

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM

DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO
EM FLORESTA DE TERRA FIRME NA AMAZÔNIA CENTRAL

BIBLIOTECA DO INPA

Juliana Silva de Souza

VEDADO EMPRÉSTIMO

Dissertação apresentada ao Programa Integrado de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

MANAUS-AM
2004

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM

DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO
EM FLORESTA DE TERRA FIRME NA AMAZÔNIA CENTRAL

Juliana Silva de Souza



Orientador: Dr. Flávio Jesus Luizão

Dissertação apresentada ao Programa Integrado de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

T
333.95
5729d

MANAUS-AM
2004

Souza, Juliana Silva de

Dinâmica espacial e temporal do fluxo de CO₂ do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central / Juliana Silva de Souza. -- 2004.

62 f. : il.

Dissertação (mestrado)--INPA/UFAM, 2004.

1. Fluxo de CO₂ do solo 2. Ciclo de carbono 3. Gradiente topográfico 4. Amazônia Central

CDD 19. ed. 634.9

Sinopse

Foi verificada a variação espacial e temporal do fluxo de CO₂ do solo e como a topografia, características do solo e estoque de liteira influenciam este processo, em um transecto de 850 m na Reserva do Cuieiras, Manaus. Foi verificado maior fluxo de CO₂ nos solos de vertente, e relações significativas entre o fluxo e características do solo.

Palavras Chaves: Fluxo de CO₂ do solo, Respiração do solo, Dióxido de carbono, Carbono do solo, Nutrientes do solo, Textura do solo, Amazônia Central

Ao Carlos, meu marido,
por estar além dos agradecimentos,
dedico.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por serem grandes responsáveis pela formação que tenho hoje, além do amor e força que sempre me dão. Aos meus irmãos pelas experiências, e joelhos esfolados que compartilhamos ao longo de nossa vida. Também aos meus avós e tios por acreditarem e torcerem por mim.

Aos meus orientadores Regina e Flavio Luizão por estarem sempre presentes, apesar de tantas reuniões e burocracias projetuais atropelando seus dias.

Ao meu pai no campo, o Napoleão, pelos vários 'causos' contados com tanta alegria, animando os dias de trabalho. Também pela grande ajuda, desde atar a minha rede quando eu ainda não sabia, até atar a rede mesmo quando eu já sabia.

Ao Bart, por ser um orientador a distância e também um espelho para mim.

Ao Celso, por me acolher e me orientar durante os dutchdays, e ao Fabrício por compartilhar os dias de frio.

Ao Alessandro *lollipop*, por me ajudar no *jobjob* com tanto *jibjib*, e pela hospitalidade de sua família na Holanda.

Ao Jeff, pelas dicas e atenção dada ao longo do estudo. E ao Antônio Nobre por me deixar mais intrigada e curiosa com o assunto a cada conversa que tivemos.

Aos meus companheiros de campo, Glauco e Antônio, por dividirem os momentos de descontração no alojamento, e também por dividirem as gororobas que fazíamos quando chegávamos do mato cheios de fome. Também a Silvia, pessoa que tanto me identifico.

Aos meus amigos de prédio, Adeilson e Jorge por serem Rurálinos, e isso já diz tudo. E ao Domingos, por ser de Poxoréu e isso também já diz tudo.

Às minhas amigas Katyellen, Karyellem e Márcia por terem feito da sua a minha família, fazendo me sentir menos só no meu primeiro ano em Manaus.

Ao pessoal do LBA-MAO pela assistência logística, em especial à Sula, Érika, Ruth, Hermes e ao Fábio por terem agüentado tanto meus choros.

Ao pessoal do Bionte, especialmente ao Natan, Luciano, Suely e Rejane, por me acompanharem na labuta da liteira.

A todos do Laboratório de solos, principalmente ao Jonas, Mozanei, Orlando, Edivaldo e Tânia, pela ajuda nas análises, mesmo nos dias em que foi preciso carregar água.

A Fabiane, Lucinéia, Fabiana e Adriana pelo companheirismo e animação, não deixando o desânimo tomar conta.

Aos colegas de turma, em especial o Ulysses, Ronaldo e Euler por termos sonhado juntos a nossa vinda pro INPA. Aos colegas da turma anterior a minha, especialmente Fábio, Mari, Lili e Neila, e da turma posterior, especialmente ao Allan, por ser cria do Euler, tão mala e tão prestativo quanto.

Aos colegas do curso de ecologia pelo carinho e pela troca de idéias,

Ao seu Bernardo, por ser mais que dono do prédio, um amigo e ótimo *yakisobeiro*. E a sua família pelo carinho e amizade.

Ao Eduardo Lima, por me fazer apaixonada por solos, me iniciando na louca vida da pesquisa. Além de ter sido um paizão.

