).

Bioma	Área (10 <sup>6</sup> Km <sup>2</sup> )	Estoques de carbono (Gt de C)		
		Vegetação	solos	Total
Floresta Tropical	17,6	212	216	428
Floresta Temperada	10,4	59	100	159
Floresta Boreal	13,7	88	471	559
Savanas Tropicais	22,5	66	264	330
Campos Temperados	12,5	9	295	304
Desertos e semidesertos	45,5	8	191	199
Tundra	9,5	6	121	127
Pântanos	3,5	15	225	240
Terras agrícolas	16,0	3	128	131
<b>TOTAL</b>	<b>151,2</b>	<b>466</b>	<b>2011</b>	<b>2477</b>

Fonte: Machado (2005).

Diversas pesquisas demonstraram a importância do carbono (C) no solo como estoque, fonte e potencial sumidouro de CO<sub>2</sub>, porém o estoque de carbono no solo depende das mudanças no uso do solo e das alterações climáticas, podendo estocar ou liberar carbono do solo (POST et al., 1982; SOMBROEK, 1993). A liberação deste C para atmosfera em forma de CO<sub>2</sub> poderá causar impactos sobre o clima; então práticas de manejo que contribuam para estabilização e fixação de C no solo são necessárias para diminuir a emissão de gases e mitigar o efeito estufa.

Em florestas, estima-se que 84% do dióxido de carbono emitido sejam oriundos do solo (MEIR et al., 1996). Torna-se complexa a estimativa de fluxo de carbono entre o solo e a atmosfera que ocorre principalmente na forma de dióxido de carbono originado da respiração microbiana (heterotrófica), da raiz (autotrófica) (EUSKIRCHEN et al., 2003), ecológica (por exemplo, imigração da fauna e vegetação) e processos físicos (por exemplo, processo de difusão de CO<sub>2</sub>). O fluxo de CO<sub>2</sub> no solo depende do tipo do solo, temperatura do solo, umidade do solo, ocorrência de precipitação, taxa de fotossíntese nas plantas e substratos disponível para decomposição no solo (SÁNCHEZ et al., 2003). Por essas razões se tornam necessárias medições de fluxo do CO<sub>2</sub> no solo em vários ecossistemas e em diferentes condições climáticas.

A taxa de transferência do CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera pode ser controlada por cinco fatores: i) pela sua taxa de produção no solo; ii) pelos gradientes de temperatura; iii) por sua concentração na interface solo-atmosfera; iv) pelas propriedades físicas do solo e v) pelas flutuações da pressão atmosférica do ambiente (SOTTA, 1998). Este processo varia muito com a vegetação e tipo de solo (DAVIDSON et al., 2002). Os fluxos são extremamente variáveis no espaço e no tempo, devido à heterogeneidade do sistema e dinâmica dos fatores que os controlam. Embora muito importante o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera é pouco conhecido em termos de variação sazonal e quantidade respirada nos diferentes tipos de cobertura do solo (MEIR et al., 1996; DAVIDSON et al., 2000).

Poucos estudos comparativos foram realizados entre solo antropogênico, conhecido como simplesmente terra preta e latossolo amarelo sob condições climáticas normais. Os solos de TPA existem principalmente na Amazônia e estão localizadas geralmente em terra firme. São solos bem drenados, próximos a água corrente e posição topográfica privilegiada para observação do entorno, fator importante para a estratégia de sobrevivência do homem pré-histórico (KERN et al., 2003a). Contêm elevado conteúdo nutricional, matéria orgânica, quartzo, caulinita e oxihidróxidos de ferro. As terras pretas são consideradas pequenas, medem de 1 a 3 hectares, mas há exceções, como o

caso da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn), na FLONA Caxiuanã, no Estado do Pará, onde se pode encontrar terras pretas numa extensão com mais de 100 ha. Apesar da grande quantidade de sítios arqueológicos já conhecidos, não existe mapeamento de todas as ocorrências de TP na Amazônia. Em Caxiuanã foram catalogados mais de 27 sítios de TP atestando a ocupação humana da região por povos pré-colombianos. Pode chegar a 10% dos solos da Amazônia, uma área duas vezes maior do que a Grã-Bretanha (BBC Brasil, 2004), e com alto teor de carbono, está sendo investigada também como um mecanismo de sequestro de carbono. Pesquisadores, Lehmann e Kern (2004), (BBC Brasil, 2004), Embrapa, entre outras, querem recriar a terra preta. Lehmann e Kern (2004) estimaram quanto de carbono daria para sequestrar à moda indígena, no mínimo um quarto de bilhão de toneladas (Gt) por volta de 2030. Na hipótese mais otimista, 1 Gt em 2040, ou um sétimo do que é necessário poupar até meados deste século para manter as emissões de carbono no nível de 2004. O carbono armazenado nestas terras apresenta uma magnitude maior que em terras adjacentes. Acrescenta-se a isto o fato de que a matéria orgânica presente nas terras escuras é persistente, pois foram encontrados conteúdos de carbono elevados mesmo centenas de anos depois que as terras foram abandonadas. Desta forma a terra preta teria um papel fundamental no controle do efeito estufa (BASSO e KIMURA, 2008).

Glaser et al. (2000) e Glaser et al. (2001), mostraram que materiais carbonizados são responsáveis pela manutenção de altos níveis de matéria orgânica estável em solos de TP. A elevada quantidade de carvão nestes solos seria a razão provável da estabilidade do carbono orgânico, pois podem contribuir com a fixação de carbono (C) no solo e podem vir a ser reservatórios importantes de CO<sub>2</sub> atmosférico, participando provavelmente na redução da liberação de gases de efeito estufa para atmosfera.

Há uma necessidade de aperfeiçoar o entendimento do comportamento biofísico das florestas tropicais, especialmente na região equatorial onde há grande carência de informações sobre as interações entre tipo de solo (TP), vegetação e a atmosfera.

### **2.3. Influência da temperatura nas taxas de respiração do solo**

O processo de respiração do solo é fortemente influenciado pelos fatores ambientais como a temperatura e umidade e podem variar de acordo com a estação, (DAVIDSON et al., 2000). O fluxo de CO<sub>2</sub> do solo é altamente sensível à mudança de temperatura. Portanto, pequenas mudanças na temperatura da superfície do solo, podem influenciar a magnitude do fluxo de CO<sub>2</sub>. Desta forma, se ocorrer um aumento na emissão de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera, poderá contribuir para um aumento na concentração atmosférica e conseqüentemente nas mudanças globais (KIRSCHBAUM, 1995). Estudos têm mostrado que a taxa de respiração do solo é um indicador de atividade microbiana do solo, aumentando linearmente com a temperatura (SUBKE et al., 2003). Estes trabalhos consideraram que a produção do CO<sub>2</sub> dentro do solo é basicamente um processo bioquímico e responde assim fortemente às variações de temperatura. Isso pode mudar com a idade da matéria orgânica, e também com a disponibilidade de água para as reações bioquímicas relevantes, (FANG e MONCRIEFF, 2001).

### **2.4. Influência da umidade na respiração do solo**

Os mecanismos da respiração do solo estão associados com as condições de temperatura e umidade do solo, dependem da variabilidade temporal e espacial destas variáveis, que exercem forte influência no processo de decomposição microbiana. Estudos sobre emissão de CO<sub>2</sub> encontraram relação significativa deste processo com a umidade do solo, sugerindo que o nível de umidade ótimo para emissão de CO<sub>2</sub> ocorre na capacidade de campo. Entretanto, Howard e Howard (1993) dizem que este teor de umidade seria prejudicial à atividade aeróbica, que é a maior fonte de CO<sub>2</sub> emitido pelo solo. Segundo Sotta et al. (2004), como nos trópicos as variações de temperatura são relativamente pequenas, e considerando que os solos de floresta tropical apresentam pequena variação na temperatura, esta variável não explica a grande variação de fluxo de CO<sub>2</sub> observada. Davidson et al. (2002) observaram que logo após um evento de chuva ocorre um grande aumento do fluxo do CO<sub>2</sub>,

isto porque a água quando drenada para o solo força a saída do CO<sub>2</sub> presente nos poros, e após algumas horas, há uma queda brusca no fluxo, que se dá devido a uma camada de proteção que a água faz no solo, evitando assim a emissão do CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Esta emissão vai se tornando maior à medida que a água vai evaporando e drenando para o lençol freático, pois assim os poros ficam livres. E há um restabelecimento das condições aeróbicas, proporcionando um ambiente favorável às atividades microbianas do solo.

## **2.5. Fase gasosa do solo**

A fase gasosa, também chamada de ar do solo, é composta principalmente de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, vapor de água e CO<sub>2</sub>, com traços de outros gases. Desprezando os gases traços, pode-se dizer que a fração volumétrica de N<sub>2</sub> é cerca de 80% (a mesma da atmosfera) e que as do CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> perfazem cerca de 20% (PREVEDELLO, 1996). A fração volumétrica de CO<sub>2</sub> no ar do solo é maior do que os 0,03% da atmosfera. Com o aumento na profundidade do solo, a concentração de CO<sub>2</sub> aumenta e a de O<sub>2</sub> decresce, devido às atividades biológicas (respiração das raízes, das plantas, dos microorganismos e da fauna do solo). O ar do solo está continuamente sujeito a renovação pelas trocas com o ar da atmosfera. Por isso, o ar da camada superficial do solo não difere muito do ar atmosférico, garantindo o arejamento, no espaço poroso não ocupado pela fase líquida, para os processos vitais da biota do solo (LUCHES et al., 2001). O ar do solo pode variar em termos de composição e concentração, tanto no tempo quanto no espaço, dependendo da presença de matéria orgânica, das atividades microbianas, da concentração de raízes, da aeração do solo e das reações químicas. Mesmo em solo bem aerado, a fase gasosa apresenta uma maior concentração de CO<sub>2</sub> e umidade relativa do que o ar atmosférico.



