UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

EFEITOS DA EXCLUSÃO DA CHUVA NO FLUXO DE CO_2 DO SOLO NA FLORESTA NACIONAL DE CAXIUANÃ, PARÁ

João de Athaydes Silva Júnior

CAMPINA GRANDE, PB

Fevereiro – 2008

JOÃO DE ATHAYDES SILVA JÚNIOR

EFEITOS DA EXCLUSÃO DA CHUVA NO FLUXO DE CO_2 DO SOLO NA FLORESTA NACIONAL DE CAXIUANÃ, PARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Linha de pesquisa: Micrometeorologia

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo (UFCG - CTRN - UACA)

Prof. Dr. Antonio Carlos Lôla da Costa (UFPA - IG - FM)

CAMPINA GRANDE, PB.

Fevereiro – 2008

JOÃO DE ATHAYDES SILVA JÚNIOR

EFEITOS DA EXCLUSÃO DA CHUVA NO FLUXO DE CO_2 DO SOLO NA FLORESTA NACIONAL DE CAXIUANÃ, PARÁ

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 08/02/2008

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr ANTONIO CARLOS LÔLA DA COSTA
Departamento de Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. ARTHUR MATTOS
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

A meus pais João de Athaydes Silva e Glória Maria Gomes Ferreira Silva, e a tia Rita de Cássia Gomes Ferreira Vaz (I*n Memoriam*), DEDICO.

À amada esposa Lídia Farias e as minhas irmãs Louise e Thais e ao afilhado Lucas, OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus nosso criador, por todas as graças alcançadas em minha vida.

Aos meus familiares, que mesmo distantes, nunca deixaram de me incentivar nas horas boas e difíceis.

A minha esposa pelo carinho e incentivos durante o curso.

Ao Dr. Pedro Vieira de Azevedo e Dr. Antonio Carlos Lôla da Costa, pela orientação e confiança depositada que possibilitaram a conclusão deste trabalho.

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

Aos professores Vicente de Paulo R. da Silva e Manoel F. G. Filho, pela amizade e ensinamentos transmitidos.

A Divanete Cruz secretária da Pós-Graduação em Meteorologia pelo exemplo de eficiência, competência, profissionalismo e atenção apresentada durante o curso.

Aos amigos da EBP e companheiros de campo Antonio Lôla, Daniel Metcalfe, Paulo Henrique, Alan Braga, Luiz Aragão, Yadvinder Malhi, Rafael Costa, Patrick Meir, Samuel Almeida, Almir (Arakem) pelos ensinamentos e aos funcionários de ECFPn..

Aos projetos PAN-AMAZÔNIA, ESCAFLOR/LBA e CARBO–PARÁ/LBA, pelo financiamento, oportunidade e apoio irrestrito na realização das coletas de dados em campo e pela concessão de bolsa para que isso fosse possível.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para custeio dos estudos.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, em especial ao Rafael Costa, pelo apoio na realização deste trabalho. Os amigos João Hugo, Lindemberg Lucena (Bega), Genival Silva, Ronaldo Menezes, Roberto Alan e a amiga Leidiane Leão, pelo companheirismo e amizade.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO XIV

ABSTRACT XV

1. INTRODUÇÃO 1

OBJETIVOS 3

2. REVISÃO DE LITERATURA 4

2.1. Respiração do solo 4

2.2. Técnicas para determinar o fluxo de CO_2 no solo 6

2.3. Medidas de CO_2 no solo na Amazônia 7

2.4. Fontes geradoras de CO_2 no solo 11

3. MATERIAL E MÉTODOS 14

3.1. Caracterização da área de estudo 14

3.2. Estrutura do experimento 16

3.3. Elementos meteorológicos 19

3.4. Medida da respiração do solo 20

3.5. Medida da umidade do solo 22

3.6. Medida da temperatura do solo 23

3.7. Estimativa de biomassa da parte aérea da vegetação 23

4. RESULTADOS 26

4.1 Variáveis Meteorológicos 26

4.1.1. Temperatura e umidade relativa do ar 26

4.1.2. Precipitação 28

4.1.3. Velocidade e direção do vento 31

4.2. Respiração do solo 33

4.3. Umidade do solo 37

4.4. Temperatura do solo 40

4.5. Correlações entre a precipitação pluvial e o fluxo de CO_2 do solo. 43

4.6. Correlações entre o fluxo de CO_2 do solo e biomassa vegetal 46

4.7 – Correlações entre a matéria orgânica depositada na superfície do solo (liteira) com o fluxo de CO_2 do solo 49

4.8 – Correlações múltiplas entre o fluxo de CO_2 do solo e as variáveis edáficas e meteorológicas 52

5. CONCLUSÕES 54

6. SUGESTÕES 55

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 56

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

CAS	Conteúdo de água no solo
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
DAP	Diâmetro à altura do peito
ESECAFLOR	Estudo da Seca da Floresta
FLONA	Floresta Nacional
Flx	Fluxo
IAF	Índice de área foliar
IRGA	Analisador de gás infravermelho (Infrared Gas Analyzer)
ML	Massa da liteira
MOS	Matéria orgânica da superfície do solo
NOx	Óxido nitroso
Pg	Peta grama (10^{15}g)
PPM	Parte por milhão
PTB	Peso total da biomassa
PVC	Poli cloreto de vinila (polychloroeteno)
Rs	Respiração do solo
Ts	Temperatura do solo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As cinco principais fontes contribuintes ao fluxo total de CO_2 do solo. 13

Figura 2 - Localização geográfica da área experimental. 16

Figura 3 - Área da parcela experimental vista acima e abaixo dos painéis plásticos. 18

Figura 4 - Esquematização das medidas realizadas dentro das parcelas. 19

Figura 5 - Medida em campo da respiração do solo. 22

Figura 6 - Esquema da instalação da fita dendrométrica. 25

Figura 7 - Média mensal da temperatura e umidade relativa do ar na FLONA de Caxiuanã, PA entre novembro de 2004 e novembro de 2005. 27

Figura 8 - Ciclo médio horário da temperatura e umidade relativa do ar (média ± desvio-padrão) na FLONA de Caxiuanã, PA entre novembro de 2004 e novembro de 2005. 28

Figura 9 - Totais mensais da precipitação pluvial entre novembro de 2004 e novembro de 2005 e as médias mensais entre 1980-2007 (IBAMA) com os respectivos desvios-padrão na FLONA de Caxiuanã, PA. 30

Figura 10 - Ciclo médio horário da precipitação pluvial (média ± desvio-padrão) na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. 31

Figura 11 - Médias mensais da velocidade do vento na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. 32

Figura 12 - Predominância da direção do vento na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. 33

Figura 13 – Comportamento anual do fluxo de CO_2 médio (média ± desvio-padrão) na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. 35

Figura 14 - Ciclo diário do fluxo de CO_2 do solo na FLONA de Caxiuanã, PA nos dias 19 e 20 de agosto de 2005. 36

Figura 15 - Média mensal da umidade do solo no período de novembro de 2004 a novembro de 2005, na FLONA de Caxiuanã, PA. 38

Figura 16 - Regressão linear entre as médias mensais da umidade e o fluxo de CO_2 do solo da parcela de controle na FLONA de Caxiuanã, PA. 39

Figura 17 - Regressão linear entre as médias mensais da umidade e o fluxo de CO_2 do solo da parcela de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA. 40

Figura 18 - Média mensal da temperatura do solo na FLONA de Caxiuanã, PA, no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. 41

Figura 19 - Regressão linear entre os valores médios mensais da temperatura do solo e do fluxo de CO_2 do solo da parcela de controle na FLONA de Caxiuanã, PA. 42

Figura 20 - Regressão linear entre os valores mensais da temperatura do solo e do fluxo de CO_2 do solo da parcela de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA. 42

Figura 21 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (1 dia antes da leitura). 44

Figura 22 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (3 dias antes da leitura). 44

Figura 23 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (5 dias antes da leitura).....45

Figura 24 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (10 dias antes da leitura).....45

Figura 25 - Variação mensal do peso total da biomassa aérea na parcela de controle e exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA durante o ano de 2005.....47

Figura 26 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e o total de biomassa aérea da parcela de controle na FLONA de Caxiuanã, PA durante o ano de 2005. 48

Figura 27 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e o total de biomassa aérea da parcela de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA durante o ano de 2005. 48

Figura 29 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na superfície, na parcela de controle, na FLONA de Caxiuanã, PA. 51

Figura 30 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na parcela de exclusão, na FLONA de Caxiuanã, PA. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos de fluxo de CO_2 do solo realizados na Região Amazônica. Os valores representam a média ± desvio-padrão (quando disponível)..... 10

Tabela 2 – Médias do fluxo de CO_2 do solo com e sem a presença de liteira na FLONA de Caxiuanã, PA. 50

Tabela 3 – Valores de R^2 encontrados na correlação linear múltipla do fluxo de CO_2 do solo e as variáveis edáficas e meteorológicas..... 53

RESUMO

Um experimental de campo foi conduzido na Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã, Pará, Brasil, (1°43'3,5" S; 51°27'36"W), com o objetivo de investigar os efeitos do estresse hídrico sobre o ciclo da floresta e as alterações provocadas pelo evento. Duas parcelas (A e B), de 1 hectare cada uma foram usadas, uma como referência (parcela de controle) para os experimentos realizados, e outra (parcela de exclusão) onde foi feita a exclusão de, aproximadamente, 70% da água da chuva. As análises apresentadas neste trabalho referem-se a informações obtidas durante os meses de novembro de 2004 a novembro de 2005. Foi observado que a respiração média do solo foi maior na estação chuvosa, em ambas as parcelas, 3,49 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e 3,88 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} nas parcelas de controle e exclusão, respectivamente, e foi menor na estação seca, com 3,41 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e 2,44 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, nas parcelas de controle e exclusão, respectivamente. A média da umidade do solo foi de 12,3 e 9,0 % nas parcelas de controle e de exclusão, respectivamente. As médias e desvio-padrão da temperatura do solo no período estudado para as parcelas de controle e de exclusão foram de 25,9 ± 1,2 e 25,8 ± 0,8 ºC, respectivamente. Foi encontrada uma melhor correlação da precipitação pluvial acumulada em 3 dias antes da leitura com o fluxo de CO_2 do solo (r = 43,6%). As correlações entre a temperatura do solo e o fluxo de CO_2 do solo na parcela de controle e de exclusão foram fracas (r =28,0 % e r = 30,6 %), respectivamente, já a correlação entre a umidade do solo e o fluxo de CO_2 do solo na parcela de controle foi ainda mais fraca (r = 12,5%) e na parcela de exclusão foi moderado (r = 49,7%). As correlações da respiração do solo com o peso total da biomassa aérea foram moderadas nas duas parcelas (r = 48% e r = 43%), na parcela de controle e de exclusão, respectivamente.

Palavras-Chave: precipitação pluvial, umidade do solo, temperatura do solo, respiração do solo, floresta amazônica.

ABSTRACT

An experimental of field was conducted in the National Forest of Caxiuanã, Pará, Brazil, (1°43'35" S; 51°27'36" W), with the objective of investigating the effect of drought on the forest cycle and the alterations caused by the event. Two plots (A and B) of 1 hectare each, were used, one as reference (control plot) and the other (exclusion plot) where the experiments were carried out with the exclusion of approximately 70% of the rainfall. The analyses presented in this study refer to information obtained for November, 2004 and November, 2005. The average soil respiration was higher in the wet season in both plots, 3.49 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} and 3.88 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, respectively, and lower in the dry season, 3.41 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} and 2.44 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, respectively. The average soil humidity was 12.3% and 9.0% in plots A and B, respectively. The average soil temperature in the period studied for plots A and B were 25.9±1.2 ºC and 25.8±0.8 ºC, respectively. One better correlation of the precipitation accumulated in 3 days before the reading with the CO_2 efflux of the ground was found (R = 43.6%). It was found a better correlation between the rainfall of the 3 days period before starting measurements and the soil CO_2 efflux (R=43.6%). The correlations between soil temperature and soil CO_2 efflux in plots A and B were weak (R= 28.0 % and R=30.6 %), respectively, however the correlation between soil humidity and soil CO_2 efflux was weak (R=12.5%) in the control plot and moderate (R=49.7%) in the plot B. The correlations of the soil respiration with the total biomass weight were moderate in both plots (R=48 % and R=43 %), respectively.

Keywords: rainfall, soil moisture, soil temperature, soil respiration, Amazon rain forest.

1. INTRODUÇÃO

No presente momento, não há nenhuma duvida que a composição da atmosfera e seus constituintes estão mudando em conseqüência da ação antropogênica. As concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (NOx) aumentaram consideravelmente do período pré-industrial até o presente (IPCC, 1992).

A concentração de CO_2 aumentou de 280 ppm, em 1800, para 381 ppm, em 2007. Esta tendência é atribuída, principalmente, às atividades humanas, como o uso de combustíveis fósseis, a industrialização, mudanças no uso da terra e na agricultura. Nos últimos 17 anos, a concentração de gás carbônico na atmosfera aumentou 30 ppm, e 75% desse aumento é representado pela queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2001, 2007).

Com o aumento da concentração dos gases de efeito estufa, a atmosfera tende a se aquecer provocando um aumento na temperatura média global o que resultaria num provável aumento da temperatura do solo. Como resposta do aumento da temperatura do solo, espera-se que a respiração do solo aumente numa taxa de 2,0 μmol CO_2 para cada 10 ºC. No entanto, o efeito da temperatura mais alta do solo na sua dinâmica bioquímica não

está muito claro e pode ser diferente para áreas temperadas e tropicais. O ciclo global do carbono é ligado ao clima, ao ciclo hidrológico, de nutrientes e a produção de biomassa através da fotossíntese na superfície terrestre e nos oceanos (Schimel *et al.*, 1994; McGuire *et al.*, 1995; Sotta *et al.,* 2004).

Após a fotossíntese, o fluxo de CO_2 oriundo do solo é a segunda maior fonte de carbono na maior parte dos ecossistemas e pode ser de 60 a 90% da respiração total dos ecossistemas (Kuzyakov, 2006).

O carbono no solo é o principal componente do ciclo de carbono terrestre. O armazenamento global de carbono no solo nos três primeiros metros da superfície é de 2.344 Pg C (Jobbagy & Jackson, 2000; Sotta *et al.,* 2004), o que represente três vezes a quantidade de carbono existente na atmosfera e cinco vezes a quantidade de carbono armazenada na vegetação. Assim, um aumento ou diminuição de pequenas quantidades de carbono no solo pode gerar um impacto grande na concentração atmosférica de CO_2. A respiração do solo é o principal caminho em que o carbono é liberado do sistema do solo. O fluxo de CO_2 do solo é o principal fluxo do ciclo global de carbono e em segundo vem a fixação de carbono pelas plantas (Sotta *et al.*, 2006).

Alguns modelos globais de mudança climática sugerem reduções fortes na precipitação em algumas regiões tropicais, particularmente na Amazônia (Foley *et al.*, 1996; Cramer *et al.*, 2001). Como conseqüência da menor recirculação de água entre a biosfera desflorestada e a atmosfera, o clima da região Amazônica pode tornar-se mais seco (Shukla *et al.*, 1990; Nobre *et al.*, 1991; Costa e Foley, 2000). As mudanças na precipitação podem afetar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) pelo solo. No entanto, alem da precipitação, as mudanças na concentração de CO_2 no solo e na temperatura do solo também têm papel importante na emissão e no equilíbrio do carbono no solo

(Davidson *et al.*, 2004). Este estudo na região é importante, pois a região amazônica tem um papel importante no ciclo biogeoquímico global e vem mostrando um alto grau de heterogeneidade espacial em muitas propriedades de seus ecossistemas, em parte por ações antrópicas e podendo experimentar secas devido às mudanças climáticas regionais e globais.

OBJETIVOS

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

Geral: Analisar a influência das variáveis meteorológicas e edáficas sobre os fluxos de dióxido de carbono do solo, na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará.

Específicos:

1. Analisar a variação temporal do fluxo de dióxido de carbono no solo;

2. Analisar a relação da respiração do solo com a vegetação, mediante medidas de biomassa;

3. Relacionar a variação do fluxo de CO_2 do solo relações da matéria orgânica depositada na superfície do solo (liteira);

4. Analisar a influência de um período de estresse hídrico induzido artificialmente no solo sobre o comportamento dos fluxos de dióxido de carbono no solo;

5. Relacionar o fluxo de dióxido de carbono no solo com a precipitação pluvial;

6. Relacionar o fluxo de dióxido de carbono no solo com a temperatura do solo;

7. Relacionar o fluxo de dióxido de carbono no solo com a umidade do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Respiração do solo

A medida do fluxo de CO_2 na biosfera é de grande importância por causa do aumento da concentração do CO_2 na atmosfera estar potencialmente relacionado com mudanças climáticas. A respiração do solo é um dos principais fluxos no ciclo global de carbono, segundo em magnitude após a produtividade primária bruta (Raich e Schlesinger, 1992; Schlesinger e Andrews, 2000).

As florestas, em particular, são importantes para o ciclo do carbono por conterem acima e abaixo da superfície 80% e 40%, respectivamente, do estoque global de carbono (Dixon *et al.*, 1994).

O seqüestro de carbono em ecossistemas de floresta resulta da diferença entre a fixação pela fotossíntese e a liberação de carbono pela respiração do ecossistema (Granier *et al.*, 2000; Valentini *et al.*, 2000) e a respiração do solo em florestas temperadas representam, aproximadamente, 70% da respiração total do ecossistema (Granier *et al.*, 2000).

A respiração do solo corresponde ao fluxo de CO_2 na interface do solo com a atmosfera. Ela depende das atividades biológicas e da difusão do gás carbônico pelos poros do solo. Essas atividades biológicas e difusão do gás carbônico podem ser influenciadas pelas propriedades do solo e pela vegetação. A respiração das raízes e dos microorganismos da rizosfera (componentes autotróficos) é a principal fonte de CO_2 no solo. A segunda são as atividades microbianas e da microfauna (componente heterotrófico) associadas com a decomposição da liteira acima e abaixo do solo (folhas, restos de galhos e raízes) e a mineralização da matéria orgânica (Hanson *et al.*, 2000).

A respiração do solo é altamente variável, no tempo e no espaço, e em diferentes escalas. As variações temporais foram descritas em várias escalas de tempo, da diurna a anual (Rayment e Jarvis, 2000; Savage e Davidson, 2001; Subke *et al.*, 2003; Scott *et al.*, 2004). A variabilidade sazonal é explicada na maior parte pela variação da temperatura do solo e do conteúdo de água no solo (Buchmann, 2000). A umidade da liteira, eventos de chuvas e a reposição de água no solo após o período de seca são alguns fatores que podem explicar a variação temporal, em curto prazo, da respiração do solo (Sotta *et al.*, 2004).