Ao Projeto CD-10 "Ecosystem Carbon Balance in a Primary Tropical Forest in Central Amazonia" (LBA-ECO)/NASA, pelo suporte financeiro.

A CAPES, pelo fornecimento da bolsa.

ÍNDICE

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
1-INTRODUÇÃO	1
2- OBJETIVOS	4
Objetivo geral	4
Objetivos específicos	4
3- REVISÃO DE LITERATURA	5
Umidade e temperatura do solo	6
Textura do solo	7
Nutrientes e pH do solo	7
Liteira e Matéria Orgânica	8
Concentração de CO ₂ atmosférico	9
Metodologias de medida	10
4- MATERIAL E MÉTODOS	11
Área de estudo	11
Localização	11
Clima	11
Solos	12
Vegetação	12
Topografia	13
Delimitação experimental e amostragem	14
Fluxo de CO ₂ do solo	14
Umidade do solo	16
Temperatura do solo	16
Química do solo	16
Estoque de liteira	16
Análise estatística	17
Ajustes metodológicos para o EGM-3	18
5- RESULTADOS	21
Caracterização do solo	21
Carbono, nitrogênio e relação C:N	21
Outros Macronutrientes do solo	24
Acidez, pH e saturação por bases	27
Gradiente textural	30
Caracterização do estoque de liteira	30
Fluxo de CO ₂ do solo	32
Influência da sazonalidade	32
Influência da variação topográfica	33
Influência da umidade do solo	34
Influência da temperatura do solo	36
Influência do estoque de liteira e propriedades químicas do solo	38

6- DISCUSSÃO	44
Solos e liteira.....	44
Solos	44
Liteira	45
Fluxo de CO ₂ do solo	46
Influência sazonal – o efeito da água	47
Influência topográfica (espacial) – o efeito da textura e vegetação	49
Relação entre fluxo de CO ₂ e umidade do solo	51
Relação entre fluxo de CO ₂ e temperatura do solo	51
Relação entre fluxo de CO ₂ e características do solo e estoque de liteira	52
7- CONCLUSÕES	55
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Lista de Figuras

Figura 1: Variação da altitude ao longo do transecto	14
Figura 2: Média do fluxo de CO ₂ dos testes para ajuste da câmara SCR-1	20
Figura 3: Variação do fluxo de CO ₂ do solo em diferentes níveis de resistência aplicadas ao ventilador da câmara	20
Figura 4: Variação dos conteúdos de C, N e relação C:N do solo, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo) e estações (n = 20)	23
Figura 5: Variação nos conteúdos de Ca, Mg e K trocáveis e do P disponível do solo, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo) e estações (n = 20)	26
Figura 6: Variação do pH, acidez potencial e do percentual de saturação por bases do solo, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo) e estações (n = 20)	29
Figura 7: Variação do conteúdo de argila e areia em função da altitude ao longo do transecto	30
Figura 8: Variação do estoque de liteira de folhas e total, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo) e estações (n = 20)	32
Figura 9: Variação sazonal no fluxo de CO ₂ do solo, nas diferentes posições topográficas: (a) Platô, (b) Vertente e (c) baixo	33
Figura 10: Fluxo de CO ₂ do solo nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo)	34
Figura 11: Relação entre o fluxo de CO ₂ e a umidade volumétrica do solo por estação --	35
Figura 12: Relação entre o fluxo de CO ₂ e a umidade gravimétrica do solo por posição topográfica	35
Figura 13: Relação entre o fluxo de CO ₂ e umidade gravimétrica do solo para vertente e baixo durante a estação chuvosa	36
Figura 14: Relação entre o fluxo de CO ₂ e temperatura do solo na estação chuvosa	37
Figura 15: Relação entre o fluxo de CO ₂ e temperatura do solo por posição topográfica -	37
Figura 16: Relação entre o fluxo de CO ₂ e temperatura do solo na vertente e baixo, dentro da estação chuvosa	38
Figura 17: Relações entre fluxo de CO ₂ do solo e Ca trocável (a), pH (b) e percentual de saturação por bases (c), na estação chuvosa	39
Figura 18: Relações entre fluxo de CO ₂ do solo e P disponível (a) e pH (b), no período de transição chuvosa-seca	39

Figura 19: Relação entre fluxo de CO ₂ e conteúdo de Ca trocável do solo, na estação seca -----	40
Figura 20: Relações entre fluxo de CO ₂ e percentual de C (a), percentual de N (b) e relação C:N (c) no solo do platô -----	41
Figura 21: Relações entre fluxo de CO ₂ e Mg trocável (a), K trocável (b), P disponível (c) e acidez potencial (d) no solo do platô -----	42
Figura 22: Relações entre fluxo de CO ₂ e Ca trocável (a), percentual de saturação por bases (b) do solo e massa de liteira (c), no solo do baixio -----	43
Figura 23: Variação fluxo de CO ₂ do solo ao longo do gradiente topográfico. Os pontos circundados referem-se aos pontos amostrais situados na área de campinarana. Barras verticais indicam o erro padrão -----	50