## 2.6. Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo e respiração do solo

Para se conhecer o movimento de carbono no sistema pode ser feita a quantificação do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, ou seja, a avaliação da exportação gasosa de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera (FEARNSIDE, 1986). O solo recebe matéria orgânica produzida pela comunidade de plantas e, de diversas maneiras converte a maior parte dela em CO<sub>2</sub> (SINGH e GUPTA, 1977). Outra parte fica retida na matéria orgânica do solo e serve de suprimento (alimento) e energia para os microrganismos do solo. O fluxo de CO<sub>2</sub> do solo incorpora tanto a respiração do solo como a difusão passiva do CO<sub>2</sub>, englobando processos biológicos e físico-químicos, e representa as trocas de CO<sub>2</sub> entre compartimentos de um sistema, enquanto a respiração do solo é um processo biológico, sendo a somatória das liberações de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, resultante de vários processos que ocorrem na liteira, superfície e camadas mais profundas do solo, incluindo: i) a respiração dos microrganismos (principalmente bactérias e fungos) e da macrofauna; ii) os processos fermentativos, que ocorrem em profundidade sob condições de anaerobiose; iii) e a oxidação química. Todos derivam da decomposição da matéria orgânica e estão ligados à produção primária do sistema (WANNER, 1979; MEDINA, 1980; RAICH, 1983). A medida do fluxo de CO<sub>2</sub> da superfície do solo é provavelmente o método mais amplamente usado, para se estimar a taxa de respiração do solo *in situ*. No entanto respiração do solo não é sinônimo de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, embora eles sejam frequentemente usados como tal. A respiração do solo é a oxidação da matéria orgânica no solo, e inclui a respiração das raízes e organismos do solo. O fluxo de CO<sub>2</sub> do solo é a liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, e, portanto depende da produção de CO<sub>2</sub> no solo e do processo físico de fluxo de gás para fora do solo. Segundo (DAVIDSON et al., 2002) os solos estocam duas ou três vezes mais carbono do que existe na atmosfera. Entretanto, a liberação de carbono vai depender da velocidade de decomposição da matéria orgânica, que é influenciada por características da vegetação e do clima, pelos gradientes de temperatura e concentração de dióxido de carbono solo-atmosfera, pelas propriedades físicas do solo, e pelas

flutuações de pressão do ambiente (RAICH e SCHLESINGER, 1992; MEIER et al., 1996). Contudo, a maioria do CO<sub>2</sub> produzido no solo é liberada para a atmosfera, assim, o fluxo de CO<sub>2</sub> medido no solo, relativamente sobre longos períodos, reflete a respiração do solo. A respiração do solo é um dos maiores e mais importantes processos de liberação do carbono em um ecossistema terrestre, podendo ser medida por vários métodos, como o de covariância de vórtices turbulentos que permite medir a respiração do solo no período noturno e o uso de câmaras colocadas sobre o solo que permite uma medida direta da respiração que ocorre dentro das camadas do solo e da serrapilheira (DAVIDSON et al., 2002). O aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera tem sido ocasionado principalmente pela emissão de carbono a partir da queima de combustíveis fósseis em grande escala, e o aumento dessa concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico pode interferir na respiração do solo. Desta forma afetará os processos fisiológicos dos microrganismos do solo os quais podem inibir ou acelerar o fluxo de CO<sub>2</sub> microbiano que por sua vez diferirá entre diversos microrganismos de solo e seu ambiente (ROBERTS, 2000; BALL e DRAK, 1998; BEKKU et al., 1997). O entendimento do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo é a chave para entender a troca do fluxo solo-planta-atmosfera (MEIER et al., 1996; DAVIDSON et al., 2000; CHAMBER et al., 2004), porque o saldo entre a fotossíntese e a respiração total da planta é denominado de assimilação líquida de carbono. Com isso, o conhecimento da respiração total do solo em função de suas variáveis meteorológicas, como a temperatura e umidade de solo, pode esclarecer e quantificar melhor este gás e assim poderá também melhorar modelos de interações.

## **2.7. Littera e matéria orgânica**

A decomposição é o processo de despolimerização e de reações oxidativas, pelos quais moléculas relativamente grandes, tais como as poli-aromáticas, carboidratos, lipídios e proteínas, provenientes tanto de dentro das células quanto as livres no ambiente do solo, são convertidas em moléculas menores, mais simples, como os ácidos carboxílicos, aminoácidos e CO<sub>2</sub>. Os

resíduos adicionados ao solo são primeiramente quebrados até seus componentes orgânicos básicos pelas enzimas extracelulares produzidas pelos organismos heterotróficos. A matéria orgânica do solo é proveniente da degradação em vários estágios de resíduos animais e vegetais. Na fração orgânica estão incluídos desde os materiais inalterados ou pouco alterados, isto é, que conservam sua identidade, até aqueles totalmente decompostos, ou seja, que perderam a integridade. Todos os produtos transformados são chamados de húmus (REZENDE, 2004). A camada de liteira é representada pela biomassa aérea da vegetação que permanece no solo até ser fragmentada e decomposta pelos processos físico-químicos e bióticos que ocorrem nesta importante fração do ecossistema. A liteira é constituída por um grande número de moléculas orgânicas diferentes, associada de diferentes maneiras e intensidades à matriz do solo, e não constitui um estoque homogêneo (ANDERSON, 1992). O acúmulo da matéria orgânica do solo é importante para a manutenção do estoque de carbono, e constitui cerca de duas a três vezes a quantidade de carbono armazenado na atmosfera (GRACE, 2001; POST et al., 1992; ROZENZWEIG e HILLEL, 2000). O carbono proveniente da vegetação entra no solo através da queda de folheto, do “turnover” das raízes e micorrizas e da exudação de carbono pelas raízes finas. O ganho de carbono é compensado pelas perdas, sob a forma de respiração heterotrófica dos decompositores da liteira e da matéria orgânica do solo (MURTY et al., 2002). A qualidade da matéria orgânica em diferentes tipos de solo é influenciada por fatores como condições hidrotérmicas, composição química da vegetação, composição mineralógica e textura do solo (HOWARD e HOWARD, 1993). O solo depende diretamente do tipo de cobertura vegetal, que segundo Wagai et al. (1998) tem influência no microambiente, biomassa microbiana e biomassa de raízes, as quais juntas controlam o fluxo de CO<sub>2</sub>.

## **2.8. Metodologias de medida do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo**

O fluxo do CO<sub>2</sub> do solo pode ser medido de diversas maneiras, entre elas, armadilhas de álcalis, covariância de vórtices turbulentos e câmaras fechadas que absorvem CO<sub>2</sub> por infravermelho (IRGA); com diferenças na exatidão, na resolução espacial e temporal, e aplicabilidade (JANSSENS et al., 2000). Enquanto o método de covariância de fluxo na atmosfera é amplamente usado para medir a respiração do solo, o uso de câmaras, com analisadores de gás infravermelho (IRGA), colocadas sobre o solo é o caminho mais direto de medida da respiração que ocorre entre o solo e a camada de serrapilheira. A exatidão dos métodos que usam as armadilhas de álcalis aos IRGAs para a quantificação do CO<sub>2</sub> foi estudada extensivamente (JANSSENS et al., 2000), com a conclusão geral que as armadilhas de álcalis frequentemente superestimam os fluxos baixos e subestimam os fluxos elevados, mas podem, às vezes, confiantemente ser calibrados para uma escala de fluxos intermediários (DAVIDSON et al., 2002). Janssens et al. (2000) consideraram que fluxo de CO<sub>2</sub> do solo só pode ser medido com exatidão por um sistema que não altere a atividade respiratória do solo, o gradiente de concentração de CO<sub>2</sub>, e o movimento do ar próximo à superfície do solo. Também é necessário evitar a diferença de pressão entre o exterior e o interior da câmara (FANG e MONCRIEFF, 2001). Todas as metodologias atualmente disponíveis apresentam algumas desvantagens, entretanto, não existe padrão ou referência para testar a acurácia. Portanto, consideráveis incertezas caracterizam todos os tipos de medidas (JANSSENS et al., 2000) onde a opção é tentar utilizar uma metodologia que melhor se aproxime das condições e realidade em que o estudo seja feito, possibilitando minimizar efeitos negativos. O uso de IRGA está se tornando cada vez mais comum entre os métodos para medidas com câmaras de respiração do solo que consiste em câmaras colocadas na superfície do solo para registrar a razão de acúmulo de CO<sub>2</sub> (sistema fechado) ou o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo (sistema aberto). O sistema fechado pode ser dinâmico (utilizando analisador de gás por infravermelho) ou estático (utilizando absorção alcalina – NaOH ou analisador de gás por infra-vermelho) os quais

caracterizam pela presença ou ausência de fluxo de ar dentro da câmara, podendo ainda ser fixo ou móvel. Se for fixo, a câmara permanece acoplada em um mesmo ponto e as medidas são realizadas sempre no mesmo local. O uso de uma metodologia com câmaras juntamente com o IRGA oferece a vantagem de que os fluxos podem ser medidos rapidamente (tempo= 5 minutos) e de que os numerosos pontos de dados de concentrações do CO<sub>2</sub> podem ser registrados a cada minuto, rendendo um monitoramento quase contínuo das concentrações crescentes do CO<sub>2</sub>. Minimizar o tempo que a câmara está sobre o solo minimiza o efeito causado pela alteração do gradiente da concentração do CO<sub>2</sub> dentro do perfil do solo, e entre o solo-atmosfera (DAVIDSON et al., 2002). Porém, problemas no uso de todos os tipos de câmaras incluem a dificuldade de avaliar a variabilidade espacial de fluxos em ecossistemas naturais (RAYMENT, 2000) assim como comparar medidas de fluxo por diferentes sistemas de medidas (DREWITT et al., 2002). Isso porque grandes e sistemáticas diferenças entre os tipos de técnicas de câmaras foram verificadas em vários estudos de comparação metodológicas (BEKKU et al., 1997; FANG e MOCRIEFF, 2001; JANSSENS et al., 2000; DAVIDSON et al., 2002). Diante dessas questões, torna-se difícil selecionar uma metodologia padrão ou referência para testar sua precisão e assim diversos tipos de medidas são caracterizados por consideráveis incertezas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Base e análise de dados

Os dados analisados neste estudo são provenientes de medições durante o período de dez/2004 a dez/2005 no âmbito do projeto PARAMA (Projeto para o Avanço da Rede de trabalho Científico na Amazônia) e TEAM (Programa de Ecologia, Avaliação e Monitoramento de Florestas Tropicais). Essas medidas foram realizadas e coletadas mensalmente.