O fluxo do CO_2 do solo resulta quase inteiramente das taxas combinadas da respiração autotrófica e heterotrófica, que é chamada freqüentemente de respiração do solo. A respiração global do solo compreende uma liberação do carbono à atmosfera de, aproximadamente, 80 Pg C ano^{-1} e as maiores contribuições vêm das florestas tropicais e subtropicais (Raich *et al.*, 2002). Quando juntos esses e outros ecossistemas terrestres mostram uma variabilidade interanual significativa na produtividade primaria bruta (Schimel *et al.*, 2001). A variação relativa da respiração global do solo é mais baixa, respondendo menos fortemente à água do que à temperatura (Schlesinger, 1977; Raich *et al.*, 2002).

Sobre escalas espaciais e temporais menores, há muito mais variação na respiração do solo. Os tipos distintos da vegetação exibem diferenças grandes na contribuição relativa da respiração autotrófica, variando das áreas de plantio à tundra de 12-93%, com um valor aproximado de 50%, estimado para florestas (Hanson *et al.*, 2000; Raich e Tufekcioglu, 2000).

A temperatura do solo é um fator dominante que determina taxas de respiração do solo na floresta, e em outros ecossistemas, com escalas menores (Jenkinson *et al.*, 1991; Katterer *et al*., 1998), mas os processos de respiração no solo são fortemente influenciados também pela umidade do solo, visto que: mais secos tendem a apresentar fluxos mais baixos do CO_2 (Parker *et al.*, 1984; Davidson *et al.*, 2000).

2.2. Técnicas para determinar o fluxo de CO_2 no solo

O uso relativamente recente de métodos de medidas micrometeorológicas avançou significativamente a compreensão do processo do carbono no interior do ecossistema, proporcionando a estimativa dos fluxos do CO_2, a combinação de processos fotossintéticos e respiratórios (Moncrieff *et al.*, 1997; Baldocchi e Wilson, 2001). Entretanto, apesar deste avanço, a medida da respiração total (noturna, inclusive) continua incerta (Araújo *et al.*, 2002), e, neste contexto a componente-escala de medidas podem ajudar a confirmar o valor para a respiração total e estimativa da produtividade líquida do ecossistema (Meir e Grace, 2002). Embora seja crescente a popularidade da técnica de correlações de vórtices turbulentos para avaliar a produtividade primária líquida nos ecossistemas, os métodos clássicos para medidas de CO_2 com câmara e analisador infravermelho ou de armadilhas com alcalóide, permanecem como ferramentas úteis (Davidson *et al.*, 2002; Baldocchi, 2003; Kuzyakov, 2006). Isso não é somente devido a algumas limitações da técnica de

correlações de vórtices turbulentos, e a sua aquisição e instalação de elevados custos, mas em especial, porque os métodos das câmaras permitem que os fluxos de CO_2 sejam medidos diretamente no solo. As técnicas micrometeorológicas podem somente obter o fluxo de CO_2 total do ecossistema e não podem dividir o fluxo total em suas fontes individuais (Buchmann, 2002).

As primeiras medições realizadas no mundo do dióxido de carbono do ar, voltadas para a estimativa do fluxo do solo, foram iniciadas utilizando-se uma solução alcalina, através do grau de sua neutralização pelo CO_2, que é uma análise de baixo custo, mas muito lenta e inviável para monitoramento contínuo. Depois dos anos 50 foram iniciadas análises do CO_2 utilizando-se analisadores de gás por infravermelho (Infra Red Gas Analyzer – IRGA). Esses analisadores aperfeiçoaram a técnica, pois são sensores de amostragem direta do ar e de rápida aquisição contínua de dados. O funcionamento é um sistema com uma cápsula refletora que tem um emissor em uma extremidade e um receptor na outra. O emissor dispara um feixe de luz no Infravermelho (0,7-12 μm), cujo feixe entra em contato com ar amostrado, e este ar com CO_2 absorve parte da radiação. A absorção da radiação pelas moléculas de CO_2 ocorre devido às propriedades quânticas da molécula, que vibra em contato com o infravermelho. Esta vibração é o resultado da modificação da energia cinética (aumenta a sua temperatura interna), reduzindo a intensidade do feixe que chega ao receptor, em relação à emitida (Zanchi, 2004).

2.3. Medidas de CO_2 no solo na Amazônia

As taxas de respiração médias do solo para diferentes áreas de florestas na Amazônia variam de 3,2 a 6,2 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, para temperaturas do solo entre 22 ºC e 25,1 ºC. Esses estudos sugerem que 50 a 84% da respiração total vêm do solo e, conseqüentemente,

é o maior componente da respiração do ecossistema Amazônico (Meir, 1996, Malhi *et al.*, 1999; Davidson *et al.*, 2000; Chambers *et al.*, 2004). A determinação e um melhor entendimento da dinâmica da emissão de CO_2 pelo solo das florestas tropicais são fundamentais para se estimar com melhor concisão o balanço interno de carbono nas florestas tropicais e a contribuição no balanço de carbono global.

Dados disponíveis da Amazônia mostram substanciais variações, tanto espaciais como temporais, da respiração do solo, potencialmente causadas pela heterogeneidade do tipo do solo e por mudanças sazonais no seu conteúdo de água (Sotta *et al.,* 2004; Metcalfe, 2006). Diversos estudos na Amazônia registraram uma resposta assintótica distinta da respiração com a umidade do solo. O fluxo de CO_2 do solo aumenta com a elevação de sua umidade e declinando subseqüentemente quando ele se torna alagado (Davidson *et al.,* 2000; Sotta *et al.*, 2006). As condições de seca inibem a decomposição microbiana do carbono na camada de liteira e da matéria orgânica do solo, com um declínio associado na produção do CO_2, mas o solo alagado se torna um ambiente quase perfeito para a respiração aeróbica, e também obstrui o transporte do CO_2, produzido dentro da matriz do solo à superfície (Davidson *et al.,* 1998; Sotta *et al.*, 2004, Metcalfe, 2006).

Como o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos de partes sólidas, líquidas e gasosas, os poros formados pela organização tridimensional da sólida oferecem espaço para acomodar as fases líquidas e gasosas (EMBRAPA, 1999). Dessa forma, o excesso de água do solo causará interferência no fluxo de CO_2 do solo, tanto pelo efeito físico do impedimento da passagem do CO_2 até atingir a interface solo-atmosfera, como pela redução da atividade respiratória aeróbica, que é a principal responsável pela emissão de CO_2 do solo (Pinto Júnior, 2007).

A Tabela 01 exibe alguns estudos que foram realizados na região Amazônica. Os valores representam a média do fluxo ± desvio padrão, (quando disponíveis).

Tabela 1 - Estudos de fluxo de CO_2 do solo realizados na Região Amazônica. Os valores representam a média ± desvio-padrão (quando disponível).

Autor	Estação	Local	Vegetação	Fluxo ($\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$)	Metodologia
Coutinho e Lamberti (1971)	Seca (Ago - Set)	Barcelos, AM, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa*	2,8	Solução aquosa 0,5N KOH
Martins e Matthes (1978)	Seca (Julho)	Manaus, AM, Brasil.	*Campinarana, Campina*	1,4 ± 0,5	Solução aquosa 0,5N KOH
Medina *et al.,* (1980)	2 anos	San Carlos do Rio Negro, Venezuela.	*Floresta de Laterita*	3,1 ± 0,5	Solução aquosa 0,5N KOH
Wofsy *et al.,* (1988)	2 anos	Reserva Duke, Manaus, AM, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa*	4,5	IRGA câmara estática fechada
Fan *et al.,* (1990)	Chuvosa (Abr - Mai)	Reserva Duke, Manaus, AM, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa*	5,9	IRGA câmara estática fechada
Meir *et al,.* (1996)		Reserva Jaru, RO, Brasil.	*Floresta Ombrófila Aberta*	5,5 ± 1,6	IRGA câmara estática fechada
Davidson *et al.,* (2000)	1 ano	Fazenda Vitória, Paragominas, PA, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa*	5,3	IRGA câmara estática fechada
Chambers *et al.,* (2004)	1 ano	Manaus, AM, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa (platô)*	3,8	IRGA câmara estática fechada
Sotta *et al.,* (2004)	Chuvosa (final)	Manaus, AM, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa (platô)*	6,4 ± 0,25	IRGA câmara estática aberta
Valentinni (2005)	1 ano	Sinop, MT, Brasil.	*Floresta de transição*	7,5	IRGA câmara estática
Sotta *et al.,* (2006)	2 anos	FLONA de Caxiuanã, PA, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa (terra firme)*	3,96 ±0,06 (argiloso) 3,08 ± 0,07 (arenoso)	IRGA câmara estática
Estudo presente	1 ano	FLONA de Caxiuanã, PA, Brasil.	*Floresta Ombrófila Densa (terra firme)*	3,47 ± 0,27	IRGA câmara estática fechada

Fonte: Adaptado de Sotta *et al.,* 2004.

2.4. Fontes geradoras de CO_2 no solo

Segundo Kuzyakov (2006), para que sejam classificadas as fontes de fluxo de CO_2 do solo se devem investigar diversas hipóteses, como:

1ª - O volume de carbono no solo e na superfície do solo;

2ª - Os agentes que contribuem para o fluxo de CO_2: (organismos heterotróficos ou autotróficos);

3ª - O local onde é produzido o CO_2 (nas raízes fora do solo ou dentro do solo rizosfera e a camada de liteira);

4ª - O tempo de retorno e o tempo de residência médio do carbono armazenado que contribuem para o fluxo de CO_2;

5ª - A contribuição das fontes individuais de CO_2 do solo para a mudança do CO_2 atmosférico.

Os agentes que produzem CO_2 no solo são divididos em dois grupos principais de organismos: (heterotróficos e autotróficos). Os mais importantes são os heterotróficos que podem ser subdivididos em dois grandes subgrupos: Os microorganismos do solo (bactérias, fungos, actinomicetos e protozoários) e a macrofauna do solo (invertebrados macroscópicos e pequenos mamíferos) (Kuzyakov, 2006).

A contribuição da macrofauna do solo para o fluxo de CO_2 total do solo é geralmente de poucos por centos (Andren e Schnurer, 1985; Ke *et al*., 2005). A maior parte do fluxo de CO_2 envolvido na respiração do solo por organismos heterotróficos é respirada por microorganismos, tais como, as bactérias não micorriza e fungos micorriza, e actinomicetos.

Essa componente do fluxo de CO_2 do solo é definida como respiração microbiana. Embora a contribuição direta da macrofauna do solo seja pequena, a respiração microbiana pode aumentar extremamente, não somente pela fragmentação e pela pulverização de resíduos das plantas, mas igualmente pela predação de alguns grupos de microorganismos. Isto intensifica a taxa de retorno e resulta no aumento do fluxo de CO_2 do solo (Mikola e Setala, 1998; Kuzyakov, 2006).

As contribuições autotróficas das plantas são as mais importantes para o fluxo de CO_2 do solo pela respiração das raízes. Outras autotróficas, como as algas e *chemolithotrophs* têm menor importância. Elas cobrem somente os primeiros 2 - 3 mm da superfície do solo e são ativas, principalmente, em solos hidromorfos e inundados. Os c*hemolithotrophs* têm somente uma pequena contribuição para o fluxo de CO_2 em solos bem aerados. Além disso, em contraste com plantas maiores, as algas e os *chemolithotrophs* são organismos unicelulares e assim, a posição da fixação de carbono (assimilação) e a respiração são as mesmas. Assim, para algas e *chemolithotrophs,* não é necessário para os fluxos porque a respiração é compensada pela assimilação na mesma posição (Kuzyakov, 2006).

Segundo Kuzyakov (2006), somente três locais de produção do CO_2 são interessantes: nas raízes fora do solo, nas raízes dentro do solo e no horizonte O (camada orgânica superficial). Essa separação foi baseada em diversos estudos, que mostraram os processos que contribuem para a produção do CO_2, que são mudados extremamente na presença das raízes crescentes. Além disso, o horizonte O, que contem os resíduos de plantas mortas na superfície, e que freqüentemente contém uma grande quantidade de raízes vivas, é extremamente importante para o fluxo de CO_2 do solo.

A Figura 1 mostra dentro dos grandes agrupamentos descritos, as cinco principais fontes contribuintes ao fluxo total de CO_2 do solo: a) A decomposição microbiana da matéria orgânica da superfície do solo (MOS) de raízes fora do solo e de plantas não decompostas, freqüentemente referidas como respiração basal; b) a decomposição microbiana da MOS ou os resíduos das plantas no solo; c) a decomposição microbiana das plantas mortas remanescentes; d) a decomposição microbiana dos rizodepositores, que vivem nas raízes, é freqüentemente referida como respiração rizo-microbiana; e) A respiração das raízes.

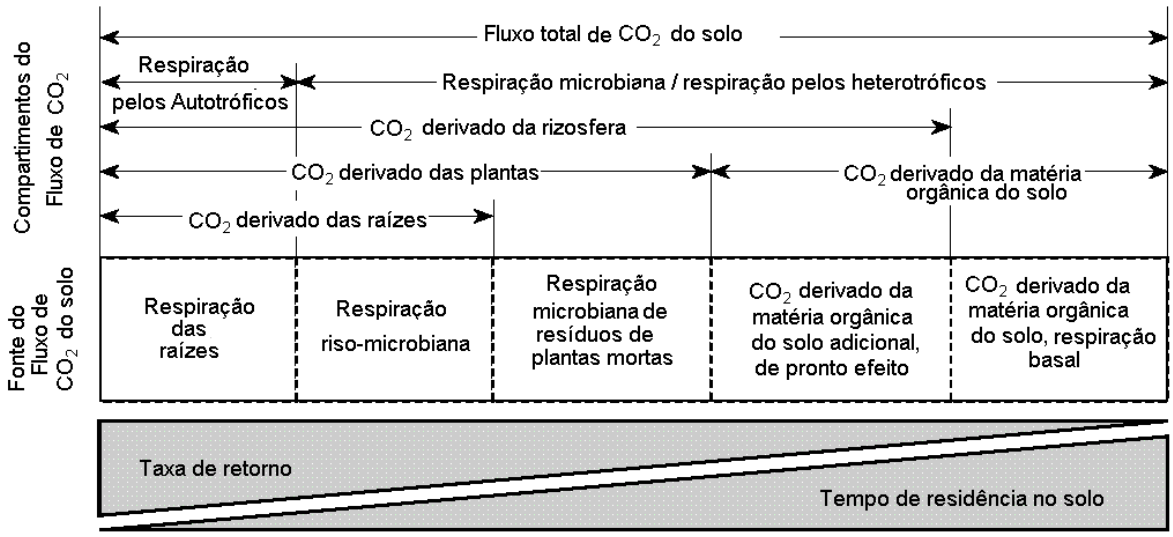

Figura adaptada de Kuzyakov (2006).

Figura 1 - As cinco principais fontes contribuintes ao fluxo total de CO_2 do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na Floresta Nacional de Caxiuanã (FLONA), Pará, Brasil, (1° 43' 3,5" S; 51° 27' 36"W), como ilustrado na Figura 2. A área possui um relevo de planície, a temperatura média anual do ar é 25,7 ± 0,8 ºC, a precipitação média anual é 2.272 ± 193 mm, com uma estação seca que, em média, ocorre 555 ± 116 mm (Fisher *et al.*, 2006). Os meses com mais de 100 mm de precipitação foram atribuídos à estação chuvosa (dezembro-maio), e a estação seca consistiu no período dos meses com menos de 100 mm de precipitação (junho-novembro). Pela classificação climática de Köppen, o clima é do tipo "Am" tropical quente e úmido e subtipo climático com uma curta estação seca. O número de horas de brilho de luz solar alcança mais de 2.100 horas ano^{-1}, umidade relativa do ar média anual situa-se em torno de 80%. A direção do vento predominante é de Nordeste (Moraes *et al*., 1997; Oliveira, 2007).

A maior parte do solo da área experimental (65%) são Oxisolo amarelo (classificação brasileira Latossolo), mas existem grandes diferenças na textura, com uma camada de laterita (0,3-0,4 m de espessura) na profundidade de 3-4 m. A textura da camada

até 0,5 m superiores do solo é de 75% de areia e 25% de argila + silte, enquanto que a parte superior do solo tem 31% de areia e 69% de argila + silte (Costa, 2002). A mineralogia do solo é principalmente de quartzo na fração de areia (Ruivo e Cunha, 2003).

A área experimental está situada, aproximadamente, a 15 m acima do nível do rio Curuá, e o lençol freático foi ocasionalmente observado, a uma profundidade de 10 m durante a estação chuvosa. A estrutura de floresta não varia muito, possui média de 434 árvores ha^{-1}, com uma área basal de 23,9 m^2 ha^{-1} e um índice de área foliar (IAF) de 5,2 m^2 m^{-2} para o local estudado (Fisher *et al.*, 2006).

A região é composta por uma floresta de terra firme, com a altura média do dossel de 35 m, e a biomassa acima do solo é de 200 m^3 ha^{-1} (Lisboa *et al.*, 1997). A floresta apresenta uma diversidade considerável, com espécies como: *Excelsa Dinizia* (angelim-vermelho), *Racemosum Marmaroxylon* (angelim rajado), *Guianensis Couratari* (tauari), *Grandis Bucheniavia* (tanimbuca), *Racemosa Swartzia* (pitaíca), *Odorata Dipteryx* (cumaru), e outros (Almeida *et al.*, 1993).