Lista de Tabelas

Tabela 1: Diferença entre médias para C, N e relação C:N do solo -----	22
Tabela 2: Diferença entre médias do conteúdo de macronutrientes -----	25
Tabela 3: Diferença entre médias do valor de pH, teor de acidez potencial e percentual de saturação por bases -----	28
Tabela 4: Diferença entre médias do estoque de liteira acumulada sob o solo -----	31
Tabela 5: Diferença entre médias do fluxo de CO ₂ do solo emitido nas diferentes posições e estações -----	34
Tabela 6: Valor médio do fluxo de CO ₂ do solo e metodologias utilizadas em outros estudos conduzidos na Amazônia (modificado de Sotta, 1998) -----	46

Resumo

O objetivo deste estudo foi determinar a variação espacial e temporal do fluxo de CO₂ do solo e sua relação com características físicas e químicas do solo. O estudo foi desenvolvido no período entre março e setembro de 2003, ao longo de um gradiente topográfico e de textura do solo na bacia do rio Cuieiras, Manaus, AM (2°35'21,08" S, 60°06'53,63" W). O fluxo de CO₂ do solo foi medido semanalmente em 20 pontos ao longo de um transecto de 850 m, utilizando um analisador de gás por infra-vermelho (EGM-3, PP Systems, U.K.); simultaneamente foram feitas medidas de temperatura e umidade volumétrica do solo. Amostras de solo e liteira para análises de nutrientes e cálculos de estoques foram coletadas em três diferentes épocas: 18 de abril (chuvosa), 05 de julho (transição chuvosa-seca) e 21 de setembro (seca). O fluxo de CO₂ do solo apresentou alta variabilidade espacial e sazonal com média total de 5,76 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o menor fluxo (1,07 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) registrado nos solos do baixio, e o maior (12,94 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) na vertente, ambos na estação chuvosa. A vertente apresentou os maiores valores, porém, na época seca os fluxos medidos nos solos do baixio aumentaram a ponto de se tornarem similares aos da vertente. Houve uma relação diretamente proporcional entre o fluxo de CO₂ do solo e temperatura, entretanto com a umidade volumétrica, a relação foi inversamente proporcional. Em geral, foram observadas melhores relações entre fluxo e características químicas nos solos de platô; por exemplo, a relação com o P disponível apresentou o melhor coeficiente de determinação (0,52). Por outro lado, as melhores relações com temperatura e umidade volumétrica foram observadas nos solos do baixio. Uma vez que o aumento da temperatura do solo eleva o fluxo de CO₂, e a redução da umidade ocasiona um acréscimo considerável do fluxo no solo do baixio, a escassez de chuvas sob a floresta pode proporcionar um aumento na emissão de CO₂ para a atmosfera, e conseqüente redução do estoque de carbono nos solos do baixio.

Abstract

The objective of this study was to determine the spatial and temporal variation of the soil CO₂ flux and its relation with soil chemical and physical properties. The study was carried out in the period between March and September 2003, along a topographic and textural gradient in Cuieiras Basin, Manaus, Amazonas (2°35'21.08" S, 60°06'53.63" W). Soil CO₂ flux was measured weekly at 20 points along a 850 m transect using an IRGA (EGM-3, PP system, UK). Soil temperature and volumetric water content measurements were taken simultaneously with the soil CO₂ flux. Soil and litter samples for chemical and stock analyses were collected three times during the period: 18 April (Wet season), 05 July (transition) and 21 September (dry season). Though showing high spatial and seasonal variability, average total soil CO₂ flux was 5.76 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹. The lowest flux was 1.07 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ in valley soil, and the highest 12.94 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ on the slope, both in the wet season. The slope soil showed the highest values, but, in the dry season, valley soils soil CO₂ flux increased, producing fluxes similar to those of the slope. There was a significant directly proportional relation between soil CO₂ flux and temperature, but an inverse relationship was found with soil volumetric water content. In the general, the best relations were observed between soil CO₂ flux and the chemical properties in plateau soil, such as available P, wich had the highest coefficient of determination (0.52). On the other hand, the best relations with soil temperature and volumetric water content were observed in the valley soils. Since the soil CO₂ flux has a linear relation with temperature, and the reduction of soil humidity causes a considerable increase in the valley soil fluxes, a shortage of rain in the forest can produce an increase in the soil CO₂ fluxes to atmosphere and a carbon stock reduction in the valley soils.