A partir dos dados meteorológicos, realizou-se a análise da precipitação pluviométrica (mm) e das variações de sazonalidade média horária e mensal. Os dados de temperatura (°C) e umidade do solo (%) foram medidos pontualmente em conjunto com a respiração do solo para verificar e avaliar a influência dessas variáveis no fluxo de CO<sub>2</sub> do solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Nas análises de respiração do solo, foram feitas análises comparativas com variáveis meteorológicas e elaboração de figuras a partir de uma base de dados, para avaliar as magnitudes e a variação sazonal dos valores médios dos fluxos de CO<sub>2</sub> e estimar com isso, o carbono alocado em um hectare por ano. Além disso, também efetuou-se análise de regressão, para avaliar a interação de cada uma das variáveis biofísicas com as taxas de respiração.

A biomassa da liteira produzida foi analisada por amostra mensal ( $\text{g.m}^{-2}.\text{mês}^{-1}$ ) durante o ano para verificar a produção em função da sazonalidade do microclima e sua contribuição na respiração do solo.

#### 3.2. Descrição da área e coleta de dados

##### 3.2.1. Local do experimento

O sítio experimental foi estabelecido na Floresta Nacional de Caxiuanã, que está localizada no município de Melgaço, no Estado do Pará, 400 km a oeste de Belém (Figura 2). Caracteriza-se por apresentar ambientes naturais bem conservados e com baixa densidade demográfica. Neste cenário foi implantada a Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn), uma base de pesquisa do Museu Paraense Emílio Goeldi, inaugurada em 1993, com infraestrutura voltada à produção científica por um período prorrogável de 30 anos sob regime de Comodato para utilizar 33.000 ha.

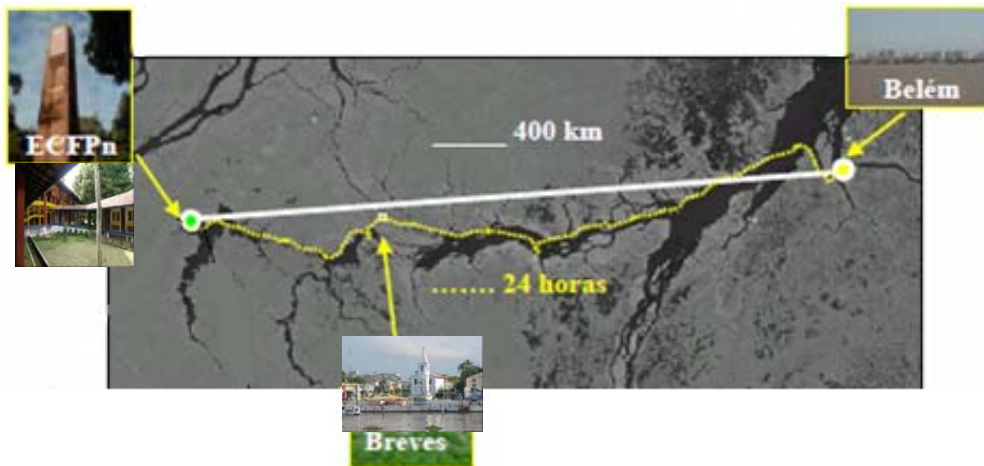


Figura 2. Localização da FLONA de Caxiuanã, Pará e trajetória percorrida entre Belém e a ECFPn. No centro, o percurso fluvial (24 horas) nos rios Pará e Anapú até a Baía de Caxiuanã, com escala na Cidade de Breves na Ilha do Marajó. Adaptado de FERREIRA DA COSTA, 2008.

A área do Experimento PARAMA é inteiramente em terra-firme, com duas parcelas de 1 ha cada. Sendo um em latossolo amarelo (LA), designado de parcela Torre (T), usada como referência ou controle para comparação com a parcela terra preta (TP) (Figura 3).

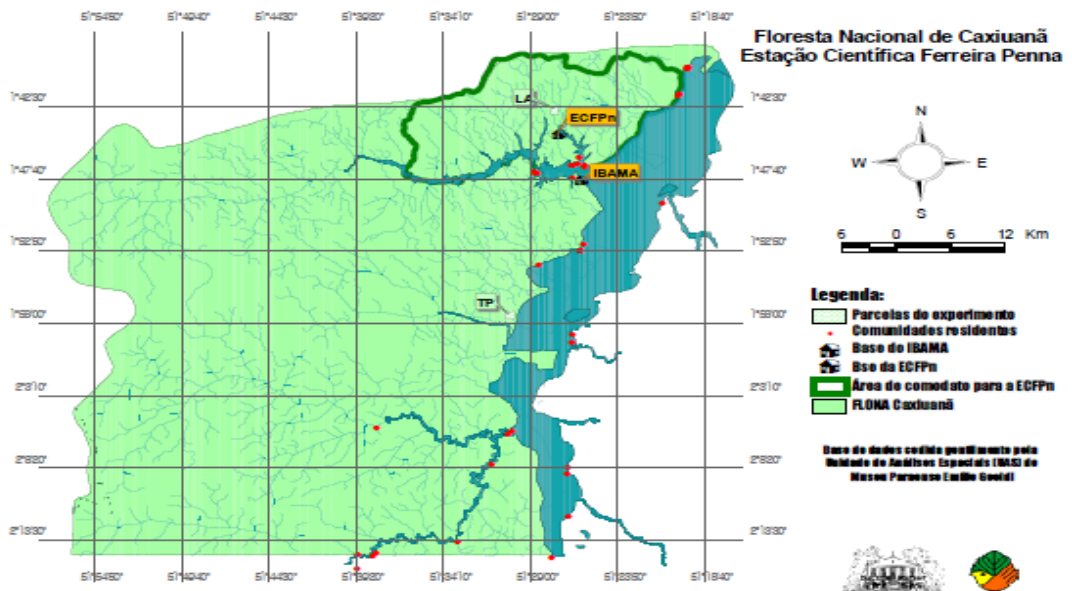


Figura 3. Localizações das parcelas e estações meteorológicas automáticas.

### 3.2.2. Desenho experimental

Cada parcela de 1 ha em latossolo amarelo (LA) e terra preta (TP) foi subdividida em quadrantes de 20 x 20 m, totalizando 25 subparcelas (Figura 4).

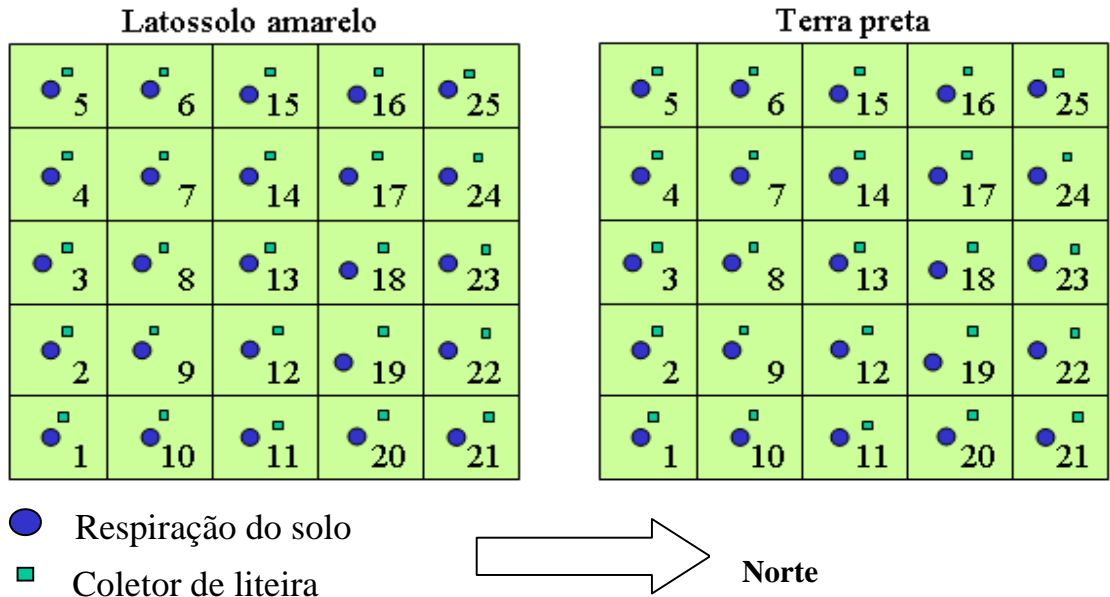


Figura 4. Localizações das subparcelas.

### 3.2.3. Vegetação

A Floresta Nacional de Caxiuanã agrega ecossistemas riquíssimos em espécies vegetais, o que a caracteriza como uma zona que abrange vários ambientes, dentre eles a floresta densa de terra firme e igapó (ALMEIDA et al., 1993). A floresta de terra firme ocupa cerca de 85 % da área onde foi implantada a ECFP. Apresenta relevo relativamente plano com predominância do latossolo amarelo, profundo e de origem terciária, tendo como características marcantes a acidez, solos argilo-arenosos e bastantes vulneráveis à erosão laminar. Este ambiente apresenta uma arquitetura florestal constituída de árvores com dossel com níveis entre 30 a 50 m. Possui grande diversidade de espécies por hectare (150 a 160 espécies) e densidade de árvores variando de 450 a 550 unidades por hectare. É uma floresta bastante densa e úmida, com até 10% de abertura do dossel, dificultando o aparecimento de espécies com maior necessidade de luz, por exemplo, lianas (cipós) (ALMEIDA et al., 1993; LISBOA et al., 1997).