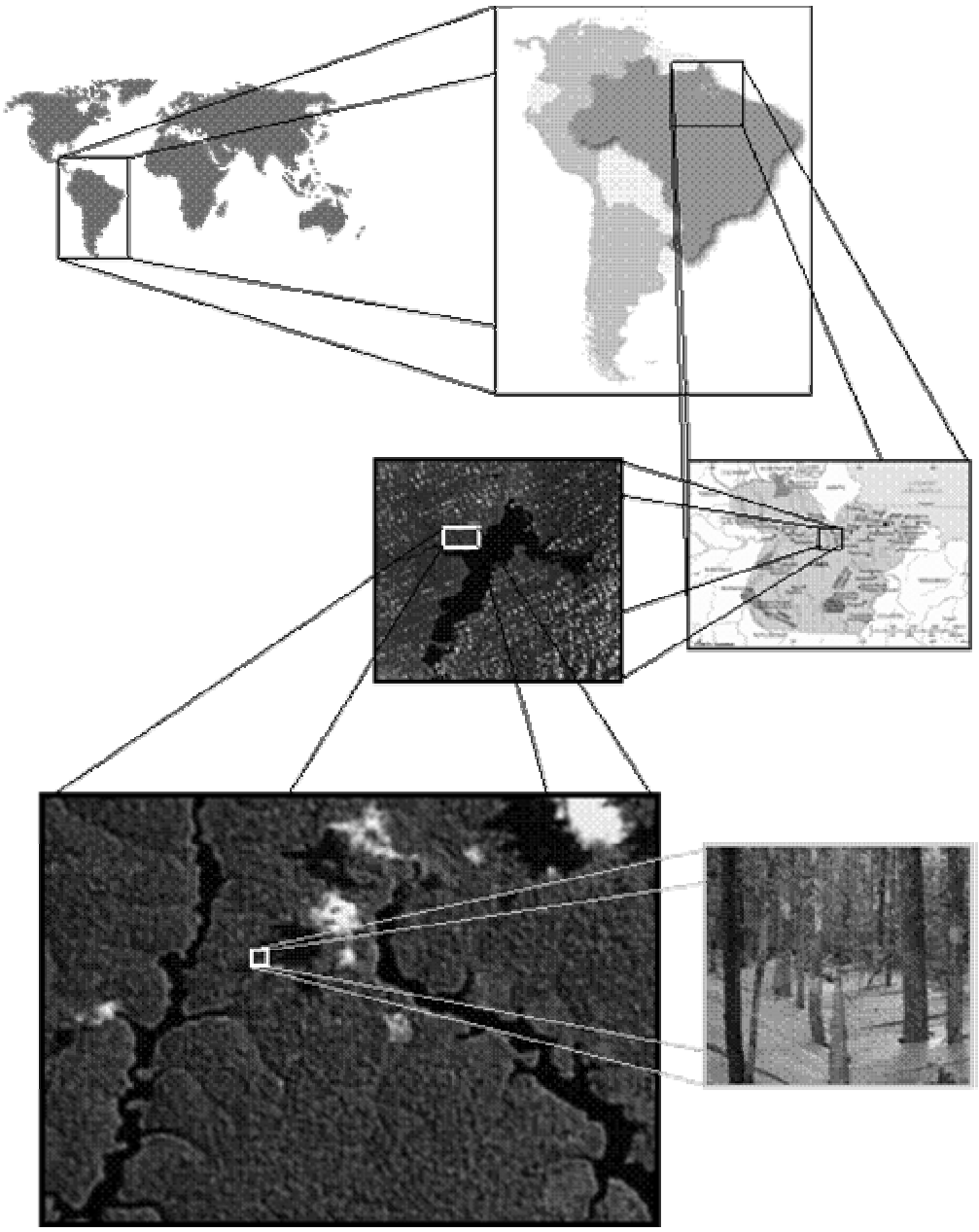

Figura 2 - Localização geográfica da área experimental.

3.2. Estrutura do experimento

O experimento ESECAFLOR (O impacto da seca nos fluxos de água e dióxido de carbono em uma floresta tropical Amazônica) consistiu da simulação de um período de estiagem na floresta para avaliar o seu impacto prolongado nos fluxos de água e dióxido de carbono em uma floresta tropical amazônica, visando investigar a exclusão de água no solo sobre o ciclo

da floresta, e as alterações provocadas pelo evento. Em sua estrutura física, o Experimento ESECAFLOR é composto por duas parcelas (A e B) de 1 hectare cada uma. Essas áreas são delimitadas por trincheiras cavadas com profundidades variando de 50 a 150 cm. A parcela "A" é usada como referência para os experimentos realizados na parcela "B", onde é feita a exclusão de, aproximadamente, 70% da água da chuva com a utilização de cerca de 6.000 painéis plásticos, instalados a uma altura de 1,5 a 4 m acima do solo, mostrados na Figura 3. Os painéis coletaram a água da chuva que verteram para as calhas, que por sua vez despejaram nas trincheiras; e por gravidade eram levadas para uma área afastada da parcela de exclusão. Em cada uma das áreas existe uma torre metálica, uma com 24 metros de altura, na parcela de controle, e outra com 37 metros de altura, na parcela de exclusão. Essas torres permitem o acesso fácil às árvores para análises de fotossíntese entre outras medidas, além do monitoramento meteorológico realizado por estações automáticas. As parcelas eram mantidas permanentemente limpas, com a substituição dos painéis plásticos danificados pela queda de galhos, frutos e eventualmente árvores. Na Figura 4 temos é apresentada a esquematização das medidas que foram realizadas nos 25 pontos dentro das parcelas de controle e de exclusão.

Figura 3 - Área da parcela experimental vista acima e abaixo dos painéis plásticos.

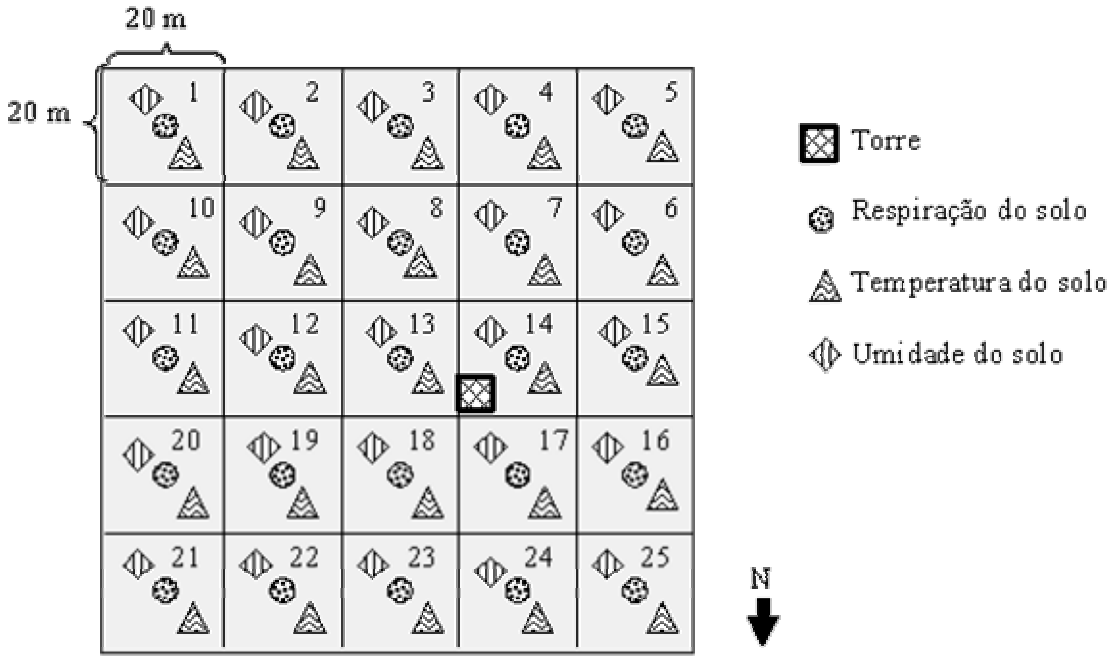

Figura 4 - Esquematização das medidas realizadas dentro das parcelas.

3.3. Elementos meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos através de uma estação meteorológica automática instalada no topo da torre da parcela de exclusão, durante o período de novembro de 2004 a novembro de 2005.

Os sensores que mediram os elementos meteorológicos estavam no topo da torre da parcela de exclusão, a 37 metros de altura acima do solo. Os dados foram registrados a cada de 2 minutos e medidos a intervalos de 10 segundos e armazenados em um datalogger CR23X (Campbell Sci, Inc., Logan, Utah).

A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas com o sensor HMP45C-L (Vaisala, Inc.). O sensor de temperatura do ar tem uma precisão de ± 0,2 ºC e opera na faixa -39,2 ºC a 60 ºC. O sensor de umidade relativa do ar (UR) apresentam uma precisão de ±2 % na faixa de 0 a 90 % de umidade e precisão de ± 3% no intervalo de 90 a 100% de UR. A

precipitação pluvial foi quantificada com pluviógrafo de báscula modelo ARG 100 (Campbell Scientific, Inc.) com resolução de 0,204 mm.

3.4. Medida da respiração do solo

A respiração do solo (R_S) foi medida por um sistema de dinâmica fechada com um analisador de gás infravermelho portátil EGM-4 (PP Systems, Hitchin, UK), conectado a uma câmara de respiração do solo SRC-1 (PP Systems, Hitchin, UK), baseado na absorção da radiação na banda do infravermelho ($\lambda > 0{,}7\mu m$) 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 em um volume de controle fechado. As medidas foram conduzidas no período diurno em 25 pontos distribuídos em cada parcela estudada com duas repetições em cada ponto. O fluxo devido à Rs foi calculado 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, utilizando a Equação 1.

$$R_S = \frac{\Delta C}{\Delta T}\frac{P}{1000}\frac{273}{T+273}\frac{44{,}01}{22{,}41}\frac{V_C}{A} \qquad (1)$$

Em que: Rs é o fluxo de CO_2 do solo (kg m^{-2} s^{-1}); $\Delta C/\Delta T$ representa a variação do CO_2 dentro da câmara (ppm) por unidade de tempo (segundos); P é a pressão atmosférica (Pa); T é a temperatura do ar dentro da câmara (ºC); V_C é o volume total do interior da câmara (m^3) e A é a área do solo coberta pela câmara (m^2).

A câmara (diâmetro de 100 mm e 150 mm de altura) foi ajustada para encaixar nos colares de PVC (100 mm de diâmetro e 50 mm de altura). Em cada parcela foram instalados 25 colares permanentes no solo, enterrados a uma profundidade de 30 mm, um mês antes do início do experimento, para que o solo pudesse se estabilizar e minimizar os distúrbios dos colares no local. O uso de colares permanentes limita o distúrbio do solo e permite medidas repetidas na mesma posição durante o experimento. Com a inserção do colar, as raízes poderiam ser cortadas e diminuir a respiração da raiz, e conseqüentemente a respiração do solo, mas o valor da perturbação depende da profundidade da inserção do colar. Segundo Wang *et al.*, (2005) a perturbação é, provavelmente, insignificante neste estudo.

As medidas (Figura 5) foram mensais com duas repetições por ponto evitando dias chuvosos. Foi realizada uma campanha de medições intensivas, na estação seca, com leituras a cada 30 minutos em dois pontos (13 e 14), durante 24 horas, iniciando às 14 horas do dia 19 e findando às 13 horas do dia 20 de agosto de 2005 na parcela de controle.

Os pontos 13 e 14 foram escolhidos devido à facilidade do acesso e segurança para a realização das medidas noturnas. Na área do ponto 13, havia uma maior densidade de arborização e quantidade de material em decomposição na superfície do solo (liteira) e no ponto 14, a densidade de arborização e de liteira eram menores.

Nas medidas de respiração do solo para verificar a influência exercida pela liteira, foram instaladas nove câmaras distribuídas nas duas parcelas onde foram medidos os fluxos e coletado a liteira acumulada na dentro da câmara em um intervalo de 6 meses.

Figura 5 - Medida em campo da respiração do solo.

3.5. Medida da umidade do solo

O conteúdo de água no solo (CAS) na camada superficial (0 – 300 mm) foi medido através do sensor CS616 Water Content Reflectometer (Campbell Sci. INC., Logan, Utah) conectado a um multímetro e os valores dos pulsos convertidos posteriormente para valores de umidade do solo através da Equação 2.

$$CAS(\%) = -0{,}0663 - 0{,}0063P + 0{,}0007P^2 \qquad (2)$$

Em que, P é o sinal de saída emitido pelo sensor (microssegundos), registrado com um multímetro digital.

O método para medir o conteúdo de água do solo é uma medida indireta, que é sensível a permissividade dielétrica do solo adjacente às hastes do sensor. A água é o único constituinte do solo que tem um valor alto de permissividade dielétrica e que pode variar de concentração no ar, com um dispositivo sensível a permissividade dielétrica é possível

estimar o conteúdo de água no solo. O princípio fundamental de operação é que o sensor envia um pulso eletromagnético que se propaga ao longo das hastes do sensor em uma velocidade que será dependente da permissividade dielétrica do solo ao redor do sensor. Quando o conteúdo de água aumenta, a velocidade da propagação diminui, uma vez que a polarização das moléculas de água leva algum tempo. O sinal aplicado viaja pelo comprimento das hastes do sensor e é refletido nas extremidades da haste retornando ao sensor, sendo a reflexão detectada por um circuito gerando próximo o pulso. A freqüência dos pulsos com as hastes do sensor ao ar livre é, aproximadamente, 70 MHz. A freqüência da saída do sensor é relacionada empiricamente ao índice de água no solo usando uma equação de calibração específica para cada tipo de solo (CS616 Water Content Reflectometer Manual,Campbell Sci., Inc, 2002-2003).

3.6. Medida da temperatura do solo

A temperatura do solo (T_S) foi medida a 100 mm de profundidade em todos os pontos por um termômetro digital (Testo 926, Testo Ltd., Hampshire, U.K.) introduzido no solo, próximo ao colar de PVC, durante as medidas de respiração do solo no período de novembro de 2004 a novembro de 2005.

3.7. Estimativa de biomassa da parte aérea da vegetação

A estimativa de biomassa de florestas pode proporcionar as informações sobre o estoque de nutrientes, e também, nas questões relacionadas ao clima. A biomassa pode ser usada para estimar o estoque de carbono e a quantidade CO_2 liberada na atmosfera (Silva, 2003).

A água proveniente das chuvas tem papel fundamental no desenvolvimento de uma floresta, qualquer alteração no ciclo hidrológico poderá influenciar no desenvolvimento da mesma, comprometendo o crescimento de biomassa e o acumulo de carbono na mesma.

Foram realizados no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005 estudos em que relacionamos a medida do diâmetro à altura do peito (DAP) com a variabilidade do incremento de biomassa.

Na parcela de controle, foram monitoradas mensalmente 532 árvores, tendo como espécies de maior predominância a *Escheweleira, Licania octandra, Lecythis, Pouteria decorticans, Swartzia racemosa, Rinoria guianensis e Vouacapoua americana* e na parcela de exclusão foram monitoradas 501 árvores, tendo como espécies predominantes a *Escheweleira coriacea, Manilkara bidentata, Swartzia racemosa e Tetragastris panamensis* (Costa *et al.*, 2007).

Em cada árvore foi colocada uma cinta dendrométrica, como mostra a Figura 6, para medir o DAP, onde foram realizadas medidas mensais do crescimento, em milímetros. A partir desses valores foram calculados os incrementos de biomassa em cada uma das árvores que compõem as duas parcelas, usando as equações de 3 a 5 propostas por Higuchi, (1998). Essas equações foram utilizadas por usarem apenas o DAP como variável independente e ser facilmente medida no campo e sem erros amostrais.

1) Para árvores com $5 \leq$ DAP < 20 cm.

$$LnP = -1{,}754 + 2{,}665.\ln DAP \qquad (3)$$

2) Para árvores com DAP ≥ 20 cm.

$$LnP = -0{,}151 + 2{,}170.\ln DAP \qquad (4)$$

3) Para árvores com DAP ≥ 5 cm.

$$LnP = -1{,}497 + 2{,}548.\ln DAP \qquad (5)$$

Em que: P é o peso da matéria fresca (kg).

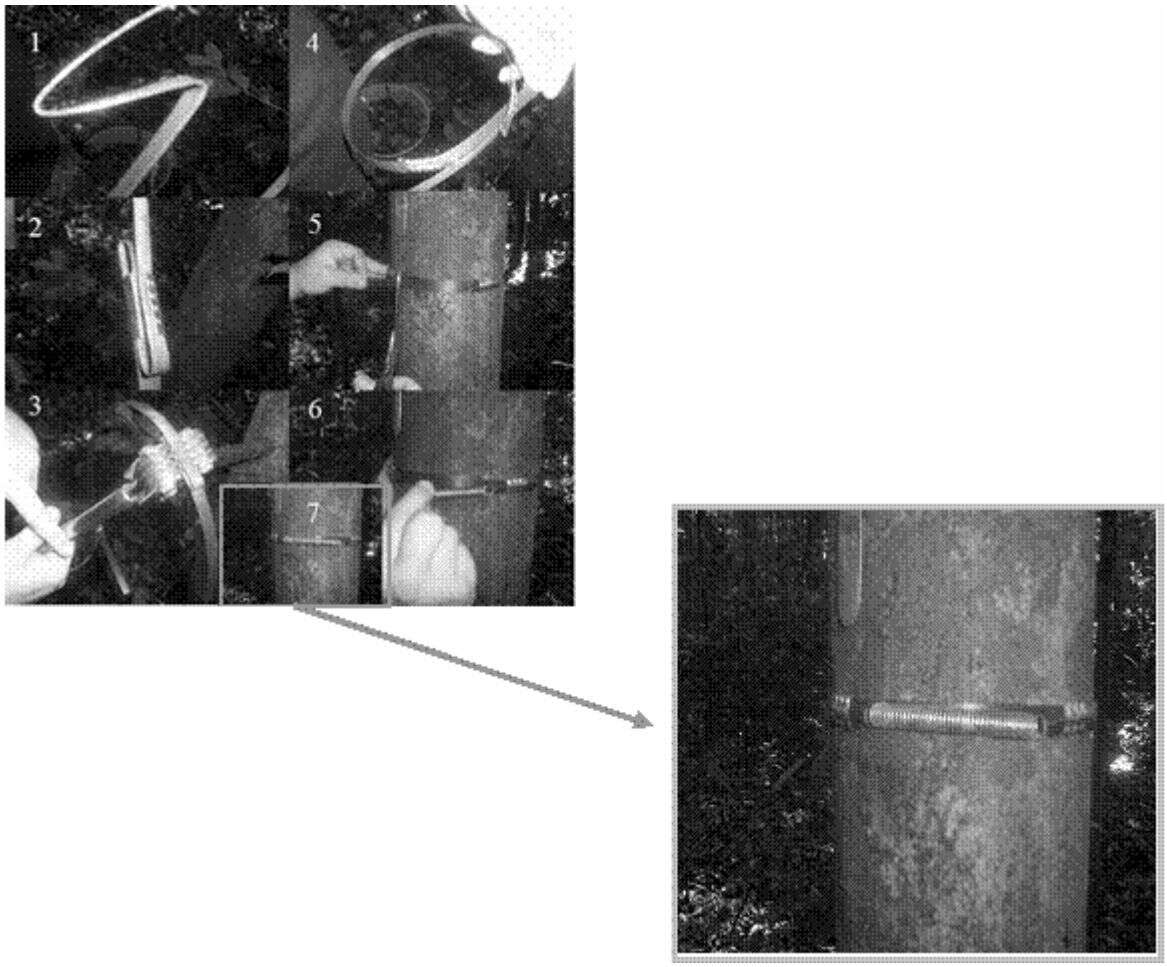

Figura 6 - Esquema da instalação da fita dendrométrica.

4. RESULTADOS

4.1 Variáveis Meteorológicas

4.1.1. Temperatura e umidade relativa do ar

Na Figura 7 é exibida a variação média mensal da temperatura e umidade relativa do ar do ar na FLONA de Caxiuanã, PA, no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. Observa-se que os maiores valores de temperatura do ar ocorreram no período seco e os menores no chuvoso. As temperaturas máxima, média e mínima do ar, registradas no período, foram de 27,1 ºC; 26,5 ºC e 25,4 ºC, respectivamente. A média da umidade relativa do ar foi de 80,5 ± 4,8%. O maior valor médio registrado foi de 87,8% no mês de março de 2005, durante a estação chuvosa, e o menor foi 72,2%, no mês de novembro de 2005, na estação seca.