1- INTRODUÇÃO

O fluxo de CO₂ do solo é um dos componentes-chave no ciclo do carbono (Raich & Schlesinger, 1992; Yim *et al.*, 2002), sendo a maior fonte de carbono do ecossistema terrestre para a atmosfera (Wagai *et al.*, 1998; Roberts, 2000). Este processo varia muito entre tipos de vegetação (Wagai *et al.*, 1998; Davidson *et al.*, 2002) e segundo Le Dantec *et al.* (1999) é extremamente variável no espaço (decímetros) e no tempo (dias a estações). Entretanto, o CO₂ é um dos principais gases causadores do efeito estufa (Bernoux *et al.*, 2001) e sua concentração atmosférica tem sofrido acréscimos de 1 a 5 ppm ano⁻¹ desde a Revolução Industrial, aumentando de 280 ppm para 360 ppm (Roberts, 2001).

Este aumento acelerado ocorre principalmente devido ao desmatamento e utilização de combustíveis fósseis. Considerando que os solos e a fitomassa são os principais compartimentos de carbono (Bernoux *et al.*, 2001), a conversão de florestas em atividades agrícolas também é responsável por um aumento substancial na concentração de CO₂ atmosférico (Houghton *et al.*, 1983; Houghton, 1995). As emissões de CO₂ medidas em perfis de geleiras nos pólos permitem verificar que a humanidade está embarcando numa situação geofísica com grande potencial para causar drásticas alterações climáticas, como por exemplo, o aquecimento global (Crutzen, 2001).

Neste contexto, é conhecida a decisiva influência que a floresta amazônica exerce no ciclo global de carbono, com um seqüestro total estimado de 0,4 a 1,0 Gt de carbono por ano (Phyllips *et al.*, 1998). Também é conhecida a relação entre o tipo de bioma e o conteúdo de carbono estocado no solo, e que mudanças no clima global podem alterar o estoque de carbono dos solos (Post *et al.*, 1982). Portanto, qualquer mudança na floresta amazônica resultante das alterações climáticas ou das formas de uso da terra pode causar um impacto significativo no clima regional e global. Assim, estudos do ciclo de carbono na Amazônia são de grande relevância para a formulação de políticas ambientais e climáticas na América Latina e em qualquer outra região do planeta.

Nos ecossistemas tropicais, a alta temperatura ao longo do ano resulta em um grande aumento na razão das reações químicas e bioquímicas (Coleman *et al.*, 1984), incluindo os processos relacionados ao ciclo do carbono, como o fluxo de CO₂ do solo. A quantificação deste fluxo diretamente no campo fornece uma estimativa da real emissão de CO₂ do solo da floresta, e esta informação pode ser utilizada, por exemplo, para cálculos de seqüestro de carbono do ecossistema (Vanhala, 2002). Entretanto, inúmeros fatores físicos e químicos inter-relacionados determinam o fluxo de CO₂ (Tiwari *et al.*, 1987; Howard & Howard, 1993; Ball & Drake, 1997; Bekku *et al.*, 1997; Seneviratne & Holm, 1998; Wagai *et al.*, 1998; Vanhala, 2002; Yim *et al.*, 2002), podendo o solo estocar ou liberar consideráveis quantidades de carbono através de processos naturais como deposição, decomposição e respiração de raízes (Drewitt *et al.*, 2002).

Malhi & Grace (2000) concluíram em seu estudo que a produtividade das florestas tropicais pode ser muito maior do que a estimada anteriormente quando a produtividade dos solos for totalmente considerada. Calculando a participação deste componente no fluxo total do ecossistema, Meir *et al.* (1996) estimaram que 84% do CO₂ emitido pela floresta é oriundo do solo e sugeriram que é preciso um melhor entendimento da dinâmica do fluxo de CO₂ do solo em florestas tropicais. Yim *et al.* (2002) e Sotta (1998) ressaltam ainda que mais estudos são necessários para um melhor entendimento dos fatores que determinam a grande variabilidade do fluxo de CO₂ do solo.

Recente estudo (Araújo *et al.*, 2002) desenvolvido na Reserva Biológica do Cuieiras (ZF-2), utilizando duas torres meteorológicas (C14 e K34) instrumentadas medindo continuamente as concentrações de CO₂ da atmosfera (LI 6262, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA), mostrou que as medidas de fixação de carbono registradas pela torre C14 (no km 14 da estrada ZF-2) são maiores do que as medidas da K34 (no km 34 da ZF-2). Os autores sugeriram que esta diferença estaria relacionada ao relevo circundante as torres. Até 1 km de raio, a floresta circundante a torre do K34 apresenta 40% do relevo como platô, enquanto C14

apresenta 53% sobre platô. Analisando até 5 km de raio, o platô representa 54% da paisagem para a K34 e 63% para a C14. Portanto, as medidas de CO₂ da torre K34 abrangem mais áreas de baixios do que a C14. Neste contexto, vale ressaltar que medidas de diversas outras variáveis como, por exemplo, a relação C/N das folhas do dossel, da liteira e do solo, e os processos de mineralização de N e nitrificação no solo (Luizão *et al.*, 2004) registradas na área da K34 indicam algumas restrições pedobiológicas à produtividade vegetal nesses locais, corroborando com as limitações à fixação de carbono pela vegetação do baixio, registradas por Araújo *et al.* (2002).