### 3.2.4. Clima

O clima da região é do tipo tropical quente e úmido, classificado segundo Köppen como Am, com temperatura média anual de 26° C e médias extremas (mínimo e máximo) de 22°C e 32°C, respectivamente. A região com alta pluviosidade anual (~2.500 mm) tem uma pronunciada estação seca, entre os meses de setembro a dezembro e estação chuvosa, entre os meses de janeiro a maio (FISHER et al., 2005).

### 3.2.5. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos através de duas estações meteorológicas automáticas, próximas às áreas experimentais de estudo. Sendo uma do projeto TEAM instalada no topo da torre de 54 m (Figura 5), próxima à parcela T e outra do projeto PARAMA instalada no IBAMA, próxima a parcela TP (Figura 3). Os dados foram registrados a cada 2 minutos e armazenados em um datalogger (CR23X, Campbell Sci. Inc., Logan, Utah). Os dados de temperatura e umidade do solo, na camada superficial do solo (0-30 cm), foram obtidos através de um sensor digital com visor (Testo 926 probe, Testo Ltd., Hampshire, U.K.) e um sensor TDR (Time domain reflectance) ou reflectância no domínio do tempo (CS616 probe, Campbell Scientific, U.K.), respectivamente, acoplado em um multímetro com frequência de 200 kHz (Figura 6) no qual o valor registrado, em frequência, foi convertido para porcentagem, através de equações desenvolvidas para esse fim.



Figura 5. Coleta de dados em uma estação meteorológica automática.

### 3.2.6. Respiração do solo

As medidas de respiração do solo ( $R_s$ ) foram feitas utilizando um analisador de gás infravermelho de  $CO_2$  acoplado a uma câmara fechada (EGM-4 e SRC-1 chamber, PP Systems, Hitchin, U.K.) (Figura 6) (Metcalf et al., 2007), baseado na absorção de radiação na banda do infravermelho ( $\lambda > 0,7$  mm) pelo  $CO_2$ . A respiração do solo é dada na forma de fluxo obtido através de uma câmara fixa no solo, onde a concentração de  $CO_2$  aumenta no tempo devido à circulação do ar, gerada pelo ventilador da câmara, em um volume de controle fechado (Figura 6). A  $R_s$  é calculada com a taxa de variação de concentração de  $CO_2$  dentro do volume de controle da câmara por unidade de tempo e área sobre a região coberta pela câmara. Para minimizar distúrbios, evitar vazamentos e leituras incorretas causadas por fissuras no solo, foram instalados em cada parcela 25 anéis de PVC ajustáveis à câmara, sendo distribuídos um em cada subparcela. As coletas foram feitas uma vez ao mês, com duas leituras em cada anel.

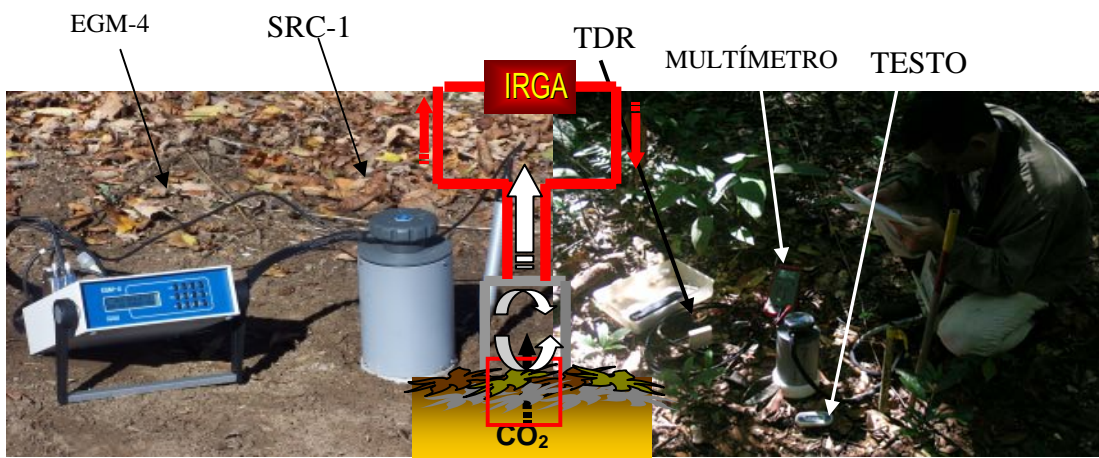


Figura 6. Medição de respiração do solo no campo com o analisador de gás  $CO_2$  acoplado a câmara de respiração do solo, umidade e temperatura do solo.

### 3.2.7. Produção de liteira

No centro de cada subparcela (Figura 4) foi colocado um aparato coletor de liteira ou serrapilheira de 0,25 m<sup>2</sup>, de formato quadrado, e com tela de nylon de 2 mm de malha (Figura 7). Os aparatos ficaram a uma altura de, aproximadamente, 100 cm acima do nível do solo nas parcelas de latossolo amarelo e terra preta. As coletas foram feitas mensalmente, com o recolhimento do material em sacos de papel. O material foi colocado para secar a 60 °C em estufa ventilada até atingir peso constante. O material foi separado em 02 frações: a) foliar e b) não foliar. O componente foliar inclui folhas e estipulas. O componente não foliar inclui flores, frutos, botões, cascas e ramos finos ( $\varnothing \geq 1$  cm). Foi feita a pesagem do material úmido e seco, por aparato, por fração e por parcela. A triagem, secagem e pesagem do material coletado foram feitas por técnicos especializados do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn).



Figura 7. Aparato coletor de liteira.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Variação sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo

A comparação dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo nas áreas experimentais de latossolo amarelo (LA) e terra preta (TP) são apresentadas na Figura 8. A variação média mensal dos fluxos de CO<sub>2</sub> apresentou uma marcante sazonalidade, com as maiores magnitudes dos fluxos ocorrendo durante a estação chuvosa. Os fluxos de CO<sub>2</sub> em solos de TP foram superiores aos fluxos medidos em LA devido à elevada fertilidade. A média anual dos fluxos de CO<sub>2</sub> foi de  $2,84 \pm 0,20$  e  $3,73 \pm 0,35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em LA e TP, respectivamente. Esses resultados estão próximos dos valores encontrados por Sotta et al. (2006), de  $3,09 \pm 0,25$  e  $3,91 \pm 0,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em solo latossolo amarelo de terra firme arenoso e argiloso, respectivamente. Em Manaus-AM, Sotta et al. (2004) encontrou fluxos bem maiores,  $6,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Dias (2006) encontrou valores de fluxos de  $5,64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em Santarém-PA, enquanto Meir et al. (1996) na Reserva Jarú-RO encontrou valores de  $5,50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A tabela 2, adaptada de Sotta et al. (2004) apresenta um resumo dos estudos feitos na Amazônia desde Coutinho e Lamberti (1971) até o presente estudo, destacando-se os valores médios dos fluxos, local, período e metodologia empregada.

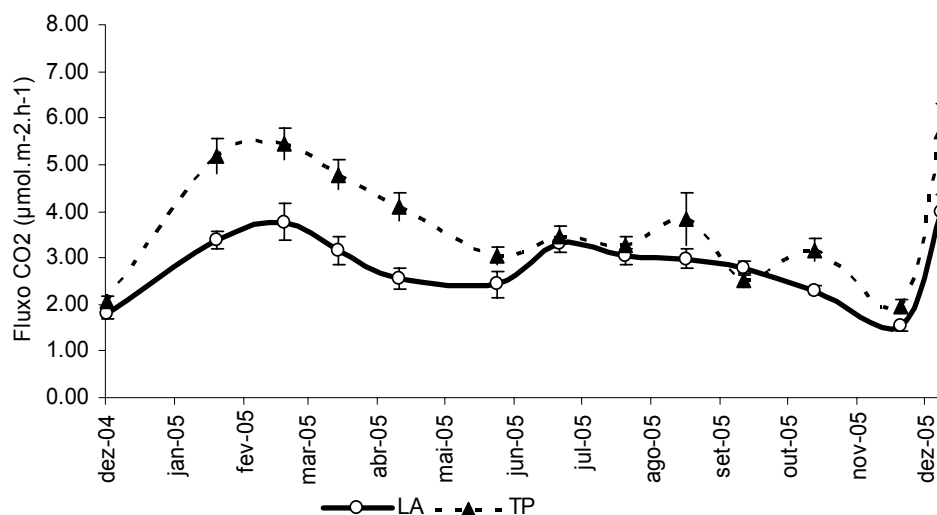


Figura 8. Variação sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo.

Tabela 2. Estudos realizados de fluxos de CO<sub>2</sub> do solo na região Amazônica.