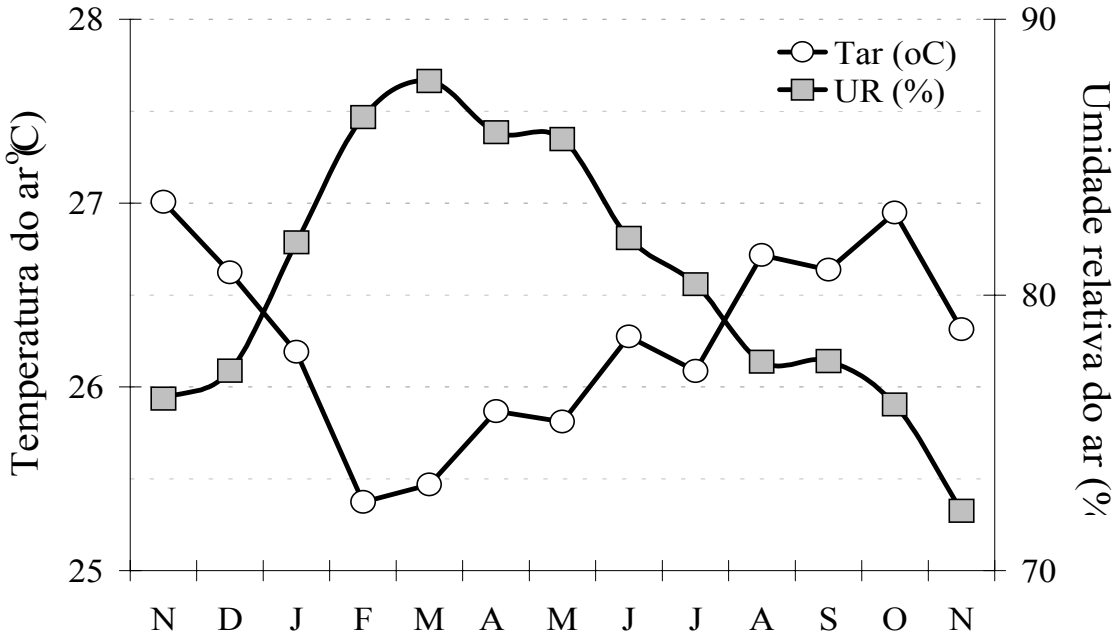

Figura 7 - Média mensal da temperatura e umidade relativa do ar na FLONA de Caxiuanã, PA entre novembro de 2004 e novembro de 2005.

Na Figura 8 é apresentado o ciclo médio horário da temperatura e umidade relativa do ar na FLONA de Caxiuanã, PA entre os meses de novembro de 2004 e novembro de 2005. Observa-se o valor máximo de 30,2 ºC por volta das 15h 30min e o mínimo de 23,2 ºC às 06h. Esse retardo do valor máximo ocorre devido à grande quantidade de energia armazenada na vegetação local. Observa-se que o menor valor da umidade relativa do ar foi de 62,6% e ocorreu às 15h 30 min, horário em que a temperatura do ar é máxima, e o maior valor foi de 92,5% as 06h 30 min.

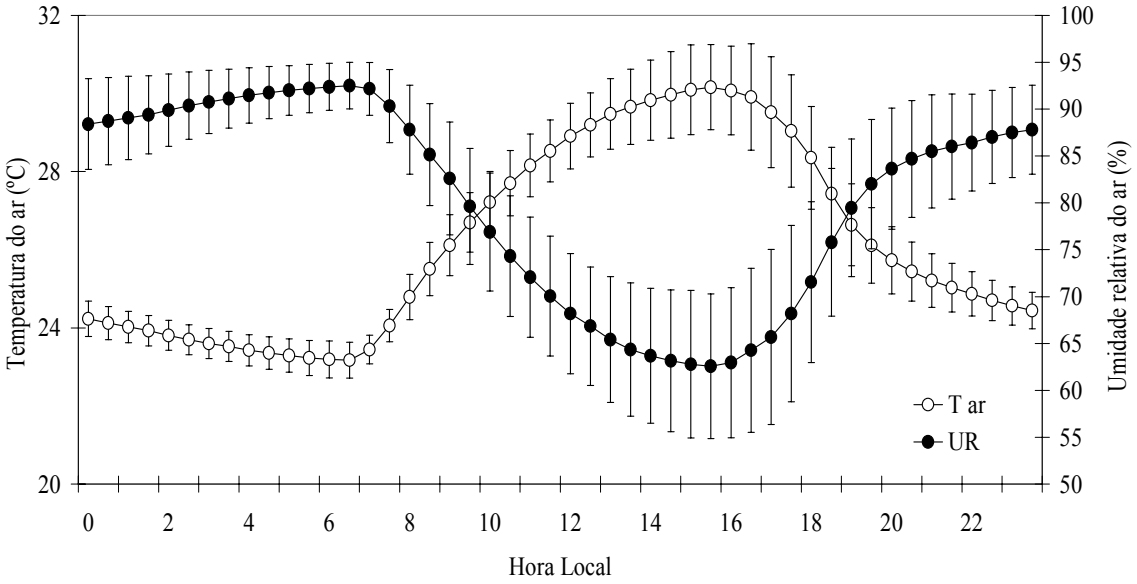

Figura 8 - Ciclo médio horário da temperatura e umidade relativa do ar (média ± desvio-padrão) na FLONA de Caxiuanã, PA entre novembro de 2004 e novembro de 2005.

4.1.2. Precipitação

A Figura 9 apresenta os totais mensais da precipitação pluvial na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn), no período de novembro de 2004 a dezembro de 2005, e as médias mensais do período de 28 anos (1980-2007) medidas na estação climatológica do IBAMA ambos dentro da FLONA de Caxiuanã, PA. Na ECFPn o maior total mensal de precipitação foi registrado em abril de 2005, com total de 327,2 mm, representando 10,7% acima da média de 1980-2007 (295,6±93,6 mm) e o menor valor registrado foi 36,4 mm em agosto de 2005, significando -41,0% da média (61,7±33,3 mm). Em valores relativos a media histórica, no mês de junho de 2005 (84,4 mm) ocorreu à maior redução percentual com -56,2% em relação à média de 1980-2007 (192,6±94,4 mm) também caracterizando uma anomalia negativa de 13,8 mm.

Há uma sazonalidade bem caracterizada da precipitação na ECFPn, estando o período chuvoso compreendido de dezembro a maio (1.700,4 mm, representando 81,5%), e o período seco entre junho e novembro (385,2 mm, representando 18,5%). Na média da série de 28 anos dados coletados no IBAMA os períodos chuvosos e secos representam 72,5 e 27,5%, respectivamente.

Na ECFPn, porém, no mês de setembro de 2005 (meio da estação seca) foram registrados 54,6 mm, que representaram 18,8% acima da média de 1980-2007 que é de 46,0 mm. No período de junho até agosto de 2005, houve uma redução de 50,9% na precipitação (185,8 mm) quando comparada com os 378,7 mm da séria do IBAMA. Este evento está relacionado com a forte estiagem que houve na Amazônia, principalmente na parte oeste da região no segundo semestre de 2005 (Marengo et al. 2007; Aragão et al. 2007). O total precipitado no ano de 2005 foi de 2.211,6 mm na ECFPn, com média de 184,3 mm $mês^{-1}$, (9,96%) acima da média mensal de 167,6 mm registrada entre 1980-2007.

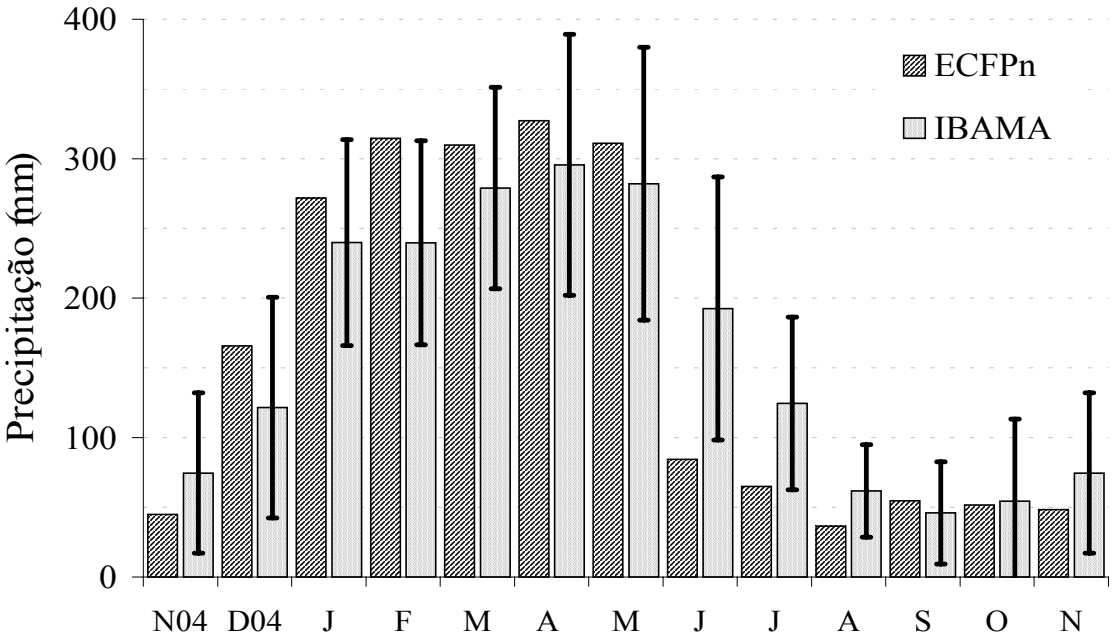

Figura 9 - Totais mensais da precipitação pluvial entre novembro de 2004 e novembro de 2005 e as médias mensais entre 1980-2007 (IBAMA) com os respectivos desvios-padrão na FLONA de Caxiuanã, PA

Na Figura 10 é apresentado o ciclo médio horário da precipitação pluvial para a estação chuvosa e seca, na FLONA de Caxiuanã, PA. Foi observado, que durante a estação seca (junho a novembro), o total pluviométrico foi de 385,2 mm, o que corresponde a 18,5% do total, sendo que, a maior concentração da precipitação pluvial nessa estação, ocorreu no período das 19 às 24 h. Na estação chuvosa (dezembro a maio), o total precipitado foi de 1700,4 mm. A maior concentração da precipitação ocorreu no período das 17 às 24 h e 01 às 04 h. As precipitações na estação seca são causadas, principalmente, por sistemas convectivos, enquanto que, na estação chuvosa somente as precipitações que ocorrem no final da tarde (entre 17 e 18 horas) são causadas por intensos sistemas convectivos, enquanto que no restante do dia são influenciadas por sistemas de grande escala como a zona de convergência intertropical (ZCIT) (Molion, 1987; Fisch *et al.,*1996).

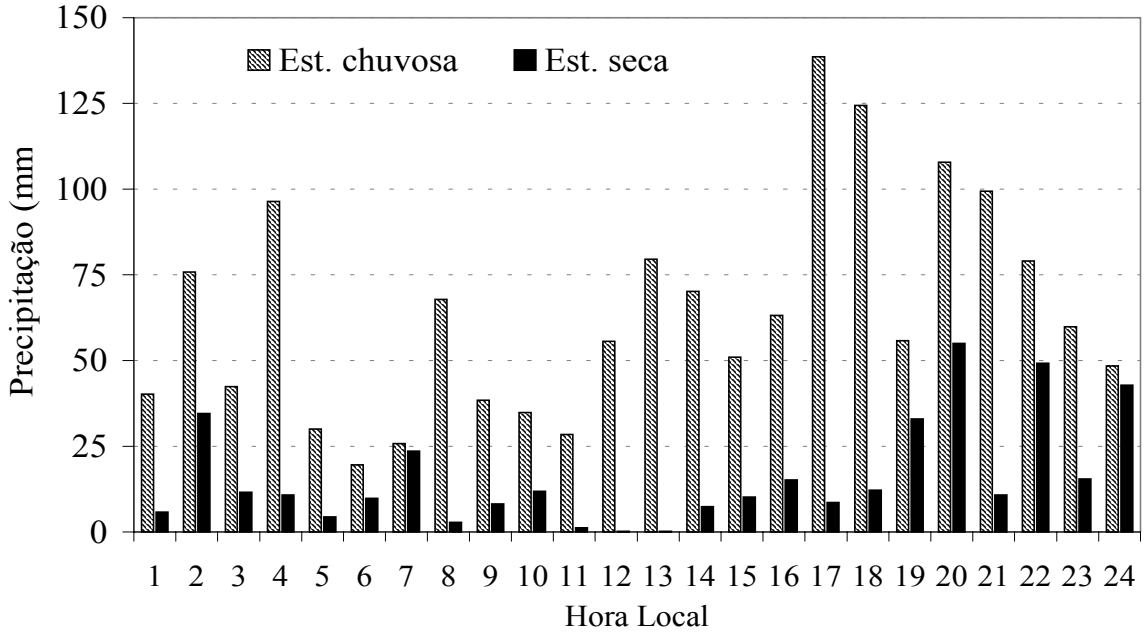

Figura 10 - Ciclo médio horário da precipitação pluvial (média ± desvio-padrão) na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005.

4.1.3. Velocidade e direção do vento

Na figura 11 encontram-se as médias mensais e seus respectivos desvios-padrão da velocidade do vento na FLONA de Caxiuanã, PA, no período de novembro de 2004 a novembro de 2005. Observe-se uma queda na velocidade do vento entre os meses de dezembro de 2004 a março de 2005, esta queda ocorreu devido à mudança de lugar do anemômetro, que antes se situava na torre grande, a 54 metros e foi para 37 metros de altura na torre da parcela de exclusão. Com essa mudança de lugar, houve uma redução de, aproximadamente, 50% na velocidade do vento, devido à diminuição da altura em 17 metros e ao aumento da rugosidade da superfície, no local onde foi instalado. A média da velocidade do vento a partir do mês de março de 2005 foi de 1,0 m s^{-1}.

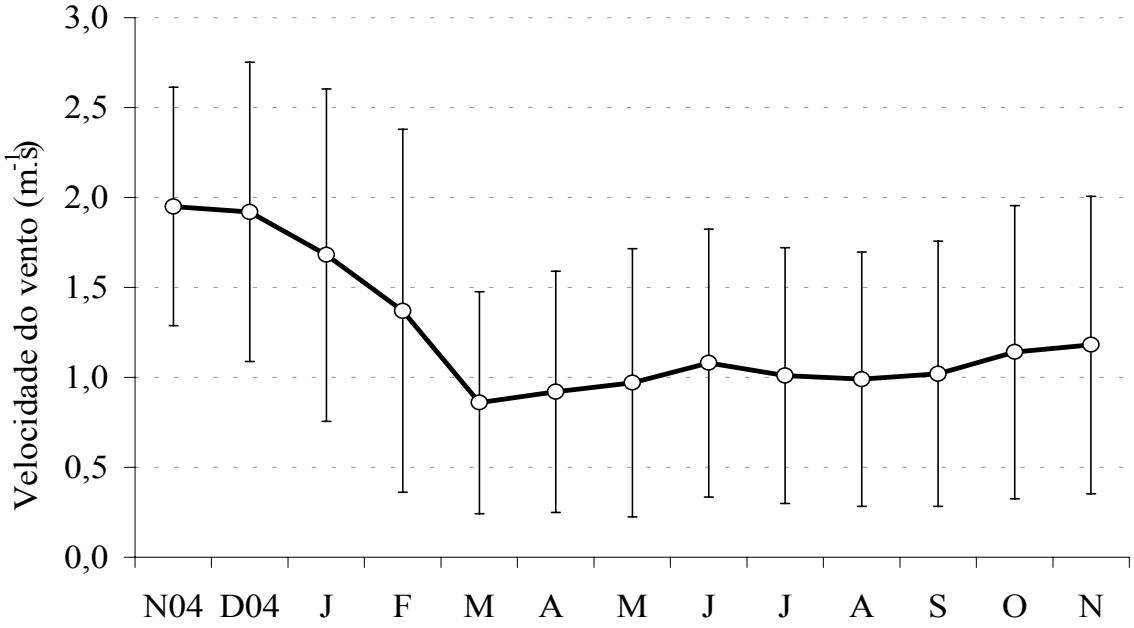

Figura 11 - Médias mensais da velocidade do vento na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005.

A predominância da direção do vento durante o período estudado na FLONA de Caxiuanã, PA está ilustrada na Figura 12. A predominância da direção do vento durante todo período foi de NE (Nordeste). Durante o período chuvoso a freqüência da predominância do vento foi de 26% para E (Leste) e NE, enquanto que no período seco foi de 42% para NE. Esse comportamento da direção do vento se dá devido à influência dos ventos alísios de Nordeste na região.

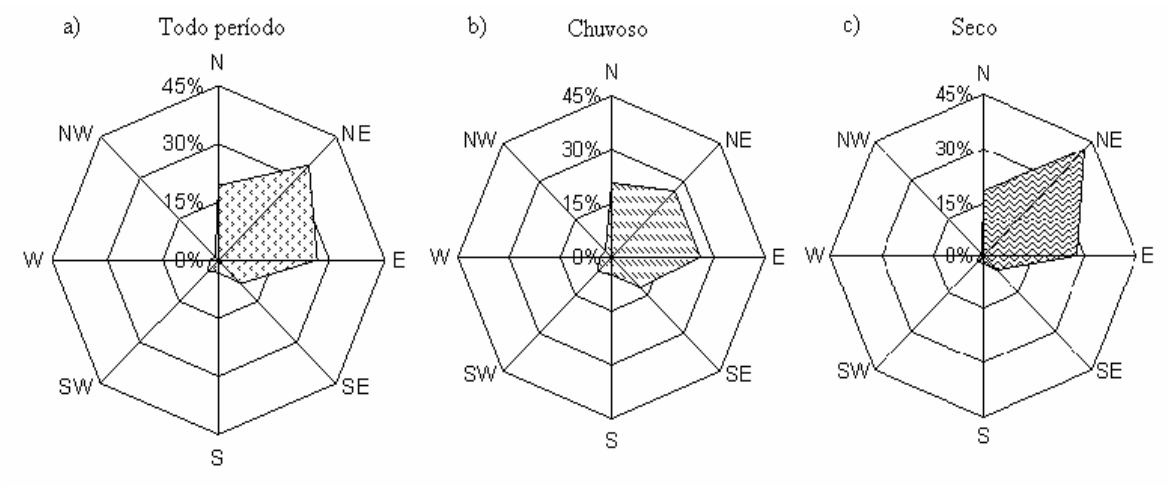

Figura 12 - Predominância da direção do vento na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005.

4.2. Respiração do solo

A média do fluxo de CO_2 do solo nas parcelas de controle e de exclusão no período de novembro de 2004 a novembro de 2005 para a FLONA de Caxiuanã está ilustrada na Figura 13.