Como o fluxo de CO₂ do solo é um componente expressivo da dinâmica do C nos ecossistemas terrestres, seu entendimento e quantificação tem, portanto, igual importância. Dentro deste contexto, é importante entender os diferentes processos relacionados à dinâmica do fluxo de CO₂ do solo entre as diferentes posições do relevo.

2-OBJETIVOS

Objetivo geral

Verificar a variação espacial e temporal do fluxo de CO₂ do solo e como a topografia, características do solo (temperatura, umidade e propriedades químicas) e a massa da camada de liteira influenciam este processo.

Objetivos específicos

- 1- Avaliar a variação espacial do fluxo de CO₂ do solo em função do gradiente topográfico.
- 2- Avaliar a influência da sazonalidade no fluxo de CO₂ do solo.
- 3- Avaliar a relação entre o fluxo de CO₂ e a umidade do solo.
- 4- Avaliar a relação entre o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo.
- 5- Avaliar a relação entre o fluxo de CO₂ e propriedades químicas (C, N, relação C:N, Ca, Mg, K, P, pH, acidez potencial e saturação por bases) do solo.
- 6- Avaliar a relação ente o fluxo de CO₂ e o estoque de liteira sobre o solo.

3- REVISÃO DE LITERATURA

A vida na Terra depende da energia derivada do sol. A fotossíntese, que só é realizada pelos organismos autotróficos, é o único processo de importância biológica capaz de obter esta energia. Este processo que se inicia com a excitação da clorofila pela luz e culmina na síntese de açúcares primários, utiliza o dióxido de carbono como matéria prima (Taiz, 1998). Por outro lado, todos os organismos heterotróficos obtêm sua energia a partir de reações de oxirredução. A respiração, que se caracteriza pela oxidação de combustíveis orgânicos (produzidos em última instância pela fotossíntese) pelo oxigênio molecular, é o mecanismo pelo qual os organismos aeróbicos obtêm a maior parte de sua energia (Lehninger, 1976). Este mecanismo essencial à vida, além de fonte de energia livre para manutenção, crescimento e desenvolvimento dos organismos, também libera dióxido de carbono (CO₂) para atmosfera.

Dentro do ecossistema florestal, além da respiração da vegetação e dos animais, existe a respiração do solo, como fornecedora de CO₂ para a atmosfera. A fermentação, a respiração aeróbica e a anaeróbica são os três tipos de metabolismos produtores de energia encontrados no solo. Destes, a respiração aeróbica (sempre) e a fermentação (quando produzindo metano ou etanol) liberarão CO₂ para o ambiente (Ross, 1989).

O fluxo de CO₂ do solo é o resultado de processos biológicos através da produção de CO₂ pelo solo (principalmente respiração microbiana e de raízes) e de processos físicos através do transporte de CO₂ da atmosfera (difusividade) (Fang & Moncrieff, 1999). E, portanto, sensível a variação nas características do solo que interfiram nestes processos. Entre estes, destacam-se a umidade e a temperatura do solo, a textura, o pH, o teor de nutrientes e matéria orgânica do solo, a cobertura de liteira¹ e a concentração de CO₂ da atmosfera.

¹ Liteira: conjunto de resíduos orgânicos, predominantemente de origem vegetal (folhas, flores, frutos, gravetos e galhos, etc) que se depositam sobre o solo da floresta (Vieira, 1988)

Umidade e temperatura do solo

Generalizações sobre os efeitos conhecidos das variações no fluxo de CO₂ do solo são complicadas pela interação temperatura-umidade (Howard & Howard, 1993). Tiwari *et al.* (1987) demonstraram que a umidade do solo altera significativamente a população microbiana, sua atividade e a relação entre vários parâmetros. Muitos estudos sobre emissão de CO₂ encontraram relação significativa deste processo com umidade do solo (Rovira 1953, Howard & Howard 1993, Ball & Drake 1997, Sotta 1998, La Scala Jr. *et al.* 2000 Chambers *et al.* 2002 e Vanhala 2002). Tiwari *et al.* (1987) sugerem que a umidade do solo na capacidade de campo parece ser o nível de umidade ótimo para a emissão de CO₂. Entretanto, Howard & Howard (1993) dizem que este nível de umidade seria prejudicial à atividade aeróbica, que é a maior fonte de CO₂ emitido do solo.