Autor (ano)	Local	Período estudo	Média (μmol.CO <sub>2</sub> .m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Metodologia
Coutinho e Lamberti (1971)	Barcelos, AM, Brasil	seco	7,64	SoluçãoKOH 0,5 N
Martins e Matthes (1978)	Manaus, AM, Brasil	seco	3,80	SoluçãoKOH 0,5 N
Medina et al., (1980)	San Carlos, Venezuela	2 anos	7,20	SoluçãoKOH 0,5 N
Kleper et al., (1990)	Manaus, AM, Brasil	2 anos	4,70	IRGA câmara estática
Wofsy et al., (1998)	Reserva Ducke, AM, Brasil	2 anos	4,50	IRGA câmara dinâmica
Meir et al., (1996)	Reserva Jarú, RO, Brasil	2 anos	5,50	IRGA câmara dinâmica
Trumbore et al., (1995)	Paragominas, PA, Brasil		6,10	IRGA câmara dinâmica
Chamber et al., (2002)	Manaus, AM, Brasil	Ano inteiro	3,20	IRGA câmara dinâmica
Nunes (2003)	Juruena, MT, Brasil	Ano inteiro	4,25	IRGA câmara dinâmica
Sotta et al., (2004)	Manaus, AM, Brasil	Final estação chuvosa	6,40	IRGA câmara dinâmica
Souza (2004)	Manaus, AM, Brasil		5,76	IRGA câmara dinâmica
Valentine, (2004)	Sinop, MT, Brasil	Ano inteiro	5,30	IRGA câmara dinâmica
Dias (2006)	Santarém, PA, Brasil	Ano inteiro	5,64	IRGA câmara dinâmica
Presente estudo	Caxiuanã, PA, Brasil	Ano inteiro	2,84 ±0,20 (LA) 3,73 ±0,35 (TP)	IRGA câmara dinâmica EGM-4

Fonte: Adaptado de Sotta et al. 2004 e Dias (2006).

O estoque de carbono alocado na TP foi 24% maior em comparação com LA (Figura 9). A razão provável da estabilidade do carbono orgânico nestes solos antropogênico é a abundância de carvão (Glaser, 1999). Estes solos podem vir ser reservatórios importantes do CO<sub>2</sub> atmosférico.



Figura 9. Alocação de carbono no solo.

A figura 10 apresenta a variação mensal da precipitação e dos fluxos de CO<sub>2</sub> nas áreas de LA e TP. Os maiores fluxos de CO<sub>2</sub> do solo ocorreram em fevereiro (estação chuvosa) com um valor médio de  $3,76 \pm 0,39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em LA e  $5,46 \pm 0,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na TP, decrescendo até atingir o mínimo no fim da estação menos chuvosa, em novembro, tendo sido obtido um fluxo médio de  $1,52 \pm 0,10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em LA e  $1,95 \pm 0,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na TP. Com início da estação chuvosa em dezembro, as magnitudes dos fluxos são maiores na estação chuvosa, tanto no LA e como na TP e menores na estação menos chuvosa. Observa-se que nas primeiras chuvas, em dezembro de 2005, as magnitudes dos fluxos elevam-se, abruptamente, isto porque no período menos chuvoso tem maior deposição de liteira, e com as primeiras chuvas elevam-se a umidade e a atividade microbiana no solo. Em condições tropicais é comum no decorrer de cada ano, a intensificação da deposição de material orgânico na estação menos chuvosa devido ao aumento do componente foliar.

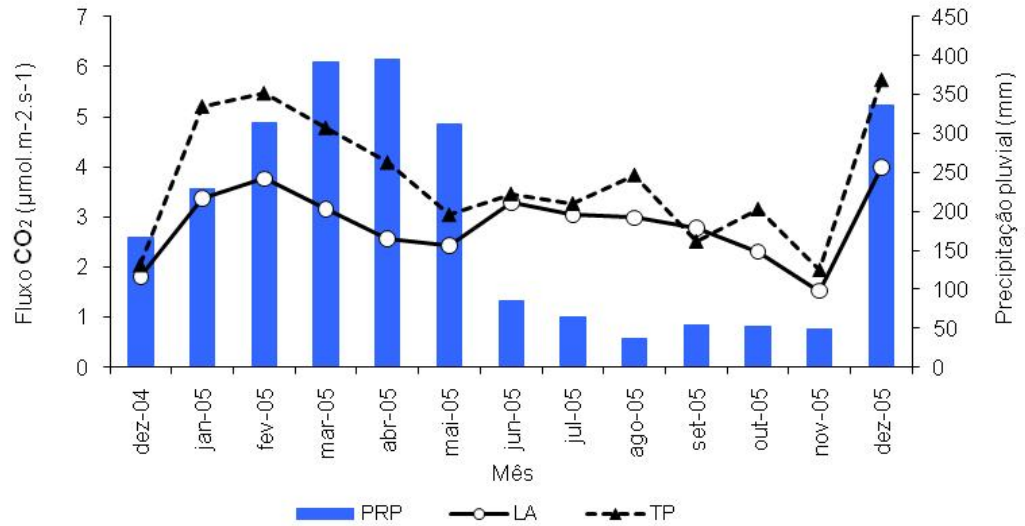


Figura 10. Variação mensal da precipitação e dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo em áreas de LA e TP.

Na tabela 3 é apresentado um resumo estatístico dos resultados de fluxos de CO<sub>2</sub> em LA e TP com as respectivas variações na temperatura do solo na estação chuvosa. Os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo de TP apresentaram maior variabilidade do que os fluxos em LA. Os fluxos de CO<sub>2</sub> no LA variaram de 1,80 a 3,98 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, enquanto os fluxos de CO<sub>2</sub> na TP variaram de 2,05 a 5,73 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Pequenas variações de temperatura de solo foram observadas entre as áreas experimentais.

Tabela 3. Médias de fluxos de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo (estação chuvosa).

Estação chuvosa	Fluxos CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		Temperatura do solo (°C)	
	Latossolo amarelo	Terra preta	Latossolo amarelo	Terra preta
Média	3,01	4,33	26,1	27,1
Máximo	3,98	5,73	29,1	30,9
Mínimo	1,80	2,05	25,4	25,5
Amplitude	2,18	3,68	3,7	5,4
EP ( $\pm$ )	0,30	0,51	0,5	0,7
DP	0,78	1,36	1,3	1,8
<b>CV (%)</b>	26	31	5	7

Um resumo estatístico dos fluxos de CO<sub>2</sub> na área de LA e TP está apresentado na tabela 4. Observou-se uma redução nas magnitudes dos fluxos em ambas as áreas experimentais e também na variabilidade, expressa pela amplitude e coeficiente de variação. Os fluxos de CO<sub>2</sub> no LA variaram de 1,52 a 3,29  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  enquanto na TP a variação foi de 1,95 a 3,84  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Tabela 4. Médias de fluxos de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo (estação menos chuvosa).

Estação menos chuvosa	Fluxos CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		Temperatura do solo (°C)	
	Latossolo amarelo	Terra preta	Latossolo amarelo	Terra preta
Média	2,65	3,03	25,2	26,2
Máximo	3,29	3,84	25,3	26,9
Mínimo	1,52	1,95	24,8	25,4
Amplitude	0,28	1,89	0,5	1,5
EP ( $\pm$ )	0,24	0,26	0,1	0,2
DP	0,64	0,68	0,2	0,6
<b>CV (%)</b>	24	23	1	2

Na tabela 5 é apresentada uma síntese estatística dos valores médios anuais dos fluxos de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo. Os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo no LA variaram de 1,52 a 3,98  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto na TP a variação foi de 1,95 a 5,73  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente. A amplitude dos fluxos de CO<sub>2</sub>



para LA foi da ordem de  $2,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e para TP foi da ordem de  $3,78 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ficando evidente a grande sazonalidade desses fluxos em ambas as áreas experimentais. O Coeficiente de variação (CV) mostra que quanto menor o valor de CV maior será a homogeneidade dos dados, sendo o CV para LA de 25% e de 34% para TP, evidenciando uma maior variação na TP. O maior valor de desvio padrão (DP) foi na TP,  $1,25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto para LA foi de  $0,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Tabela 5. Médias de fluxos de  $\text{CO}_2$  temperatura e umidade do solo

Mês	Fluxo $\text{CO}_2$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		Temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ )		Umidade do solo (%)	
	Latossolo amarelo	Terra preta	Latossolo amarelo	Terra preta	Latossolo amarelo	Terra preta
dez-04	1,80	2,05	29,1	30,9	10,7	9,5
jan-05	3,37	5,20	26,0	27,6	-	-
fev-05	3,76	5,46	25,4	26,0	-	-
mar-05	3,16	4,77	25,8	26,5	19,4	12,3
abr-05	2,56	4,09	25,6	26,0	25,5	30,3
mai-05	2,42	3,05	25,4	25,5	40,9	33,8
jun-05	3,29	3,46	25,3	25,6	27,8	25,9
jul-05	3,04	3,27	24,8	25,4	29,1	27,2
ago-05	2,98	3,84	25,0	26,3	21,0	24,5
set-05	2,77	2,52	25,1	26,3	21,4	21,8
out-05	2,30	3,16	25,3	26,7	32,6	27,3
nov-05	1,52	1,95	25,3	26,9	25,1	23,1
dez-05	3,98	5,73	25,4	27,0	20,6	22,0
Média	2,84	3,73	25,7	26,7	25,1	23,6
Máximo	3,98	5,73	29,1	30,9	40,9	33,8
Mínimo	1,52	1,95	24,8	25,4	10,7	9,5
Amplitude	2,46	3,78	4,3	5,5	30,2	24,3
EP ( $\pm$ )	0,20	0,35	0,3	0,4	2,2	2,0
DP	0,72	1,25	1,1	1,4	7,9	7,2
<b>CV (%)</b>	25	34	4	5	31	30

#### 4.2. Variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo em um dia na estação chuvosa e na estação menos chuvosa.

A Figura 11 apresenta a variação média horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo na parcela de LA em um dia típico da estação chuvosa (abril) e da estação menos chuvosa (agosto). Os dados apresentados nesta figura referem-se a duas campanhas de medições horárias de CO<sub>2</sub>, durante 24 horas consecutivas, durante a época chuvosa e seca daquela região, em latossolo amarelo. Pequena variação na magnitude dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo foi registrada no dia em agosto, porém as medições feitas em abril (estação chuvosa) sugerem uma variação diurna nos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo. O fluxo de CO<sub>2</sub>, média horária, foi de  $2,38 \pm 0,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em agosto e ao passo que em abril foi de  $1,77 \pm 0,17 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Este resultado, aparentemente, contradiz os resultados apresentados mensalmente e que são confirmados na literatura científica. Todavia, deve-se ressaltar que geralmente as observações dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo baseiam-se em medições feitas em torno do meio-dia, deixando de levar em consideração a possível variação diurna observada durante o período da estação chuvosa.