As médias do fluxo de CO_2 do solo nas parcelas de controle e exclusão foram de 3,48 ± 0,27 e 3,20 ± 0,21 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente, durante o período estudado. Os valores máximos do fluxo de CO_2 do solo foram de 4,13 ±0,25 e 4,22 ± 0,37 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, nas parcelas de controle e de exclusão, respectivamente e valores mínimos de 2,69 ± 0,38 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, na parcela de controle e 1,79 ± 0,10 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, na parcela de exclusão. Os coeficientes de variação (CV) para as parcelas de controle e de exclusão foram de 12,8% e 26,1%, respectivamente, mostrando que a variabilidade dos valores medidos com relação à média foram pequenos, e quanto menor forem os valores do CV, maior será a homogeneidade dos dados. Observou-se que no período de novembro de 2004 até junho de 2005 os comportamentos dos fluxos nas parcelas são semelhantes. Esse fato se deve ao

período que a cobertura de exclusão da chuva passou por um período de reforma em seus painéis, nas suas estruturas e nas calhas de drenagem. Após o mês de junho com o fechamento dos painéis, verificou-se que o efeito da exclusão da chuva causou uma redução gradativa no fluxo de CO_2 do solo na parcela de exclusão, provocado pela redução das atividades microbianas. A queda brusca do fluxo de CO_2 do solo no mês maio de 2005 (3,20 ± 0,25 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) está relacionada com o volume de precipitação ocorrida (441,2 mm) no período que antecedeu a medida. A partir do mês de junho de 2005, os painéis foram fechados e pode-se observar o efeito causado pela exclusão da chuva no fluxo de CO_2 do solo na parcela de exclusão. Esse efeito se dá pela redução das atividades heterotróficas no solo. Sotta *et al.*, (2004) encontraram um valor médio diurno da respiração do solo de 3,2 ± 0,02 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, em uma floresta próxima de Manaus, AM, no período de maio a julho de 1997. Segundo Salimon *et al.*, (2004), os valores médios encontrados dos fluxos foram 4,86 ± 0,13 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, em uma região de floresta próximo a cidade de Rio Branco, AC, durante um ano de medidas. Segundo Sotta *el at.*, (2006) os valores médios dos fluxos de CO_2 do solo encontrados foram de 3,96 ± 0,06 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, durante estudos realizados em um período de dois anos na FLONA de Caxiuanã, o que não difere muito dos valores típicos encontrados na floresta amazônica e no presente estudo.

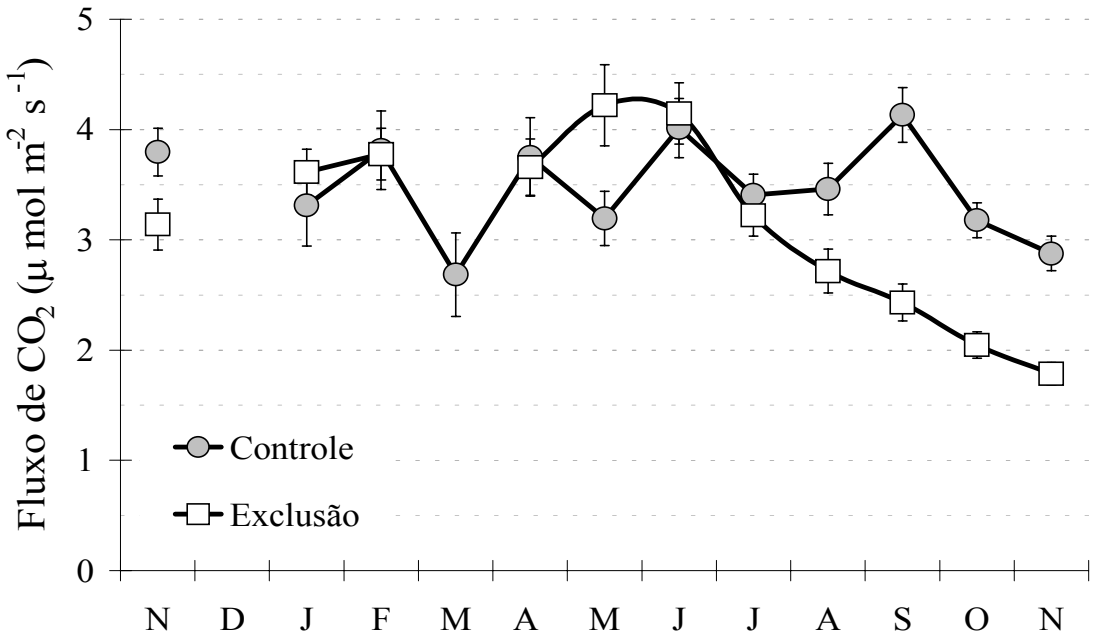

Figura 13 – Comportamento anual do fluxo de CO_2 médio (média ± desvio-padrão) na FLONA de Caxiuanã, PA no período de novembro de 2004 a novembro de 2005

Geralmente, a respiração do solo varia com o tempo e o espaço, e como um dos principais fatores chave desta variação, temos a temperatura e conteúdo de água no solo. Nas florestas tropicais os fatores que influenciam a variação temporal da respiração do solo não são somente a temperaturas do solo, o conteúdo de água no solo ou a precipitação pluvial, pois eles são relativamente constantes (Davidson *et al*., 2000; Adachi *et al.,* 2006). Por outro lado, a respiração do solo é composta pela respiração das raízes e microbiana. Alguns estudos relatam o relacionamento entre a respiração do solo e o ambiente subterrâneo (biomassa de raízes) e a biomassa microbiana do solo (Fang *et al.*, 1998; Neergaard *et al*., 2002; Adachi *et al.*; 2006).

A Figura 14 exibe o ciclo diário do fluxo de CO_2 na FLONA de Caxiuanã, PA. As medidas foram realizadas a partir das 14 horas do dia 19 até as 12 horas do dia 20 de agosto de 2005. Foi observado que as variações horárias na respiração do solo não são muitas,

ocorrendo pequenos aumentos e reduções durante o dia e a noite. Isso ocorreu pelo fato dos elementos que influenciam na respiração do solo não apresentarem variações significativas em um pequeno espaço de tempo. A média do fluxo de CO_2 do solo nos pontos 13 e 14 da parcela de controle foram de 4,36 ± 0,43 e 1,56 ± 0,20 µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, respectivamente. Os valores do fluxo de CO_2 do solo variaram de 3,34 a 5,42 µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ no ponto 13 e de 1,14 a 1,96 20 µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ no ponto 14. Os valores do fluxo de CO_2 do solo no ponto 13 são maiores, devido, possivelmente, a maior quantidade de matéria orgânica em decomposição na superfície do solo e quantidade de arborização, enquanto que, no ponto 14, a quantidade de matéria orgânica em decomposição na superfície do solo é menor. Sotta *et al*., (2004) encontraram uma variação no fluxo de CO_2 do solo de 1,2 a 4,7 µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ durante um período de 24 horas com uma amplitude do ciclo diurno de 1,3 µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, na Reserva Biológica de Cuieiras, próxima de Manaus, AM.

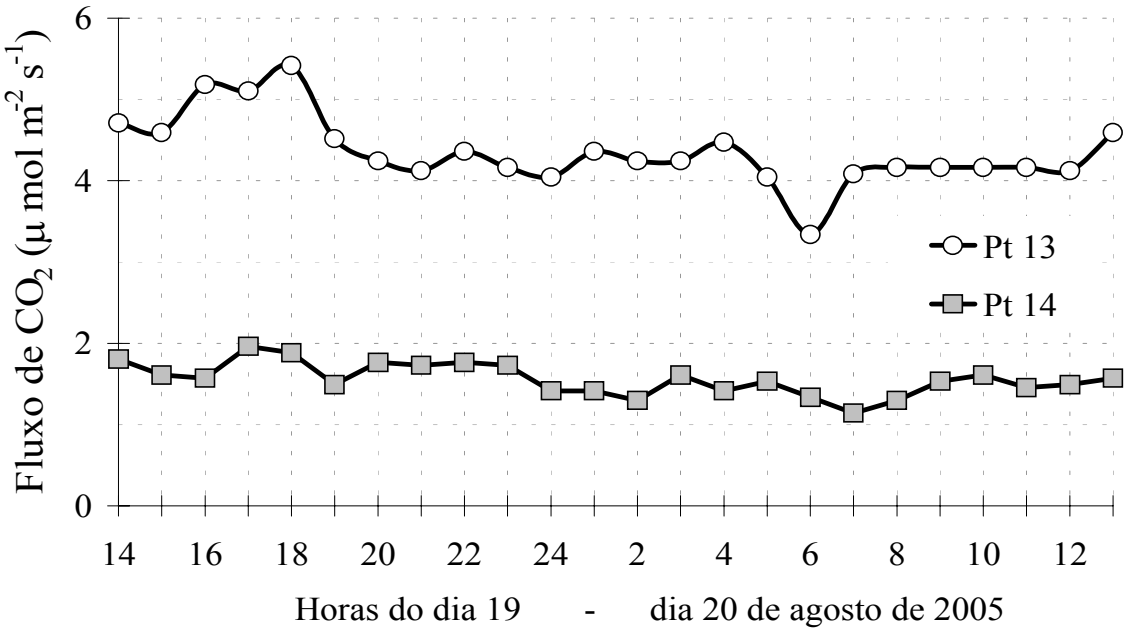

Figura 14 - Ciclo diário do fluxo de CO_2 do solo na FLONA de Caxiuanã, PA nos dias 19 e 20 de agosto de 2005

4.3. Umidade do solo

A Figura 15 exibe a média mensal da umidade do solo no período de estudo (novembro de 2004 a novembro de 2005), na FLONA de Caxiuanã, PA. A umidade do solo é a umidade presente na porção do solo situada acima da superfície do lençol freático, incluindo o vapor d'água presente nos interstícios. A umidade é um fator importante, pois ajuda a regular as atividades dos organismos e a limitar a distribuição dentro de um ecossistema (Odum, 1988). Na Amazônia, a umidade do solo é diretamente afetada pelo regime sazonal. No período de dados analisado, a umidade do solo na parcela de controle, ela variou de 6,2% em novembro de 2004 a 20,9% em maio de 2005. Na parcela de exclusão, a umidade do solo variou de 5,7% em novembro de 2004 a 16,4% em abril de 2005. A média da umidade do solo no período estudado foi de 12,3 e 9,0% para parcela de controle e de exclusão, respectivamente. O coeficiente de variação foi de 40% na parcela de controle e 39,6% na parcela de exclusão, indicando que os valores de umidade do solo em ambas as parcelas foram heterogêneos.

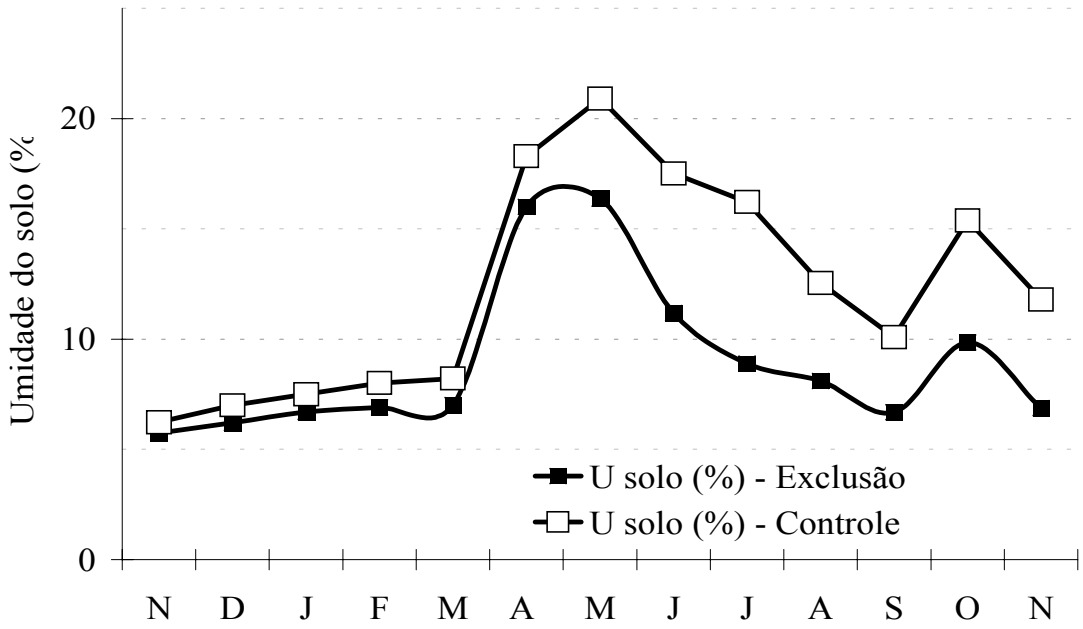

Figura 15 - Média mensal da umidade do solo no período de novembro de 2004 a novembro de 2005, na FLONA de Caxiuanã, PA

Como o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos de partes sólidas, líquidas e gasosas, os poros formados pela organização tridimensional da sólida oferecem espaço para acomodar as fases líquidas e gasosas (EMBRAPA, 1999). Dessa forma, o excesso de água do solo causará interferência no fluxo de CO_2 do solo, tanto pelo efeito físico do impedimento da passagem do CO_2 até atingir a interface solo-atmosfera, como pela redução da atividade respiratória aeróbica, que é a principal responsável pela emissão de CO_2 do solo (Pinto Júnior, 2007).

As Figuras 16 e 17 ilustram a regressão linear entre os valores médios mensais da umidade do solo e do fluxo de CO_2 do solo da parcela de controle e de exclusão, respectivamente, na FLONA de Caxiuanã, PA. Foi observado que a correlação entre estes dois elementos na parcela de controle é insignificativa (R = 12,5) e na parcela de exclusão

temos uma correlação significativa (R = 49,7). A combinação de outros fatores como a temperatura, umidade do solo e precipitação pode ter muito mais influência nas taxas do fluxo do que cada um desses fatores isoladamente.

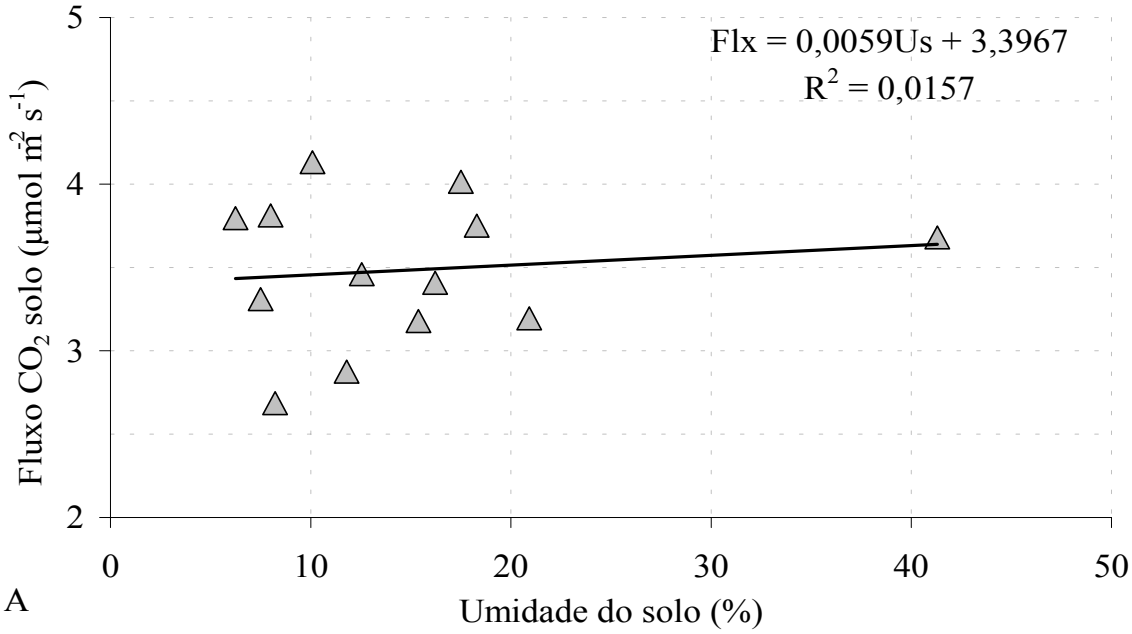

Figura 16 - Regressão linear entre as médias mensais da umidade e o fluxo de CO_2 do solo da parcela de controle na FLONA de Caxiuanã, PA

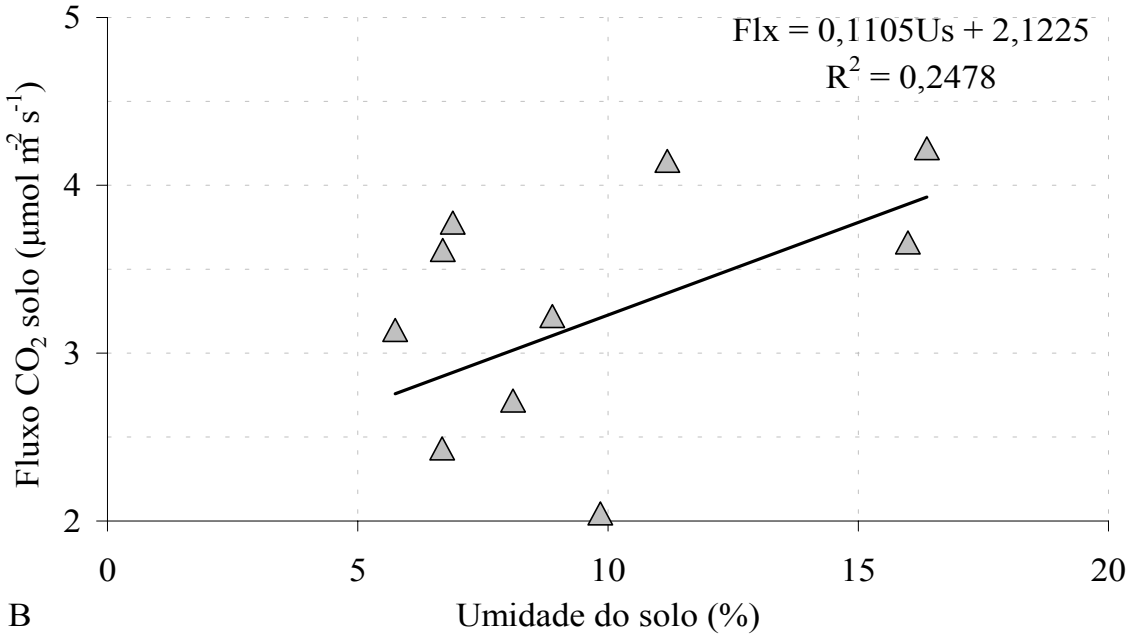

Figura 17 - Regressão linear entre as médias mensais da umidade e o fluxo de CO_2 do solo da parcela de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA

4.4. Temperatura do solo

As flutuações médias mensais da temperatura do solo (Ts) das parcelas de controle e de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA, no período de novembro de 2004 a novembro de 2005, são mostradas na Figura 18. As médias da Ts nas parcelas de controle e de exclusão foram de 25,9 ± 1,2 e 25,8 ± 0,8 ºC, respectivamente. O menor valor da temperatura do solo na parcela de controle e exclusão foi 25,1ºC em ambas as parcelas (julho 2005) e a Ts máxima foram de 29,4 e 27,7 ºC, no mês de novembro de 2004, nas parcelas de controle e exclusão, respectivamente. Salimon *et al.,* (2004) encontraram valores de Ts que variaram de 20 a 26ºC em uma floresta próxima de Rio Branco, AC. Sotta *et al.,* (2004) encontraram um valor médio de 25,6 ± 0,22 ºC próximo a Manaus, AM e em estudos na FLONA de Caxiuanã, PA, Sotta *et al.*, (2006) encontraram um valor de 24,1 ± 0,13 ºC para a Ts, valores que não diferem dos valores encontrados no presente estudo.