Assim como para umidade, alguns estudos (Sotta, 1998; Wagai *et al.*, 1998; Fang & Moncrieff, 2001; Chambers *et al.* 2002) encontraram correlação entre a fluxo de CO₂ e a temperatura do solo. A temperatura do solo tende a ser maior quando a umidade do solo é baixa e vice-versa. Em condições de clima temperado, a razão de fluxo de CO₂ do solo decresce durante a primavera e o verão, aumentando durante o outono (Vanhala, 2002). Em contraste, os estudos de La Scala Jr. *et al.* (2000) em clima tropical e Ball & Drake (1997) em clima temperado não detectaram correlação entre temperatura do solo e fluxo de CO₂ do solo.

Portanto, nem todos os resultados apontam numa mesma direção. Tiwari *et al.* (1987) concluíram que, para solos, dois parâmetros muito relacionados a um determinado nível de umidade podem não mostrar relação em outro nível de umidade. Além disso, deve-se considerar que tais estudos foram conduzidos em condições diversas de clima e com metodologias diferenciadas.

Textura do solo

A textura do solo representa as proporções relativas das frações de areia, silte, argila do solo (Curi *et al.*, 1993). Como os solos diferem em sua composição, é esperado que emissões de CO₂ do solo também difiram de acordo com as propriedades particulares do solo (La Scala Jr. *et al.*, 2000). A textura do solo tem um papel fundamental no estoque de carbono em ecossistemas florestais e tem grande influência na disponibilidade e retenção de nutrientes, particularmente em solos altamente intemperizados (Silver *et al.*, 2000), como ocorre na maior parte dos trópicos.

Quando a umidade do solo está na capacidade de campo, o conteúdo de oxigênio do solo depende inteiramente da proporção de macroporos, e a aeração está geralmente abaixo do ótimo para a respiração aeróbica (Howard & Howard, 1993). A proporção de macroporos, por sua vez, dependerá da textura e estrutura do solo. Desta forma, a textura do solo terá um efeito indireto no fluxo de CO₂ do solo por interferir em propriedades pedológicas que estão diretamente relacionadas a este processo. Por exemplo, num estudo realizado na Floresta Nacional dos Tapajós, foi estimado que o estoque de carbono até 1 m de profundidade é de 113 Mg C ha⁻¹ no solo arenoso enquanto no argiloso é de 101 Mg C ha⁻¹ (Silver, 2000).

Portanto, inúmeros fatores inter-relacionados definem o fluxo de CO₂ do solo, tornando difícil a compreensão deste processo sem uma análise mais completa, dentro de um contexto ecossistêmico.

Nutrientes e pH do solo

La Scala Jr. *et al.* (2000) verificaram que a emissão de CO₂ do solo foi linearmente correlacionada com carbono total, capacidade de troca catiônica e ferro disponível. Para carbono total e capacidade de troca, catiônica a correlação foi positiva, e para o ferro disponível, foi negativa. Além disso, Vanhala (2002) concluiu que, quando a temperatura do

solo foi mantida constante (14°C), a razão do fluxo de CO₂ foi principalmente regulada pelo conteúdo de água e pH do solo.

Liteira e matéria orgânica

A qualidade da matéria orgânica em diferentes tipos de solo é influenciada por fatores como condições hidrotérmicas, composição química da vegetação, composição mineralógica e textura do solo (Howard & Howard, 1993). A razão de decomposição da liteira e matéria orgânica do solo depende do conteúdo de nitrogênio e lignina do material, ou seja, da sua qualidade (Roberts, 2000). Bosatta & Agren (1999) sugerem que qualidade de matéria orgânica é o número de passos (reações) enzimáticos requeridos para que um átomo de carbono de um composto orgânico seja liberado como dióxido de carbono. O tipo de liteira formada e de material orgânico acumulado (ou não) no solo depende diretamente do tipo de cobertura vegetal, que segundo Wagai *et al.* (1998) tem influência no microambiente, biomassa microbiana e biomassa de raízes, as quais juntas controlam o fluxo de CO₂.

Rozenzweig e Hillel (2000) estimam que entre 1400 e 1500 gigatoneladas (Gt) de carbono estão contidos na matéria orgânica do solo em todo o mundo. A matéria orgânica passiva do solo tem uma alta capacidade de estocagem de carbono e o movimento desse reservatório é muito lento (Trumbore, 1995). Portanto, condições que favoreçam o acúmulo deste tipo de matéria orgânica são interessantes sob a ótica de estocagem de carbono.

Vanhala (2002) mostrou que quando o conteúdo de água foi mantido constante (60% da capacidade de campo), a razão de fluxo de CO₂ do solo foi principalmente regulada pela quantidade de matéria orgânica e pelo pH do solo. Outros fatores que podem potencialmente contribuir para uma variação adicional no fluxo de CO₂ do solo entre os diferentes tipos de vegetação, incluem o conteúdo e as frações da matéria orgânica do solo, a biomassa de raízes finas e a biodiversidade das comunidades de plantas e microrganismos (Wagai *et al.*, 1998).