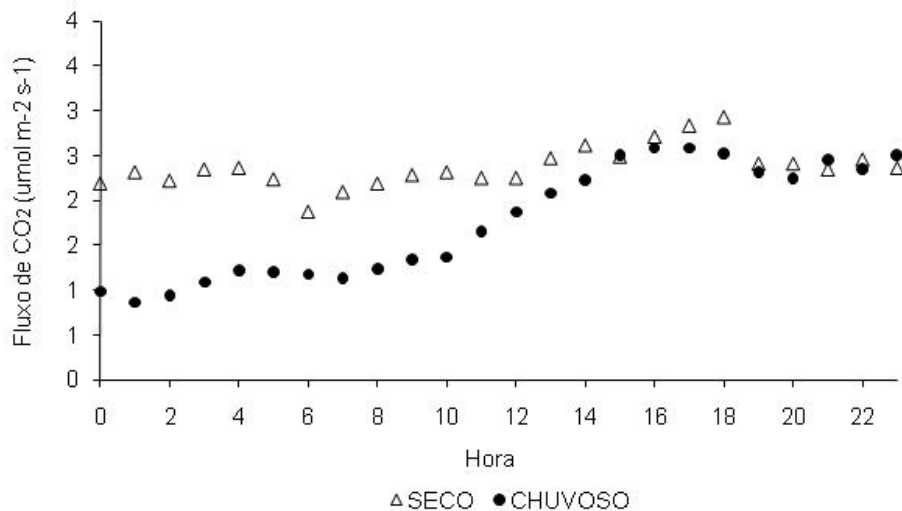


Figura 11. Variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, em um dia típico da estação chuvosa e da estação menos chuvosa, na parcela LA.

Ao se comparar os valores médios horários dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo em intervalos de 6h em um dia típico da estação chuvosa e menos chuvosa, conforme está apresentado na Figura 12, fica evidente o contraste entre a pequena variação observada em agosto com a variação diurna observada em abril.

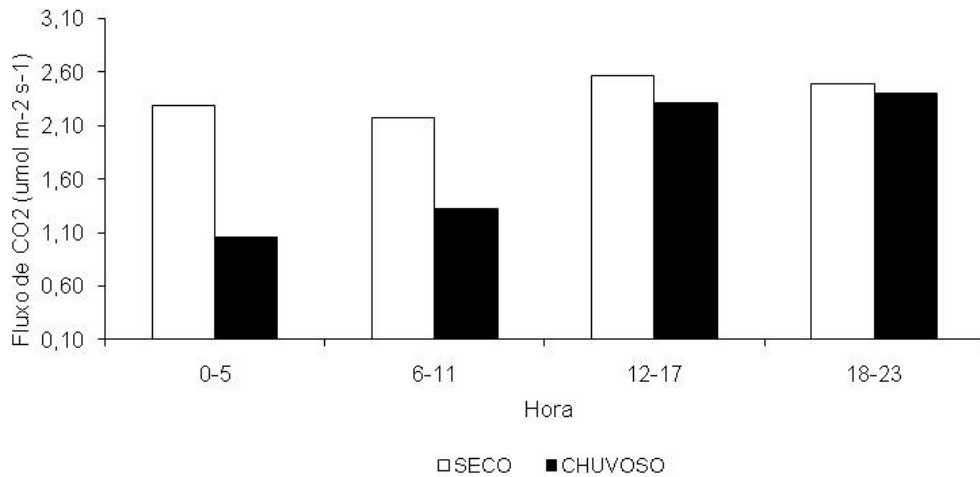


Figura 12. Distribuição horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, na parcela de LA.

#### 4.3. Influência da temperatura do solo com os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, no LA.

Na literatura encontram-se vários estudos em diferentes ecossistemas, que mencionam a dependência do fluxo de CO<sub>2</sub> com a temperatura do solo; entre eles RAICH et al. (1992), LLOYD & TAYLOR (1994), MEIER et al. (1996), XU e QI (2001), FANG e MONCRIEFF (2001) e SOTTA et al. (2004). A variação média horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo e da temperatura está apresentada na Figura 13, para um dia do mês de abril e na Figura 14, para um dia do mês de agosto. Em ambas as figuras estão bem evidenciadas a dependência das variações de temperatura do solo.

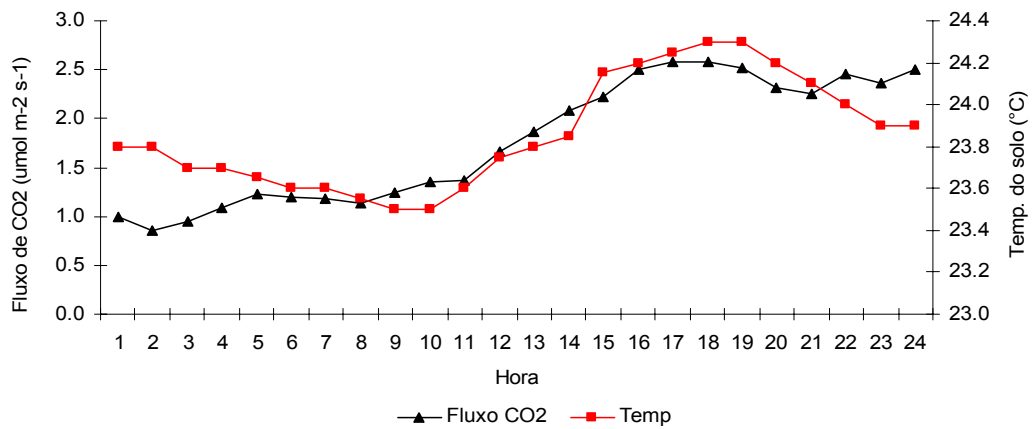


Figura 13. Variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo em um dia do mês de abril, na parcela LA.

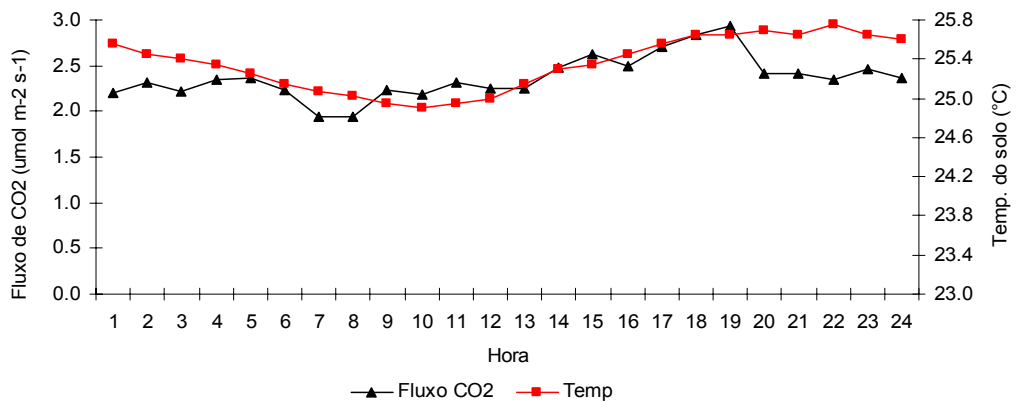


Figura 14. Variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo em um dia do mês de agosto, na parcela LA.

#### 4.4. Influência da umidade do solo nos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, no LA

Na figura 15 apresenta a variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo e do teor de umidade do solo (Us). Esses resultados indicam uma relação inversa entre a magnitude dos fluxos horários e o teor de umidade do solo.

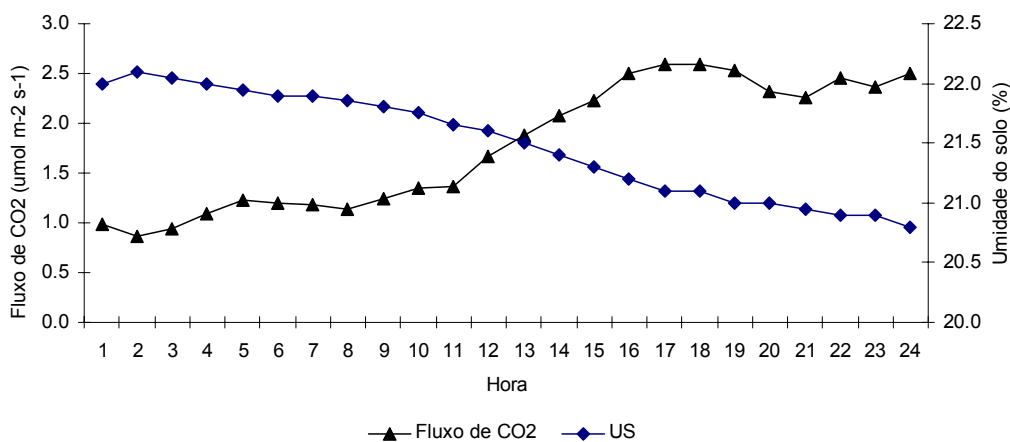


Figura 15. Variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> e umidade do solo em um dia do mês de agosto.

#### 4.5. Influência da liteira nos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo

Na região de Caxiuanã a dinâmica da liteira é sazonal, assim como em todas as áreas de estudo com o maior estoque ocorrendo na estação seca, embora a taxa de decomposição seja muito acelerada durante a estação chuvosa. As Figuras 16 e 17 apresentam os valores médios mensais dos fluxos de CO<sub>2</sub> e produção de liteira nas áreas de LA e TP, respectivamente. Em ambas as áreas fica evidenciada a contribuição da liteira nos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo. Essa característica é mais evidente na figura 16 para o solo LA. Como os máximos de produção de liteira ocorrem na estação menos chuvosa, isso contribui para a ocorrência de um pico secundário nos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, em ambas as áreas experimentais.