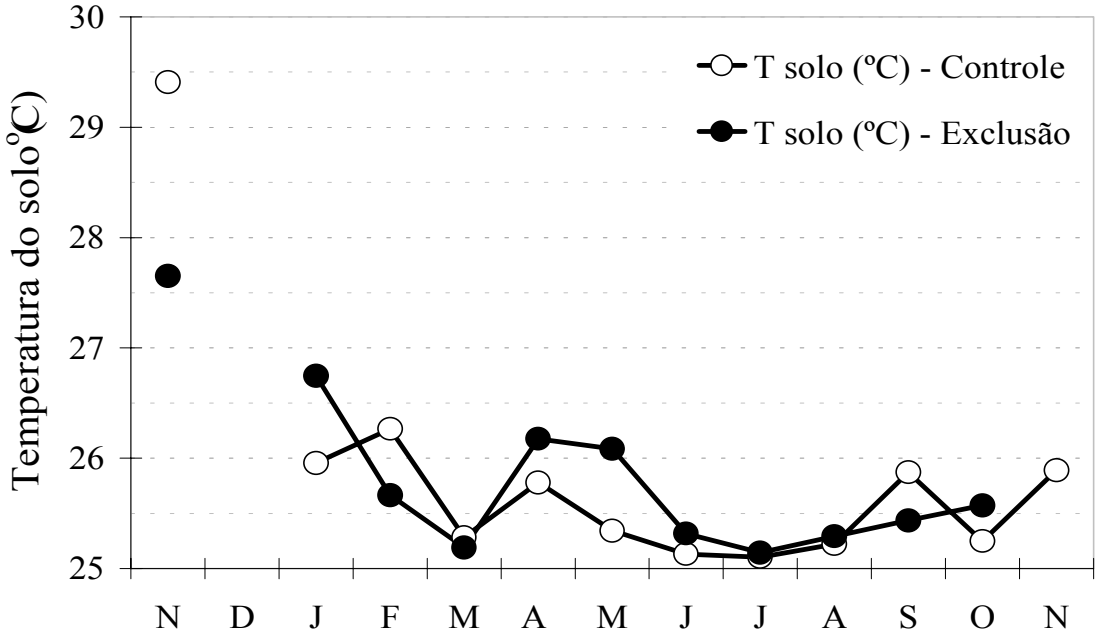

Figura 18 - Média mensal da temperatura do solo na FLONA de Caxiuanã, PA, no período de novembro de 2004 a novembro de 2005

As Figuras 19 e 20 exibem as regressões lineares entre os valores médios mensais da temperatura do solo e do fluxo de CO_2 do solo nas parcelas de controle e de exclusão. As correlações entre as médias mensais da temperatura do solo e do fluxo de CO_2 do solo da parcela de controle e de exclusão foram fracas, com R = 28,0 e R = 30,6, respectivamente, em cada parcela, indicando que a temperatura do solo exerce uma influência muito fraca sobre os fluxos de CO_2 do solo.

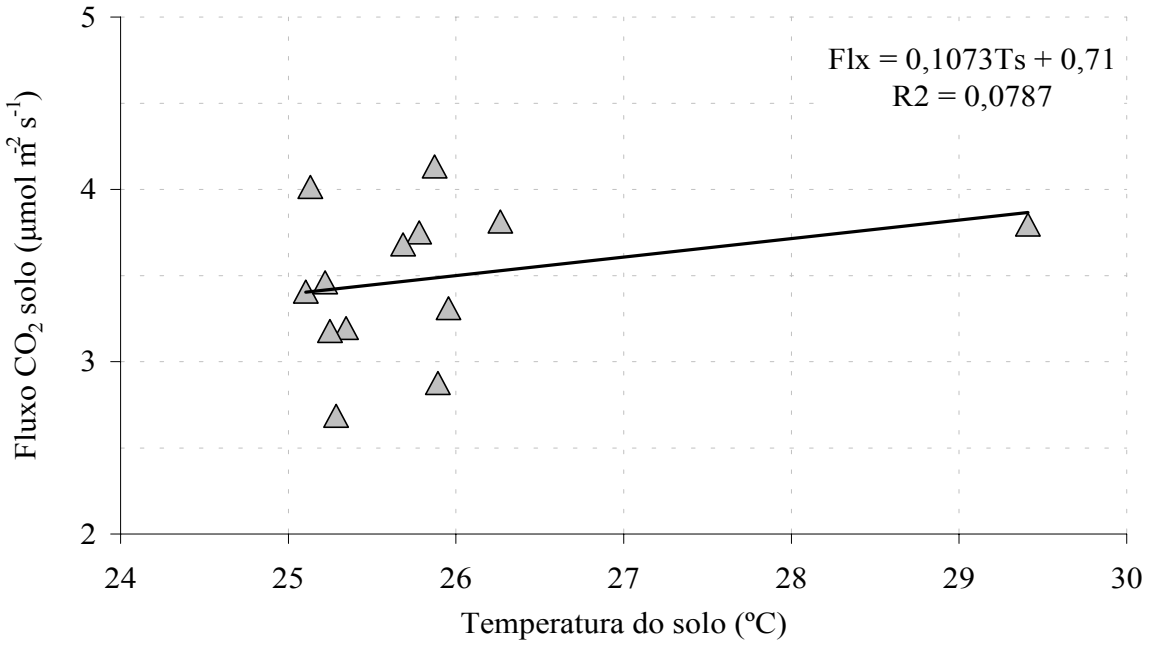

Figura 19 - Regressão linear entre os valores médios mensais da temperatura do solo e do fluxo de CO_2 do solo da parcela de controle na FLONA de Caxiuanã, PA

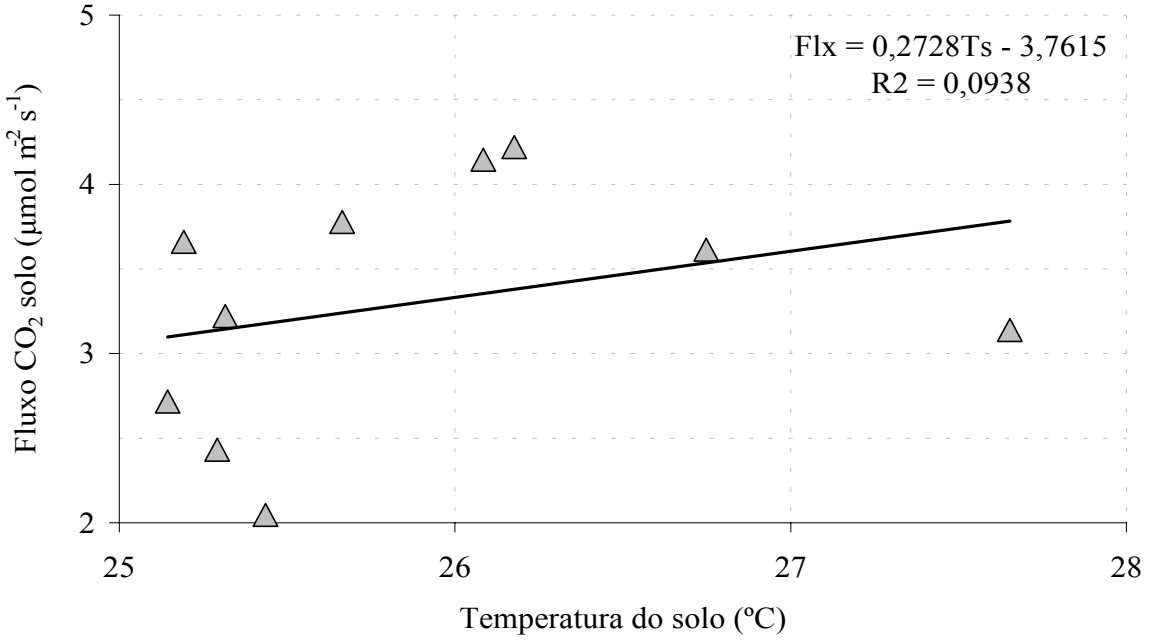

Figura 20 - Regressão linear entre os valores mensais da temperatura do solo e do fluxo de CO_2 do solo da parcela de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA

4.5. Correlações entre a precipitação pluvial e o fluxo de CO_2 do solo.

As Figuras 21, 22, 23 e 24 exibem as regressões lineares entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada nos períodos de um dia, três dias, cinco dias e dez dias, respectivamente, antes da leitura do fluxo de CO_2 do solo na parcela de controle durante o período estudo.

Na análise da chuva acumulada em 1, 5 e 10 dias antes das medidas, observou-se que os valores das regressões foram insignificantes R^2 = 0,05, R^2 = 0,05 e R^2 = 0,03, respectivamente, enquanto que, para a precipitação acumulada no período de 3 dias antes das medidas o resultado da regressão foi bastante fraco, embora tenha apresentado maior valor no coeficiente de determinação (R^2 = 0,19).

Os resultados mostram que para 1, 5 e 10 dias, as correlações do fluxo de CO_2 do solo com a precipitação são fracas, com R = 22,5%, R = 23,8% e R = 18,5%, respectivamente. No período de 3 dias, os resultados mostraram uma correlação moderada entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação (R = 43,6). Através das análises das correlações se percebe que a chuva acumulada durante os dias que antecederam as medidas não exerceram nenhuma influência nos fluxos de CO_2 do solo.

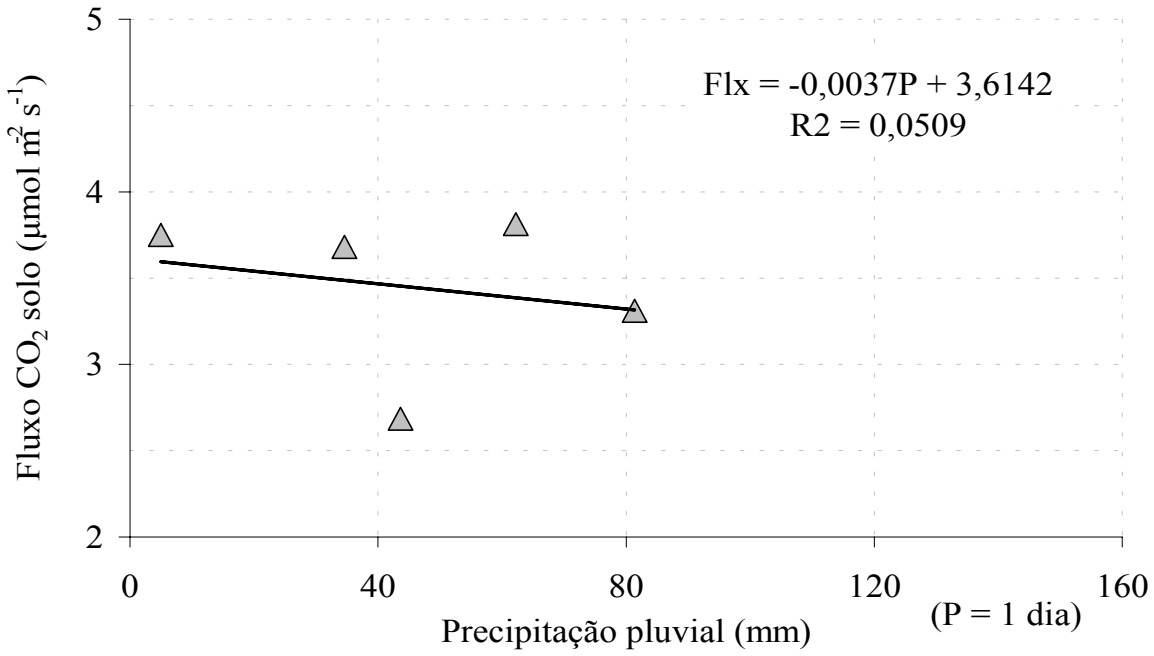

Figura 21 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (1 dia antes da leitura)

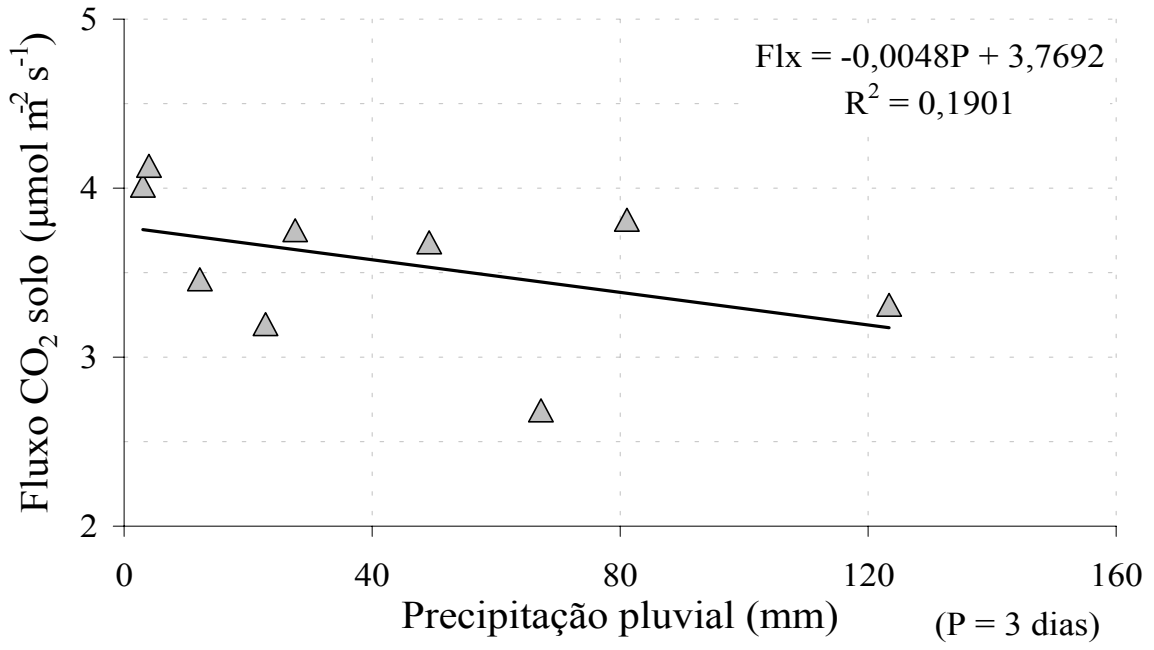

Figura 22 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (3 dias antes da leitura)

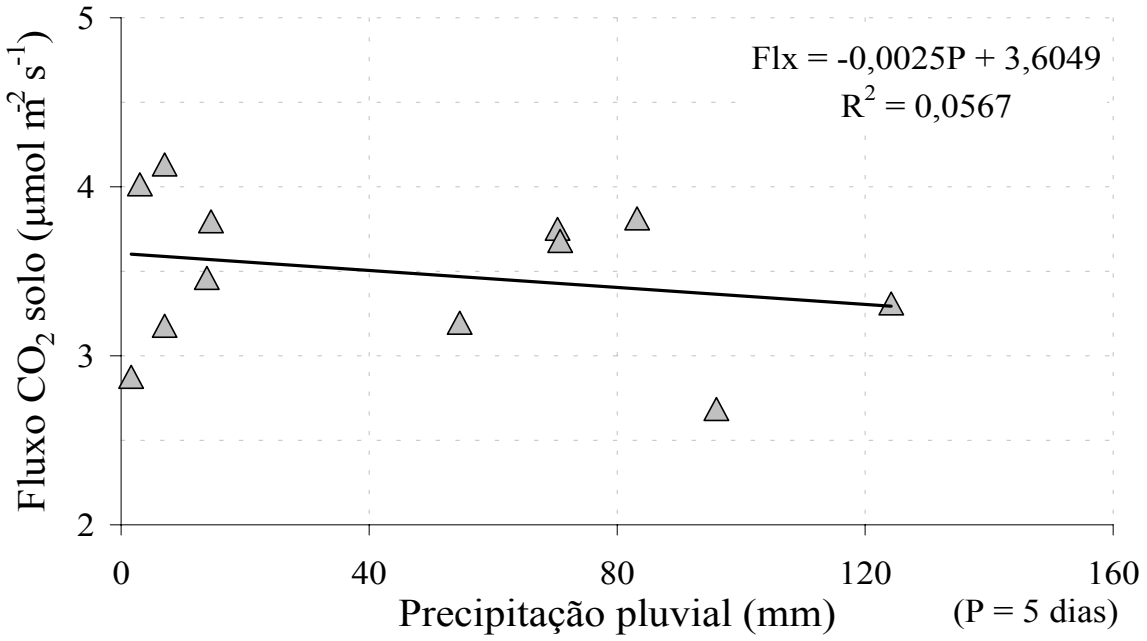

Figura 23 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (5 dias antes da leitura)

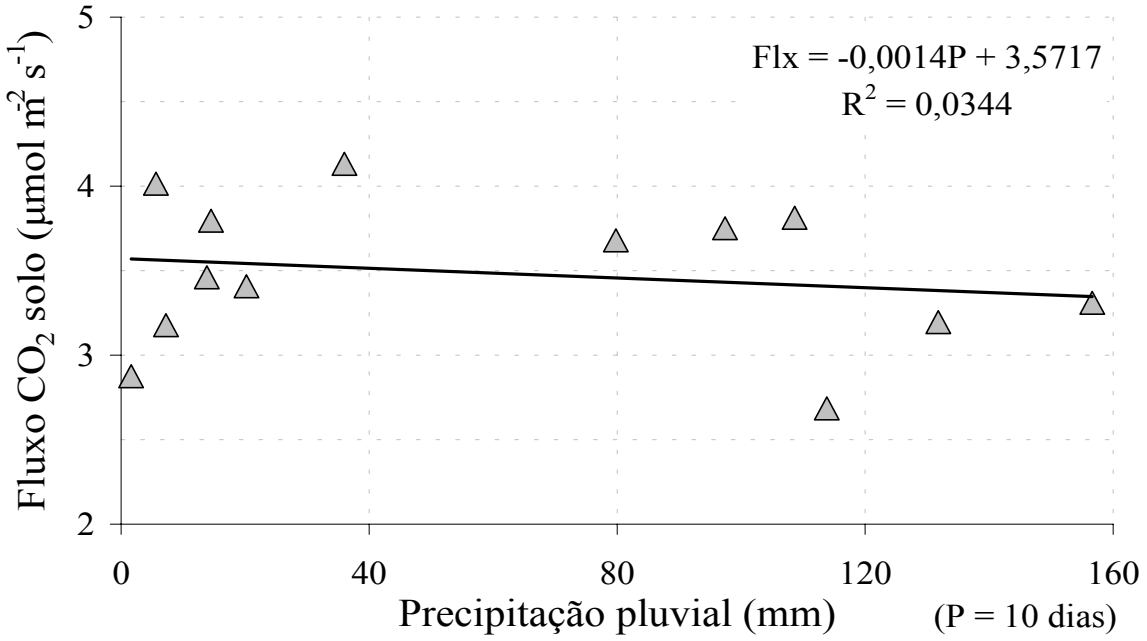

Figura 24 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a precipitação pluvial acumulada (10 dias antes da leitura)

4.6. Correlações entre o fluxo de CO_2 do solo e biomassa vegetal

A Figura 25 exibe a variação mensal do peso total da biomassa (PTB) aérea nas parcelas de controle e de exclusão, respectivamente, na FLONA de Caxiuanã, PA, no ano de 2005. É importante observar a variabilidade mensal na biomassa total na parcela de exclusão da água no solo, quando comparada com a variabilidade na parcela de controle.