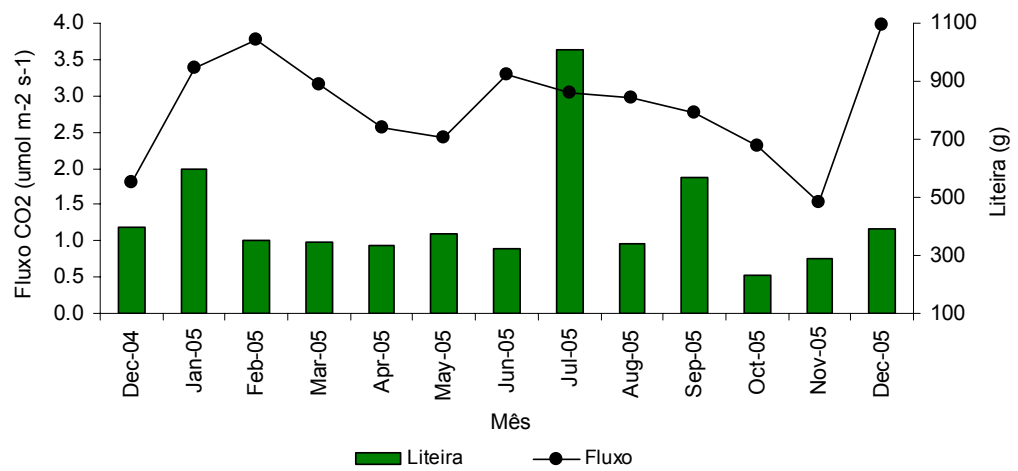


Figura 16. Produção de liteira e fluxo de CO<sub>2</sub> no LA.

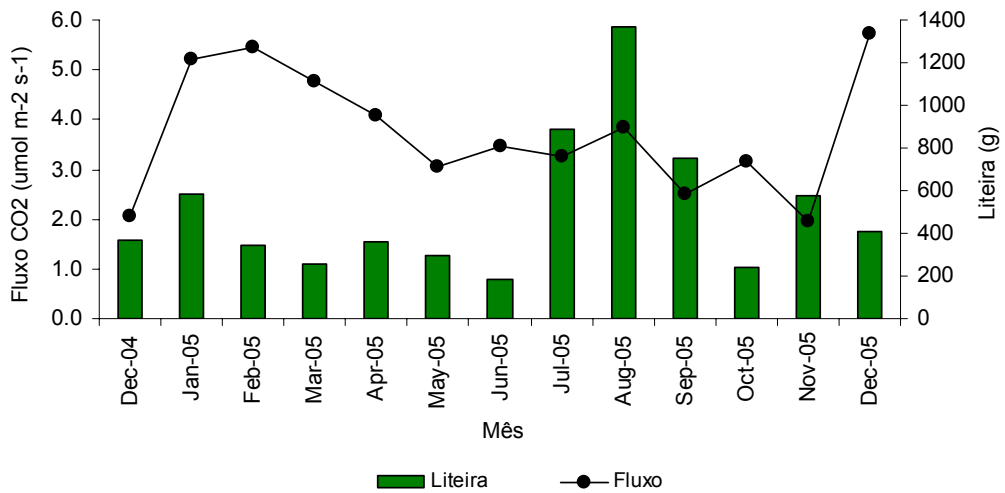


Figura 17. Produção de liteira e fluxo de CO<sub>2</sub> na TP.

## 5. CONCLUSÕES

A variação sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo em áreas de LA e TP ficou bem evidenciada em resposta ao regime de precipitação, umidade e temperatura do solo;

As maiores magnitudes dos fluxos de CO<sub>2</sub> do solo, de um modo geral, ocorreram no período chuvoso em ambas as áreas experimentais. Devido a fatores de maior decomposição da matéria orgânica no solo devido o aumento da umidade no período chuvoso.

Os fluxos horários de CO<sub>2</sub> na área de LA em agosto (menos chuvoso) apresentaram pequena variação entre o período diurno e noturno, enquanto em abril (chuvoso) a variação nos fluxos foi bem mais acentuada nos respectivos períodos.

Os resultados desse trabalho indicam uma maior alocação de C ao longo do ano na TP que em relação a LA, provavelmente porque a TP tem maior quantidade de matéria orgânica.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S.S.; LISBOA, P.L.B.; SILVA, A.S.L. Diversidade florística de uma comunidade arbórea na Estação Científica Ferreira Penna, em Caxiuanã (Pará). Bol. Museu Paraense Emílio Goeldi, s. Botânica, 9 (1): p. 99-105, 1993.

ANDERSON, J.M. Responses of soils to climate-change. *Advances in Ecological Research*, Washington, v.22, p.163-210, May 1992.

ARAGÃO, L.E.O.C.; MALHI, Y. et al. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils, *Biogeosciences Discussions*. v. 6, p. 2441-2488, 2009.

BALL, A.S.; DRAKE, B.G. Stimulation of soil respiration by carbon dioxide enrichment of marsh vegetation. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v.30, n.8-9, p.1203-1205, Aug 1998.

BASSO, L.F.C; KIMURA, H. Ecosystema terra preta - recriar o que já foi criado A terra preta dos índios da Amazônia. *Rev. Ciênc. Admin.*, Fortaleza, v. 14, n. 2 , p. 230-250, dez. 2008.

BBC Brasil. Cientistas tentam recriar no Pará solo indígena que pode combater a fome. 6 janeiro 2004. Disponível em: [http://www.bbc.co.uk/portuguese/ciencia/story/2004/01/040106\\_terrapretaml.shtml](http://www.bbc.co.uk/portuguese/ciencia/story/2004/01/040106_terrapretaml.shtml). Acesso em: 13 mai. 2009.

BEKKU, Y.; KOIZUMI, H.; OIKAWA, T.; IWAKI, H. Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*, Belfield, v.5, n.3, p.247-254, June 1997.

CHAMBERS, J.Q.; TRIBUZY, E. S.; TOLEDO, L.C.; CRISPIM, B. F.; HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; ARAUJO, A.C.; KRUIJT, B.; NOBRE, A.D.; TRUMBORE, S. E. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecological Applications*, Washington, v.14, n.4, p. S72-S88, Aug. 2004.

COUTINHO, L. M. e LAMBERTI, A. Respiração edáfica e produtividade primária numa comunidade Amazônica de mata de terra-firme. *Ciência e Cultura*, 23, 411-419. 1971.

COX, P.M.; BETTS, R. A.; JONES, C.D.; SPALL, S.A.; TOTTERDELL, I.J. Acceleration of Global Warming Due to Carbon-Cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model. *Nature* 408: p. 184-187, 2000.

DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; BOLSTAD, P.; CLARK, D.A.; CURTIS, P.S.; ELLSWORTH, D. S.; HANSON, P. J.; LAW, B. E.; LUO, Y.; PREGITZER, K. S.; RANDOLPH, J.C.; ZAK, D. Belowground carbon allocation in forests



estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, San Andreans, v.113, n.1/4, p.39-51, Dec. 2002.

DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E.; AMUNDSON, R. *Biogeochemistry*. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, London, v. 408, n. 6814, p. 789-790, Dec. 2000.

Dias, J. D. Fluxo de CO<sub>2</sub> proveniente da respiração do solo em áreas de florestas nativa da Amazônia. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 87 p. 2006.

DREWITT, G. B.; BLACK, T. A.; NESIC, Z.; HUMPHREYS, E. R.; JORK, E. M.; SWANSON, R.; ETHIER, G. J.; GRIFFIS, T.; MORGENSTERN, K. Measuring forest floor CO<sub>2</sub> fluxes in a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, New York, v.110, p.299-317, 2002.

EUSKIRCHEN, E.S.; CHEN, J.; GUSTAFSON, E.J.; MA, S., Soil respiration at dominant patch types within a managed northern Wisconsin landscape. *Ecosystems*. v.6, p. 595–607. 2003.

FANG, C.; MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v.33, n.2, p.155-165, Feb. 2001.

FEARNSIDE, P. M. Brazil Amazon Forest and the global carbon problem - reply. *Interciência*, Rio de Janeiro. v.11, n.2, p.58-64, mar / abr. 1986.

FERREIRA DA COSTA, R.; Efeito da exclusão parcial da chuva na transpiração de espécies vegetais da Flona de Caxiuana (Projeto ESECAFLOR/LBA), Pará. Tese de Doutorado em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. Campina Grande, PB, 2008, 96p.

FISHER, R.A.; WILLIAMS, M.; LOBO do VALE, R.; da COSTA, A.L.; MEIR, P. Evidence from Amazonian forests is consistent with isohydric control of leaf water potential. *Plant, Cell Env*. Doi: 10.1111/j.1365-3040.2005.01407.x, 2005.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* 31: p. 669-678, 2000.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The Terra Preta phenomenon - a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88: p. 37-41, 2001.

GRACE, J. Carbon cycle. Encyclopedia of Biodiversity, New York, v.1, p. 69-629, Mar. 2001.

GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology, New Delhi, v. 92, n. 2, p. 189-202, Apr. 2004.

GRACE, J., MALHI, Y., LLOYD, J., MCINTYRE, MIRANDA, A.C., MEIR, P. and H.S. MIRANDA, The use of eddy covariance to infer the net carbondioxide uptake of Brazilian rain forest, Global Change Biol., 2, 209-218, 1996.

HEINRICH. D.; HERGT, M. Dtv-Atlas zur Oekologie. Muenchen:Deutscher Taschenbuch Verrlag. 286p. 1990.

HIGUCHI, N., SANTOS, J., RIBEIRO, R. J., MINETE, L.; BIOT, Y. Biomassa da Parte Aérea da Vegetação da Floresta Tropical úmida de Terra – Firme da Amazônia Brasileira. ACTA AMAZÔNICA,28 (2): 153-166,1998.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J. Q.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. P.; ROCHA, R. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. Floresta (UFPR), Curitiba, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.

HOUGHTON, R.A. Forest and the global carbon cycle: current storage and emission. In: WORKSHOP EMISSÃO VERSOS SEQÜESTRO UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGOCIO PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Ed. Campus, p.12 - 13. 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 & Biochemistry, Oxford, v. 25, n. 11, p.1537-1546, Nov. 1993.

JANSSENS, I.A.; KOWALSKI, A.S.; LONGDOZ, B.; CEULEMANS, R. Assessing forest soil CO<sub>2</sub> efflux: an in situ comparison of four techniques. Tree Physiology, Berkeley, v.20, n.1, p.23-32, Jan. 2000.

KERN, D.C. et al. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. . In: LEHMANN, J. et al. Dark earths: origin, properties, management. Amsterdam: Kluwer Academic , chap. 4. 2003.

KERN, D.C. Geoquímica e pedogeoquímica de sítios arqueológicos com terra preta na floresta nacional de Caxiuanã (Portel-Pa). Tese de Doutorado. Centro de Geociencias, Universidade Federal do Para Belem, p. 124, 1996.

KERN, D.C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T.E.; FRAZÃO, F.J.L.; SOMBROEK, W.; MYERS, T. P.; NEVES, E. G. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: J. Lehmann, D.C. Kern, B. Glaser, & W.I.

Woods (eds) Amazonian Dark Earths: origin, properties, Management. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 51-75, 2003a.

KIRSCHBAUM, M. U. F. The temperature-dependence of soil organic-matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic-C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, 27, n. 6, p. 753-760, June 1995.

LEHMANN, J. et al. Soil fertility and production potential. In: LEHMANN, J. et al. *Dark earths: origin, properties, management*. Amsterdam: Kluwer Academic, chap. 6. 2003.

LISBOA, P. L. B.; ALMEIDA, S. S.; SILVA, A. S. L. Caxiuanã. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, 1 : p. 163-204,1997.

LLOYD, J. e TAYLOR, A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315–323. 1994.

LUCHESE, E.B; FAVERO, L.O.B.; LENZI, E. Fundamentos da química do solo. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 182 p. 2001.

MACHADO, Pedro L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, V. 28, N. 2, p. 329-334, 2005.

MALHI Y.; WOOD, D.; BAKER, T.R.; et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests, *Global Change Biology* 12 (7): p. 1107-1138, 2006.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22: p. 715-740. 1999.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860): p. 169-172. 2008.

MALHI, Y.; GRACE, J.. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide TREE, v. 15, n. 8, August 2000.

MARTINS, F.R. e MATTHES, L.A.F. Respiração edáfica e nutrientes na Amazônia (Região de Manaus): floresta arenícola, campinarana e campina. *Acta Amazonica*, 8, 233–244. 1978.

MEDINA, E.; KLINGE, H.; JORDAN, C.F. et al. (1980) Soil respiration in Amazonian rain forests in the Rio Negro Basin. *Flora*, 170, 240–250.

MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A.C.; LLOYD, J. Soil respiration in a rainforest in Amazônia and cerrado in central Brazil. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C. A.;

ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R. L. (Eds.). Amazonian deforestation and climate. Wiley, Chichester. p. 319-330, 1996.

MEIR, P.; METCALFE, D.B.; COSTA, A.C.L.; FISHER, R.A. The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. Philosophical Transactions the Royal Society B. 363, 1849–1855 doi:10.1098/rstb.2007.0021. 2008.

METCALFE, D.B., MEIR, P., ARAGÃO, L.E.O.C., MALHI, Y., da COSTA, A. C. L., BRAGA, A.; GONÇALVES, P. H. L.; de ATHAYDES, J.; de ALMEIDA, S. S.; WILLIAMS, M. Factors controlling spatio-temporal variation in carbon dioxide efflux from surface litter, roots, and soil organic matter at four rain forest sites in the eastern Amazon. Journal of Geophysical Research, 112 (G04001), 2007.

MILLER, H.G. Dynamics of nutrient cycling in plantation ecosystems. In: BOWEN, G.D., NAMBIAR, E.K.S. Nutrition of plantation forests. Academic Press. London. p. 53-78. 516 p. 1984.

MORAES, J. C.; COSTA, J. de P. R.; ROCHA, E. J. P.; SILVA, I. M. O. Estudos hidrometeorológicos na bacia do rio Caxiuanã. In: Lisboa, P. L. B. (org). Caxiuanã. CNPQ/Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, p.85-95. 1997.

MOSCOVICH, F.A. Modelos de crecimiento y producción forestal. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Monte Carlo (EEA) Informe técnico n. 55, p. 42, 2004.

MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; MCMURTRIE, R. E.; MCGILVRAY, A. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature. Global Change Biology, Oxon, v.8, n.2, p.105-123, Feb. 2002.

NOBRE, C.A.; SELLERS, P.; SHUKLA, J. 1991 . Regional climate change and amazonian deforestation model. Journal of Climate vol. 4 , p. 957 – 988.  
NOBRE, Carlos A.; NOBRE, Antônio D.. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. Estudos avançados, São Paulo, v. 16, n. 45, Aug. 2002 . doi: 10.1590/S0103-40142002000200006.

NUNES, P.C. Influência do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo na produção de forragem numa pastagem extensiva e num sistema agrosilvopastoril. Dissertação (Mestrado em Ciências Agricultura Tropical) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 68 p. 2003.

PHILLIPS, O. L ; ARAGÃO, L.E.O.C.; et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. Science, 323: 1344-1347. 2009.

PHILLIPS, O.L.; MALHI, Y.; HIGUCHI, N.; LAURANCE, W. F.; NÚÑEZ, P. V.; VÁSQUEZ, R.M.; LAURANCE, S. G.; FERREIRA, L.V.; STERN, V.; BROWN, S. e GRACE, J. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 282 (5388): 439-442, 1998.

PHILLIPS, O., BAKER, T.R. 2002. Rainfor Field Manual. Disponível em: <<http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/projdocs.html>>. Acesso em: 07 abr. 2009.

POST, W.M.; Emanuel, W.R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156-159, 1982.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: Salesward-Discovery, 446p.1996.

RAICH, J. W.; POTTER, C. S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biochemical Cycles*. v. 9, p. 23-36, 1995.

RAICH, J.W. Effects of forest conversion on the carbon budget of a tropical soil. *Biotropica*, Malden, v.15, n.3, p.177-184, Oct 1983.

RAICH, J.W; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration relationship to vegetation and climate. *Tellus*, Copenhagen, v.44B, p.81-99, June 1992.

RAYMENT, M.B. Closed chamber systems underestimate soil CO<sub>2</sub> efflux. *European Journal of Soil Science*, New Delhi, v. 51, p.107–110, Apr. 2000.

REZENDE, M. O. O. A importância da matéria orgânica do solo no ciclo do carbono. (parte I – O ciclo do carbono na natureza e a qualidade do solo do ponto de vista químico). Disponível em: [www.unb.br/iq/enqamb/aimportanciadoC.pdf](http://www.unb.br/iq/enqamb/aimportanciadoC.pdf). Acesso em: 08 abr. 2009.

ROBERTS, J.M. Effects of temperature on soil respiration: a brief overview. Wallingford: Center for Ecology and Hydrology, 45 p. 2000.

ROSENZWEIG, C.; HIELLEL, D. Soil and global climate change: challenge and opportunities. *Soil Science*, New York, v.165, p. 47-56, 2000.

SALIMON, C. I.; DAVIDSON, E. A.; VICTORIA, R. L.; MELO, A. W. F. CO<sub>2</sub> flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. *Global Change Biology*. v.10, p.833-843, doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00776.x, 2004.

SÁNCHEZ, M.L.; OZORES, M.I.; LÓPEZ, M.J.; COLLE, R.; de TORRE, B.; GARCÍA, M.A.; PÉREZ, I. Soil CO<sub>2</sub> fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.118. 85-95. 2003.

SCHUMACHER, M.V. Naehrstoffkreislauf in verschiedenen Bestaeden von *Eucalyptus saligna* (Smith), *Eucalyptus dunnii* (Maiden) und *Eucalyptus globulus* (Labillardière) in Rio Grande do Sul, Brasilien. 1995. 167f. Tese (Doutorado em Ecologia e Nutrição Florestal) - Universität für Bodenkultur, Wien, 1995.

SINGH, J.S.; GUPTA, S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review*, New York, v.43, n.4, p.499-528, Aug. 1977.

SOMBROEK W.G.; Nachtergaele F.O. & Hebel A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417-426. 1993.

SOUZA, J. S. Dinâmica especial e temporal do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo de terra firme na Amazônia Central. Dissertação (Mestrado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) - Instituto de Pesquisa na Amazônia - INPA, Manaus, 64 p. 2004.

SOTTA, E.D. Fluxo de CO<sub>2</sub> entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central, 1998. 150p. Dissertação de (Mestrado em Ciências Florestais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 1998.

SOTTA, E.D.; MEIER, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a tropical forest in central Amazon. *Global Change Biology*. v. 10, p. 601-617, 2004.

SUBKE, J.A.; REICHSTEIN, M.; TENHUNEN, J.D. Explaining temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v.35, n.11, p.1467-1483, Nov. 2003.

TIAN, H. Q.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D. W. Effect of Interannual Climate Variability on Carbon Storage in Amazonian Ecosystems, *Nature*, 396: p. 664-667, 1998.

VALENTINI, C.M.A. Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo de uma área de floresta de transição no noroeste de Mato Grosso. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 82 p. 2004.

WANNER, H. Soil respiration, litter fall and productivity of tropical vegetation types. *Ecology*, Washington, v. 48, p. 652-653, Oct. 1979.

WOFSY, S.C.; HARRISS, R.C, KAPLAN, W.A. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, 93, 1377-1387. 1988.

XU, M; QI, Y. Spatial and seasonal variations of Q(10) determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles* 15: 687-696. 2001.