No período que se estende de janeiro a agosto (parcela de controle), foi verificada uma pequena expansão no DAP das árvores, implicando no aumento de sua biomassa total. Após o mês de setembro verifica-se a retração no DAP das árvores, implicando na redução de sua biomassa aérea total, o que, certamente, está associado com o ápice da estação seca da região, voltando a aumentar em dezembro, quando as precipitações voltaram a ocorrer com maior volume.

Quando observado o comportamento das árvores na parcela que apresenta deficiência hídrica no solo, observa-se uma redução de 8,6 % no PTB durante o período estudado. A partir do mês de agosto de 2005, observou-se uma pequena redução de 14,5 Ton no PTB (2,7 %), certamente, devido aos efeitos da exclusão da precipitação pluvial, o que caracteriza a resposta da vegetação ao estresse hídrico.

Segundo, Silva (2006), os valores médios do PTB na FLONA de Caxiuanã, PA foram de 527 Ton. Santos *et al.*, (2004) estimou a quantidade de biomassa seca acima do solo de 2.594 com DAP de 5 cm, no rio Jubá, Cametá, PA, tendo como as espécies predominantes: *Euterpe olaracea mart* (açaí) e *Theobroma cacao L.*(cacau), que representaram 80 % dos indivíduos e 20 % restantes de outras espécies, e encontrou um peso total da biomassa aérea de 298,44 Ton ha^{-1}. Chambers *et al.*, (2000), encontraram um valor médio do peso total da biomassa aérea de 324 ± 17 Ton ha^{-1}, em uma floresta ao norte de Manaus, AM.

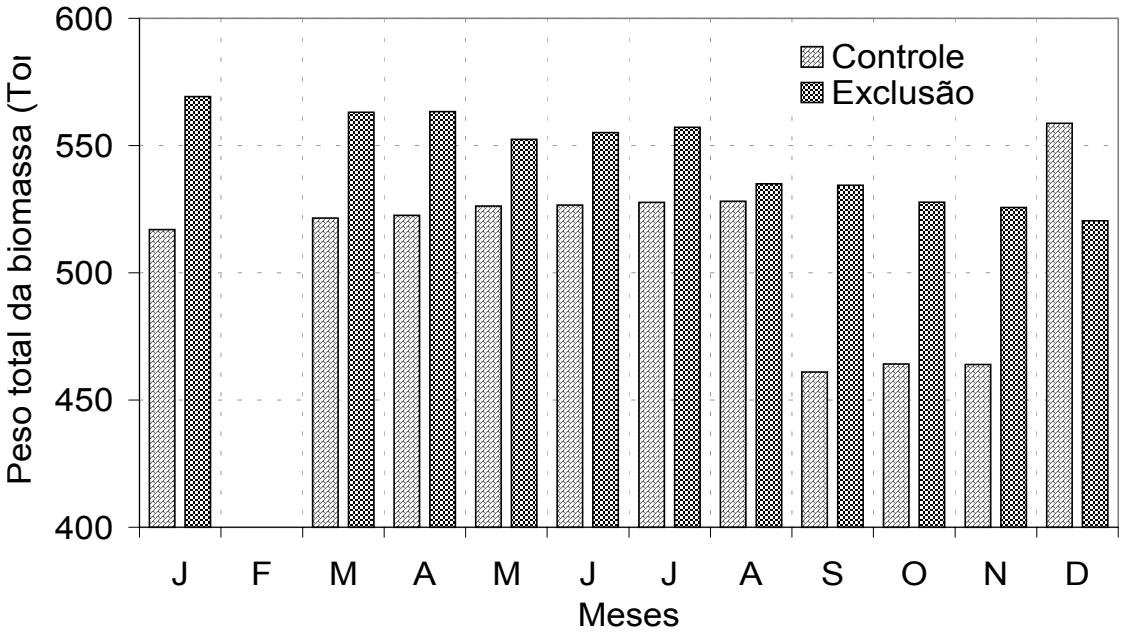

Figura 25 - Variação mensal do peso total da biomassa aérea na parcela de controle e exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA durante o ano de 2005

Nas Figuras 26 e 26 são apresentadas as regressões lineares do PTB aérea com o fluxo de CO_2 do solo na parcelas de controle e de exclusão, na FLONA de Caxiuanã, PA. A correlação entre as medidas mensais do peso total de biomassa aérea e o fluxo de CO_2 do solo foi moderada, na parcela de controle (R = 0,48) e na parcela de exclusão (R = 0,59), indicando que a respiração do solo exerce uma moderada influencia no crescimento da biomassa aérea da floresta Amazônica da região. O resultado das regressões foi baixo, com valores de R^2 = 0,23 e R^2 = 0,35 para as parcelas de controle e exclusão, respectivamente, indicando que a variação do peso total da biomassa aérea responde por uma influência muito pequena nesse comportamento.

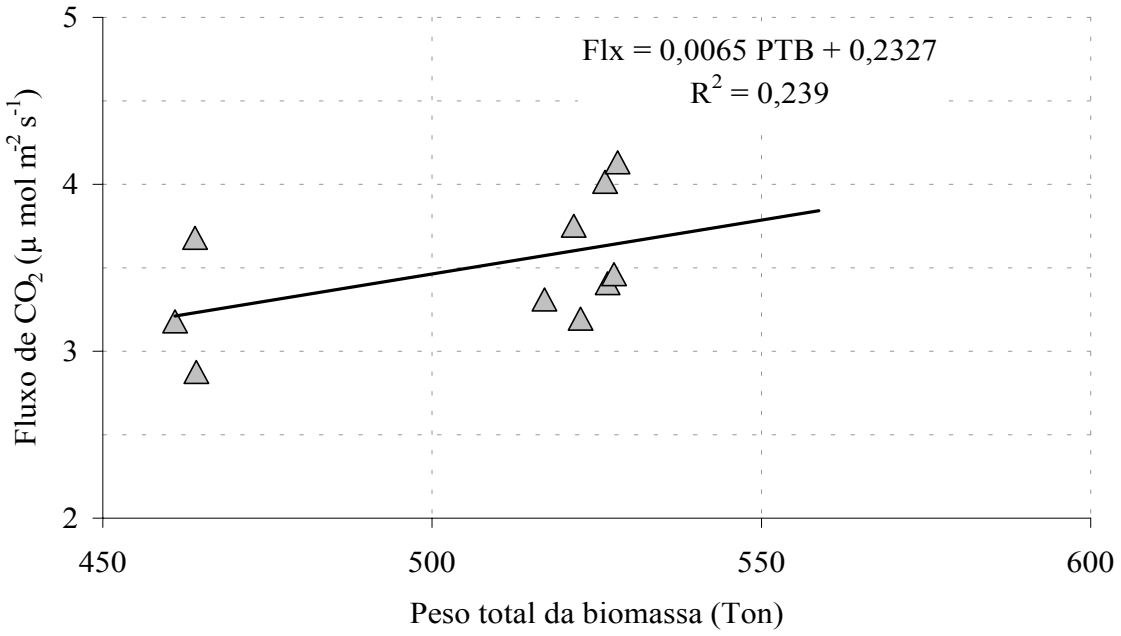

Figura 26 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e o total de biomassa aérea da parcela de controle na FLONA de Caxiuanã, PA durante o ano de 2005

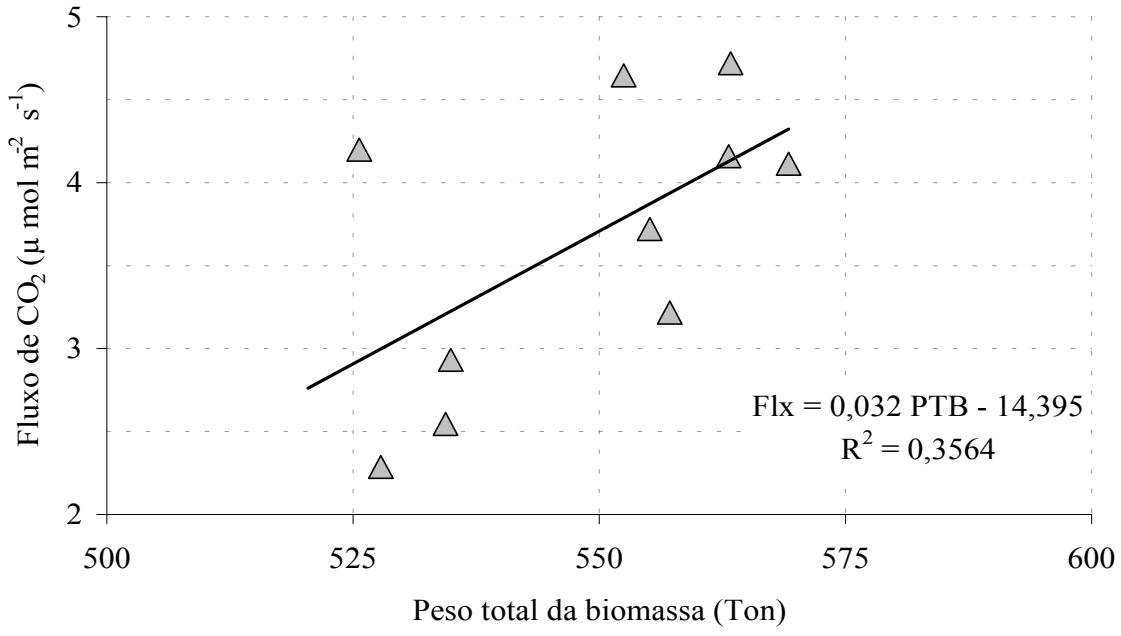

Figura 27 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e o total de biomassa aérea da parcela de exclusão na FLONA de Caxiuanã, PA durante o ano de 2005

4.7 – Correlações entre a matéria orgânica depositada na superfície do solo (liteira) com o fluxo de CO_2 do solo

Na Tabela 2 são apresentadas as medidas do fluxo de CO_2 do solo com e sem a presença de liteira na FLONA de Caxiuanã, PA. Foram utilizados 9 pontos distribuídos em cada parcela, onde foram instaladas as câmaras de PVC e realizadas as medidas do fluxo de CO_2 no solo (com e sem liteira) e a coleta da liteira dentro das câmaras em um intervalo de 6 meses cada medida.

No mês de novembro de 2004, comparando as medidas com a presença e posteriormente, com a ausência da liteira, houve uma redução de 10% nos fluxos de CO_2 do solo na parcela de controle (10,4 ± 1,6 para 9,4 ± 1,6 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$), e na parcela de exclusão houve uma redução nos fluxos de 2,2% na ausência da liteira no solo. No mês de junho de 2005, esta redução foi semelhante na parcela de controle e de exclusão. Quando comparado os fluxos com a presença de liteira da parcela de controle com a de exclusão, tem-se uma redução de 15,3% (novembro de 2004) e 36,8% (junho 2005) nas parcelas de controle e exclusão, respectivamente. Com a ausência de liteira na superfície do solo tem-se uma redução de 8,5% (novembro de 2004) e 31,8% (junho de 2005), respectivamente, nas parcelas de controle e exclusão. A presença da liteira no solo exerceu uma influencia de, aproximadamente, 10% nos fluxos de CO_2 do solo na parcela de controle e 2% na parcela de exclusão. Segundo Sotta *et al.* (2006) durante o estudo realizado na FLONA de Caxiuanã, em áreas de vale, platô e declives, e os valores médios dos fluxos de CO_2 do solo com a presença de liteira foram de 6,06 ± 0,62 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$. A camada de liteira contribuiu com, aproximadamente, 20% desses fluxos e houve uma variação 25% nos fluxos devido à sazonalidade na região.

Tabela 2 – Médias do fluxo de CO_2 do solo com e sem a presença de liteira na FLONA de Caxiuanã, PA

		Parcela de Controle ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$)	Parcela de exclusão ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$)
Novembro 2004	Com liteira	10,4 ±1,6	8,8 ± 2,1
	Sem liteira	9,4 ±1,6	8,6 ± 1,7
Junho 2005	Com liteira	7,6 ± 1,8	4,8 ± 1,3
	Sem liteira	6,9 ± 1,5	4,7 ± 1,2

Nas Figuras 29 e 30 exibem as regressões lineares entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira (ML) depositada na superfície do solo na FLONA de Caxiuanã, PA.

Na parcela de controle, a correlação entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na superfície em novembro de 2004 (N 04) foi muito fraca (r = 0,161 %), enquanto que no mês de junho de 2005 (J 05) esta correlação foi fraca (r = 0,323 %).

Na parcela de exclusão, a correlação entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na superfície, nos meses de novembro de 2004 e junho de 2005, foram moderadas (R = 59,3% e R = 53,6%, respectivamente), esse resultado indica um razoável relacionamento entre a matéria orgânica depositada na superfície (liteira) e a respiração do solo. A taxa de decomposição da matéria orgânica do solo está relacionada com o teor de umidade na camada superficial de liteira, existindo um mínimo aumento na umidade nesta camada os agentes heterotróficos agem na decomposição da matéria orgânica.

A regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na superfície na parcela de controle foi muito fraca, com valor de R = 14,1 % em novembro de

2004 e pouco significante, R = 31,6 %, em junho de 2005. Esses valores indicam que a massa de liteira depositada sobre a superfície do solo, não exerce uma influencia considerável sobre os fluxos de CO_2 do solo.

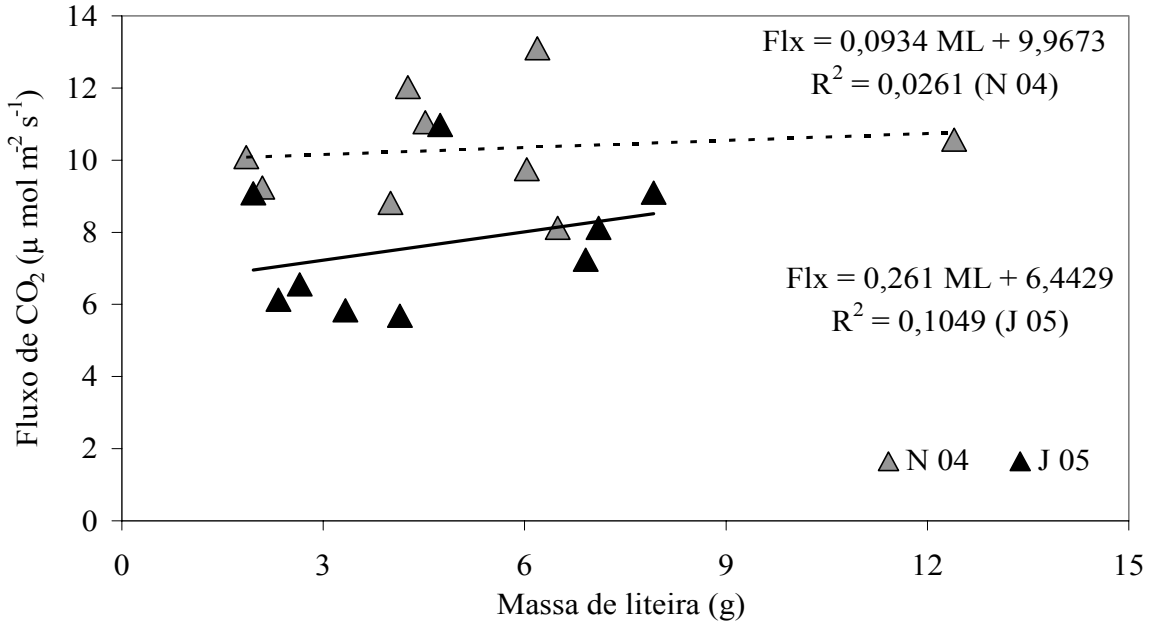

Figura 29 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na superfície, na parcela de controle, na FLONA de Caxiuanã, PA

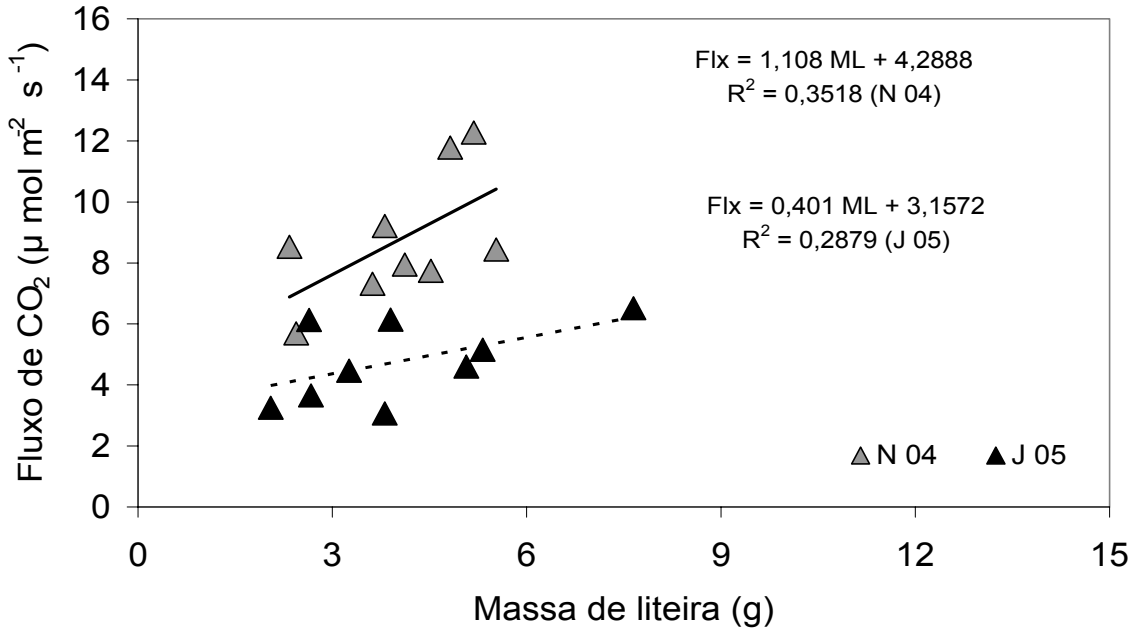

Figura 30 - Regressão linear entre o fluxo de CO_2 do solo e a massa de liteira depositada na parcela de exclusão, na FLONA de Caxiuanã, PA

4.8 – Correlações múltiplas entre o fluxo de CO_2 do solo e as variáveis edáficas e meteorológicas

A Tabela 3 exibe os valores de R^2 encontrados na correlação linear múltipla do fluxo de CO_2 do solo e da temperatura do solo com as variáveis meteorológicas e edáficas na FLONA de Caxiuanã, PA. Foram realizadas correlações lineares múltiplas entre o fluxo de CO_2 do solo e a temperatura com os parâmetros estudados: Us, precipitação mensal, e a precipitação acumulada em um dia (P1), três dias (P3), cinco dias (P5) e dez dias (P10) antes das medidas. A melhor correlação foi para chuva acumulada em três dias anteriores a medida dos fluxos.

Dado que, na parcela de controle, o valor de P3 na tabela ANOVA é maior ou igual a 0,10, não existiu uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis, para um nível de confiança de 90% ou superior. O R^2 indica que o modelo (Fluxo = -8,2725 – 0,00396839

$_x$ P3 + 0,463097 $_x$ Ts) explicou apenas 14,60% da variabilidade do fluxo de CO_2 no solo. O erro padrão mostrou o desvio típico dos resíduos que foi de 0,471 e o erro absoluto médio de 0,317538 é o valor médio dos resíduos. Nessa parcela não houve indícios de uma auto-correlação da série.

Dado que, na parcela de exclusão, o valor de P é inferior a 0,05, então, existiu uma relação estatística significativa entre as variáveis para um nível de confiança de 95%. O R^2 indicou que o modelo (Fluxo = 0,515403 + 0,0782117 $_x$ Ts + 0,00419973 $_x$ PRP) explicou 48,75% da variabilidade do fluxo de CO_2 do solo. O R^2 ajustado foi de 37,36%. O erro padrão da estimativa mostrou uma um desvio tópico dos resíduos que foi de 0,635 e o erro absoluto médio foi de 0,4102 que é o valor médio dos resíduos. Na parcela de exclusão, houve um indicio de uma possível correlação do fluxo de CO_2 do solo, temperatura do solo e a precipitação mensal.

Tabela 3 – Valores de R^2 encontrados na correlação linear múltipla do fluxo de CO_2 do solo e as variáveis edáficas e meteorológicas

Parcela	Fluxo de CO_2	Ts	Us	P1 (1 dia)	P3 (3 dias)	P5 (5 dias)	P10 (10 dias)	Precipitação pluvial (PRP)
Parcela de Controle	-		12,99	14,37	14,60 *	14,11	11,45	10,55
Parcela de Exclusão	-		22,76	14,28	20,72	30,57	39,81	48,75 *

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos a partir do experimento de campo realizado na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará, foi concluído que:

A combinação dos fatores meteorológicos e edáficos juntos exercem mais influência nas taxas do fluxo de CO_2 do solo do que cada um desses fatores isoladamente, já que separados, os resultados não indicaram uma relação entre os mesmos.

1- Observou-se uma pequena redução nos fluxos de CO_2 do solo durante o período estudado na parcela de controle. Na parcela exclusão, a partir do mês de julho de 2005, houve uma redução de 35,5 % nos fluxos de CO_2 do solo, comparado com a parcela de controle.

2- A correlação entre o peso total da biomassa e a respiração do solo foi moderada (parcela de controle = 48% e parcela de exclusão = 59%), indicando que a respiração do solo exerce uma moderada influência no crescimento da biomassa aérea da floresta nessa região.

3- A MOS (liteira) contribuiu com, aproximadamente, 10% na produção dos fluxos de CO_2 do solo na parcela de controle e 2,2% na parcela de exclusão. As correlações entre a massa de liteira depositada na superfície do solo e o fluxo de CO_2 do solo na parcela de controle e exclusão foram fracas moderadas, respectivamente, mostrando que a liteira não é o fator principal neste processo.

4- Com a exclusão da precipitação pluvial a partir do mês de junho de 2005, houve uma redução de, aproximadamente, 35,5% na respiração do solo com relação à parcela de controle.

5- A precipitação pluvial acumulada no solo nos três dias que antecederam as medidas de respiração do solo exerceu uma maior influência no fluxo de CO_2 do solo quando comparado com os períodos de um, cinco e dez dias.

6- A temperatura do solo sozinha exerceu uma fraca influência na respiração solo, nas duas parcelas.

7- A umidade do solo sofreu uma redução de 31,6% a partir do mês de abril de 2005, na parcela de exclusão, exercendo uma maior influência sobre os fluxos de CO_2 do solo nesta parcela quando comparado com a parcela de controle.

6. SUGESTÕES

Sugere-se para a continuação desse trabalho de medidas do fluxo de CO_2 do solo sejam adotadas novas mensurações complementares como:

- Instalação de perfis automáticos de temperatura e umidade do ar partindo da superfície da camada de liteira para monitorar o gradiente térmico no interior da floresta;
- Medições automatizadas do perfil da temperatura e umidade do solo;
- Medições automáticas em ambas as parcelas, dos fluxos de CO_2 do solo (inclusive o perfil) e realizar campanhas intensivas para coleta de dados horários durante as estações: chuvosa, de transição e seca.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adachi, M., Bekku, S. Y., Rashidah, W., Okuda, T., Koizumi, H. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. Applied Soil Ecology, v. 34, p. 258 – 265, 2006.

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). Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Botânica, v. 9, p. 99–188, 1993.

Andren, O., Schnurer, J. Barley straw decomposition with varied levels of microbial grazing by *Folsomia fimetaria* (*L.*) (*Collembola Isotomidae*). Oecologia, v.68, p. 57–62, 1985.

Araújo A. C., Nobre A. D, Kruijt B. et al. comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. Journal of Geophysical Research – Atmospheres, v. 107, Doi: 10, 1029/2001 Jd000676, 2002.

Aragão, L.E.O.C.; Malhi,Y.; Roman-Cuesta, R.M.; Saatchi, S.; Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. Geophys. Res. Lett., v. 34, 2007.

Baldocchi, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. Global Change Biology, v. 9, p. 479–492, 2003.

Baldocchi D. D., Wilson, K. B. Modeling CO_2 and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. Ecological Modelling, v. 142, p. 155–184, 2001.

Buchmann, N., Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in picea abies stands. Soil Biology & Biochemistry, v. 32, p. 1625–1635, 2000.

Buchmann, N. Plant ecophysiology and forest response to global change. Tree Physiology, v. 22, 1177–1184, 2002.

Chambers, J. Q., Santos, J., Ribeiro, R. J., Higuchi, N. Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. Forest Ecology and Management, 5348, p. 1-12, 2000.

Chambers, J.Q., Tibuzy, E.S., Toledo, L.C., Crispim, B.F., Iguchi, 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, v. 14, p72-88, 2004.

Costa, A. C. L. ; Silva, A. C. da S. e. ; Gonçalves, Paulo Henrique Lopes; Costa, M. C.; Barreto, P. N. . Variabilidade mensal da biomassa aérea em floresta tropical chuvosa influenciado por deficiência de água no solo. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju - SE. Efeito das mudanças climáticas na agricultura, 2007.

Costa, A. M. Caracterização e classificação dos solos e dos ambientes da Estação Científica Ferreira Penna, Caxiuanã, Melgaço, Pará. Msc Tese, FCAP, Belém, Brasil, 2002.

Costa, M. H., Foley, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO_2 concentrations, Journal of Climate, v. 13, p. 18 – 34, 2000.

Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R.A., Brovkin, V., Cox, P. M, Fisher, V. Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C. Global response of terrestrial

ecosystem structure and function to CO_2 and climate change: results from six dynamic global vegetation models. Global Change Biology, v. 7, p. 357-373, 2001.

Davidson, E. A., E. Belk, and R. D. Boone. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest, Global Change Biol., v. 4, p. 217– 227, 1998.

Davidson, E. A, Verchot, L. V., Cattânio, J. H. et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. Biogeochemistry, v. 48, p. 53–69, 2000.

Davidson, E. A., Savage, K., Verchot, L.V., Navarro, R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. Agricultural and Forest Meteorology, v. 113, p. 21–37, 2002.

Davidson, E. A., Françoise, Y. I., Nepstad, D. C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. Global Change Biology, v. 10, p. 718 – 730, 2004.

Dixon, R., Brown, S., Houghton, R., Solomon, A., Trexler, M., Wisniewski, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, v. 263, p. 185–191, 1994.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Solo. 2ª ed. Rio de Janeiro. RJ. (EMBRAPA-CNPS), 412p, 1999.

Fang, C., Moncrieff, J. B., Gholz, H. L., Clark, K. L. Soil CO_2 efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. Plant Soil, V. 205, p.135–146, 1998.

Ferreira da Costa, R., Costa, A. C. L. da, Meir, P., Malhi, Y., Fisher, R. A., Braga, A. P., Oliveira, P. J., Silva Junior, J. A., Gonçalves, P. H. L., Costa, J. M. N., E. D. Sotta, J. C. P., Cohen, R. L., Ruivo, M. L., Silva, R. B. C., Andrade, V. M. S., Grace, J. Projeto LBA/Esecaflor em Caxiuanã: Características, atividades e resultados. In: Seminário de

10 Anos de atividades da ECFPn, Caxiuanã, v. 1, Belém. Resumos. Belém: MPEG, Cd-Rom, 2003.

Fisch, G., Marengo, J., Nobre, C. A. Clima da Amazônia. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática - Edição Comemorativa de 10 anos, 3, 1996.

Fisher, R. A., Williams, M., do Vale, R. L., Costa, A. C. L., Meir, P. Evidence from Amazonian forests is consistent with isohydric control of leaf water potential. Plant Cell Environment, v. 29, p. 151–165, 2006.

Foley, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S., Haxeltine, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, v. 10, p. 603-628, 1996.

Granier, A., Ceschia, E., Damesin, C., Dufrêne, E., Epron, D., Gross, P., Lebaude, S., Le Dantec, V., Le Goff, N., Lemoine, D., Lucot, E., Ottorini, J., Pontailler, J., Saugier, B., The carbon balance of a young beech forest. Functionnal Ecology, v. 14, p. 312–325, 2000.

Hanson, P., Edwards, N., Garten, C., Andrews, J. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry, v. 48, p. 115–146, 2000.

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.

IPCC (Intergovernamental Panel on Climate Change). Climate Change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment, 1992.

IPCC (Intergovernamental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: The Scientific Basis - The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide, 2001.

IPCC (Intergovernamental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 2007.

Jenkinson, D. S., Adams, D. E., Wild, A. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming. Nature, v. 351, p. 304–306, 1991.

Jobbagy, E. G., Jackson, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, v. 10, p. 423-436, 2000.

Katterer, T., Reichstein, M., Andren, O., Lomander, A. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. Biology and Fertility of Soils, v. 27, p. 258–262, 1998.

Ke, X., Winter, K., Filser, J. Effects of soil mesofauna and farming management on decomposition of clover litter: a microcosm experiment. Soil Biology & Biochemistry, v. 37, p. 731–738, 2005.

Kuzyakov, Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods Soil Biology & Biochemistry, v. 38, p. 425–448, 2006.

Lisboa, P. L. B., Silva A. S. L, Almeida, S. S. Florística e estrutura dos ambientes. In: Lisboa P.L.B. (Ed). Caxiuanã: Pesquisa e desenvolvimento sustentável CNPq/Museu Paraense Emilio Goeldi, Belém, p. 163-193, 1997.

Malhi, Y., Baldocchi, D. D., Jarvis, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. Plant, Cell and Environment, v. 22, p. 715–740, 1999.

Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Valverde, M.C.; Laborbe, R.; Rocha, R.P. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5. Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente -

MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio, São Paulo, SP, 77 p, 2007.

McGuire, A. D, Melillo, J. M, Kicklighter, D. W., Joyce, L. A. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: empirical and process-based estimates. Journal of Biogeography, v. 22, p. 785-796, 1995.

Meir, P. The exchange of carbon dioxide in tropical forest. Phd Thesis, University Of Edinburgh, School of GeoSciences, Edinburgh, p. 208, 1996.

Meir, P., Grace, J. Scaling relationships for woody tissue respiration in two tropical rain forests. Plant, Cell and Environment, v. 25, p. 963–973, 2002.

Metcalfe, D. B. Understanding the effects of drought upon carbon allocation and cycling in an Amazonian rain forest. PhD Thesis, University of Edinburgh, School of GeoSciences, Edinburgh, p. 247, 2006.

Mikola, J., Setala, H. Productivity and trophic-level biomasses in a microbial-based soil food web. Oikos, v. 82, p. 158–168, 1998.

Molion, L.C.B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. Revista Brasileira de Meteorologia, v.2(1): 107 - 117, 1987.

Moncrieff, J., Massheder, J., Bruin, H., Elbers, D. J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H., Verhoef, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. Journal of Hydrology, v. 188–189, p. 589–611, 1997.

Moraes, J.C.; Costa, J.P.R.; Rocha, E.J.P. E Silva, I.M.O. Estudos Hidrometeorológicos na Bacia do Rio Caxiuanã. *In:* Lisboa, P. L. B. (Org). *Cnpq/Museu Paraense Emílio Goeldi*, Belém, p.85-95, 1997.

Neergaard, A., Porter, J. R., Gorissen, A. Distribution of assimilated carbon in plants and rhizosphere soil of basket willow (Salix viminalis L.). Plant Soil, V. 245, p. 307–314, 2002.

Nobre, C. A., Sellers, P. J., Shukla, J. Amazonian deforestation and regional climate change. Journal of Climate, v. 4, p. 957-988, 1991.

Odum, E. P. Ecologia. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Editora Guanabara. 434p. 1988.

Oliveira L. L. Avaliação da interceptação da precipitação pela vegetação na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande – PB, p.129, 2007.

Parker, L. W., Freckman, D. W., Steinberger, Y. *et al*. Effects of simulated rainfall and litter quantities on desert soil biota – soil respiration, microflora and protozoa. Pedobiologia, v. 27, p. 185–195, 1984.

Pinto Júnior, O. B. Fluxo de CO_2 do solo em floresta de transição Amazônica cerrado e em área de pastagem. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, p. 65, 2007.

Raich, J., Schlesinger, W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus, v. 44, p. 81–99, 1992.

Raich, J. W, Tufekcioglu, A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry, v.48, p. 71–90, 2000.

Raich, J. W., Potter, C. S., Bhagawati, D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94. Global Change Biology, v. 8, p. 800–812, 2002.

Rayment, M., Jarvis, P.G. Temporal and spatial variation of soil CO_2 efflux in a Canadian Boreal Forest. Soil Biology & Biochemistry, v. 32, p. 35–45, 2000.

Ruivo, M. L. P., Cunha, E. S. Mineral and organic components in archaeological black earth and yellow latosol in Caxiuanã, Amazon, Brazil. In: Tiezzi E, Brebbia Ca, Uso Jl (Eds) Ecosystems And Sustainable Development, Witt Press, Southhampton, Uk, pp.1113-1121, 2003.

Salimon, C. I., Davidson, E. A., Victoria, R. L., Melo, A. W. F. CO_2 flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. Global Change Biology, v. 10, p833-843, 2004.

Santos, S. R. M., Miranda, I. S., Tourinho, M. M.. Estimativa de biomassa de sistemas agroflorestais das Várzeas do rio Juba, Cametá, Pará. Acta Amazônica, v. 34, N° 1, p. 1-8, 2004.

Savage, K., Davidson, E. Interannual variation of soil respiration in two New England Forests. Global Biogeochemical Cycles, v. 15, p. 337–350, 2001.

Schimel, D. S., Braswell, B. H., Holland, E. A., Mckeown, R., Ojima, D. S., Painter, T. H., Parton, W. J., Townsend, A. R. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. Global Biogeochemistry Cycles, v. 8, p. 279-293, 1994.

Schimel, D. S., House, J. I., Hibbard, K. A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B. H., Apps, M. J., Baker, D., Bondeau, A., Canadel, J., Churkina, G., Cramer, W., Denning, A. S., Field, C. B., Friedlingstein, P., Goodale, C., Heimann, M., Houghton, R. A., Melillo, J. M., Moore, B., Murdiyarso, D., Noble, I., Pacala, S. W., Prentice, I. C., Raupach, M. R., Rayner, P. J., Scholes, R. J., Steffen, W. L., Wirth, C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. Nature, v. 414, p.169–172, 2001.

Schlesinger, W. H. Carbon balance in terrestrial detritus. Annual Review of Ecology And Systematics, v. 8, p. 51–81, 1977.

Schlesinger, W., Andrews, J. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, v. 48, p. 7–20, 2000.

Scott, R. L., Edwards, E. A., Shuttleworth, W. J., Huxman, T. E., Watts, C., Goodrich, D. C. Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. Agricultural & Forest Meteorology, v. 122, p.65–84, 2004.

Shukla, J., Nobre, C. A., Sellers, P. Amazon deforestation and climate change. Science, v. 247, p. 1322-1325, 1990.

Silva, R.P., Nakamura, S., Azevedo, C. P., Chambers, J., Rocha, R. M., Pinto, A. C. M., Santos, J. Higuchi, N. Uso de banda dendrométrica na definição de padrões de crescimento individual em diâmetro de árvores da bacia do Rio Cuieiras. ACTA AMAZONICA, Ed. 33, v. 1, p 67-84, 2003.

Silva, A. C. S. Estudo da variabilidade do incremento de biomassa influenciado por deficiência de água no solo. RELATÓRIO TÉCNICO INDIVIDUAL – (PIBIC/CNPq), 14p., 2006.

Sotta, E. D., Meir, P., Malhi, Y., Nobre, A. D., Hodnett, M., Grace, J. Soil CO_2 efflux in a tropical forest in the central Amazon. Global Change Biology, v. 10, p. 601–617, 2004.

Sotta, E. D., Veldkamp, E., Guimarães, B., Paixão, R. K., Ruivo, M. L. P. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO_2 efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. Forest Ecology and Management, v. 237, p. 57-64, 2006.

Subke, J. A., Reichstein, M., Tenhunen, J. D. Explaining temporal variation in soil CO_2 efflux in a mature spruce forest in southern Germany. Soil Biology & Biochemistry, v.35, p.1467–1483, 2003.

Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A.J., Schulze, E.-D., Rebmann, C., Moors, E.J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N.O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grunwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A.S., Vesala, T., Rannik, U., Berbigier, P., Loustau, D., Gu¨ Mundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncrieff, J., Montagnani, L., Minerbi, S., Jarvis, P. G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature v. 404, p. 861–865, 2000.

Wang, W. J., Zu, Y. G., Wang, H. M., Hirano, T., Takagi, K., Sasa, K., Koike, T. Effect of collar insertion on soil respiration in a larch forest measured with a Li-6400 soil CO_2 flux system. Journal of Forestry Research, v. 10, p. 57–60, 2005.

Zanchi, F. B. Medição do fluxo de CO_2 do solo com câmaras automáticas sobre floresta em Rondônia. Tese de Mestrado, universidade de São Paulo, USP/IAG, São Paulo, SP, p 57, 2004.