Concentração de CO₂ atmosférico

O aumento da concentração de CO₂ atmosférico pode interferir na respiração do solo (Roberts, 2000). Ball & Drake (1997) encontraram que o aumento da concentração de CO₂ afeta os processos fisiológicos da microbiota do solo, tendo como efeito o aumento do fluxo de CO₂ do solo. Estes autores concluíram que a exposição do ecossistema à elevada concentração de CO₂ resulta em aumento da emissão tanto de CO₂ quanto de CH₄ pelo solo. Bekku *et al.* (1997) ressaltaram que a concentração de CO₂, a qual acelera ou inibe a fluxo de CO₂ microbiana diferirá entre diversos microrganismos de solo e seus ambientes.

Metodologias de medida

Medir o fluxo de CO₂ do solo no campo é de extrema importância para o entendimento da dinâmica do CO₂, entretanto essas medidas são de realização complicada e requerem instrumentação especial (Vanhala, 2002). Medir corretamente a fluxo de CO₂ do solo é essencial para avaliar o seqüestro de carbono do ecossistema terrestre (Yim *et al.*, 2002), e a escolha do método de medição deve considerar a acurácia, resolução das medidas, aplicabilidade e custo do equipamento.

O fluxo de CO₂ oriundo do solo pode ser medido de diversas formas. As técnicas mais comumente usadas para medir efluxo de CO₂ do solo, segundo Le Dantec *et al.* (1999), consiste de câmaras colocadas na superfície do solo para registrar a razão de acúmulo de CO₂ (sistema fechado) ou o fluxo instantâneo de CO₂ (sistema aberto).

Esses sistemas fechados podem ser dinâmicos (utilizando analisador de gás por infravermelho - IRGA) ou estático (utilizando absorção alcalina -NaOH ou analisador de gás por infravermelho -IRGA), os quais se caracterizam pela presença ou ausência de fluxo de ar dentro da câmara, respectivamente. Podem ainda ser sistemas fixos ou móveis. No sistema fixo, a câmara permanece acoplada em um mesmo ponto e as medidas são realizadas sempre no mesmo local, o que causa grandes problemas de efeito câmara.

Existem grandes diferenças na acurácia, aplicabilidade e resolução espacial e temporal entre as metodologias. Entretanto, não existe padrão ou referência para testar a acurácia, e assim consideráveis incertezas caracterizam todos os tipos de medidas (Janssens *et al.*, 2000).

Janssens *et al.* (2000) consideram que fluxo de CO₂ do solo só pode ser medido com acurácia por um sistema que não altere a atividade respiratória do solo, gradiente de concentração de CO₂, e movimento do ar próximo à superfície do solo. Também é necessário evitar a diferença de pressão entre o exterior e interior da câmara (Fang & Moncrieff, 1998a). Entretanto, utilizar uma metodologia que associe todas estas características ainda não é uma realidade. Todas as metodologias atualmente disponíveis apresentam algumas desvantagens. Portanto, a opção é selecionar a metodologia que mais se adeque às condições e realidade em que o estudo será conduzido e tentar minimizar os efeitos negativos.

Problemas associados ao uso de todos os tipos de câmaras incluem a dificuldade de avaliar a variabilidade espacial de fluxos em ecossistemas naturais (Rayment & Jarvis, 2000) assim como, comparar medidas de fluxo por diferentes sistemas de medida (Drewitt *et al.*, 2002). Isto ocorre porque grandes e sistemáticas diferenças entre todos os tipos de técnicas de câmara foram verificadas em vários estudos de comparações metodológicas (Bekku *et al.* 1997, Iritz *et al.* 1997, Fang & Moncrieff 1998b, Le Dantec *et al.* 1999, Janssens *et al.* 2000, Yim *et al.* 2001 e Davidson 2002).

A heterogeneidade espacial das características locais e a variabilidade temporal de fatores afetam a produção e transporte de CO₂ do solo e dificultam modelos ou descrições simples (Rayment & Jarvis, 2000). Devido a alta heterogeneidade espacial, um grande número de pontos amostrais é requerido para obter valores representativos. Entretanto, isso é muito difícil sob condições de campo usando métodos de câmaras (Yim *et al.*, 2002).

Além do efeito câmara que causa muitos problemas para os sistemas fixos, ainda existe a dificuldade, tanto nos sistemas fixos como nos móveis, da manutenção do equilíbrio da pressão dentro e fora da câmara, uma vez que o fluxo de CO₂ é determinado pela

difusividade e o gradiente de concentração de CO₂ entre o solo e a atmosfera (Bekku *et al.*, 1997).

5- MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Localização

O estudo foi conduzido na bacia do rio Cuieiras, Reserva Biológica do Cuieiras, pertencente ao INPA, no km 34 da estrada vicinal ZF-2 que se inicia no km 50 da Rodovia BR-174 (Manaus - Boa Vista). Além da bacia do rio Cuieiras, que compreende 59% da área total (13.414 ha), esta reserva também engloba a bacia do rio Tarumã-Açu compreendendo 41% (9.321 ha) do total da área (Ranzani, 1980).

Clima

O tipo climático é *Am* na classificação de Köppen, o qual é predominante em toda bacia Amazônica. Na área onde este estudo foi desenvolvido, há pouca variação mensal da temperatura do ar, com valores médios entre 24,6 e 26,9 °C (Araújo *et al.*, 2002). A temperatura máxima diária alcança 31,8 °C e a mínima de 22,7 °C, com pouca variação sazonal. O período de novembro a março se caracteriza pela estação chuvosa, e de maio a setembro pela estação seca, sendo abril e outubro os meses de transição entre estações. A precipitação anual é de 2.431mm, com variação mensal entre 95 e 304 mm, para a estação seca e chuvosa respectivamente (Malhi *et al.*, 1998), e umidade relativa variando entre 75% (agosto) e 92% (abril) (Araújo *et al.*, 2002).

Solos

A formação geológica que predomina na área é Alter do Chão, do Cretáceo superior, consistindo de arenitos cauliniticos, argilitos, grauvacas e brechas intraformacionais (Ranzani, 1980).

Os solos do platô, nas partes mais altas da paisagem, são classificados como Latossolo Amarelo álico, textura argilosa, na encosta ocorre o Podzólico Vermelho-Amarelo latossólico, e no baixio se encontra o Podzol álico (Chauvel & Boulet, 1987). Segundo o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, os Latossolos permanecem como LATOSSOLO, entretanto, as classes Podzólico e Podzol, atualmente, são ARGISSOLOS e ESPODOSSOLO, respectivamente (Embrapa, 1999). Nas partes mais baixas da paisagem, e nas margens de igarapés ocorre grande acúmulo de sedimentos (Ribeiro *et al.*, 1999).

Vegetação

O tipo vegetacional é Floresta Ombrófila Densa, caracterizado por fanerófitos, lianas lenhosas e epífitas em abundância, que o diferenciam de outras classes de formações. A principal característica ecológica consiste dos ambientes ombrófilos, que marcam muito bem a “região florística florestal” (Velooso *et al.*, 1991).

Apesar dessa classificação geral, a área de estudo apresenta uma floresta com ambientes diferenciados. Segundo Ribeiro *et al.* (1999), a floresta de terra-firme, termo que se aplica a todas as florestas que não são sazonalmente inundadas pela cheia dos rios, pode ser dividida em quatro tipos:

Floresta de platô, nas áreas mais altas. É a floresta com maior biomassa, com dossel de 35-40 m e muitas árvores emergentes (>45 m), como o angelim (*Dinizia excelsa*). O sub-bosque se caracteriza pela presença de muitas palmeiras acaules (*Attalea attaleoides*, *Astrocaryum sciophilum*).

Floresta de vertente, sobre a paisagem colinosa dissecada. Com dossel atingindo 25-35 m e poucas árvores emergentes, a vertente representa uma zona de transição. Apresentando, entretanto, espécies que só ocorrem neste ambiente.

Floresta de campinarana, entre as áreas de baixio e vertente. Com poucas árvores de grande porte e dossel atingindo 15-25 m. Possui baixa biomassa e diversidade, entretanto, grande acúmulo de serrapilheira. Alta penetração de luz e densidade de epífitas, principalmente sobre indivíduos de macucu (*Aldina heterophylla*), e sub-bosque caracterizado pela alta densidade em arvoretas e arbustos.

Floresta de baixio, nas planícies aluviais ao longo dos igarapés. Com poucas árvores emergentes, o dossel varia de 20 a 35 m. Uma característica marcante é a grande quantidade de raízes superficiais, além de raízes escoras e adventícias. Apresenta muitas palmeiras arbóreas (patauá - *Oenocarpus bataua*, buriti - *Mauritia flexuosa*) e sub-bosque denso com palmeiras acaule (*Attalea microcarpa*) e muitas ervas de áreas encharcadas (Marantaceae e Cyclantaceae).

Topografia

A rede de drenagem é do tipo dendrítico pouco densa, evidenciando-se o caráter arborescente das cabeceiras d'água, onde em conseqüência, o relevo é mais acentuado (Ranzani, 1980). Na área do estudo, a partir do platô onde está localizada uma torre climatológica (K34) até a margem do igarapé, o desnível topográfico é de 40 m (Figura 1).

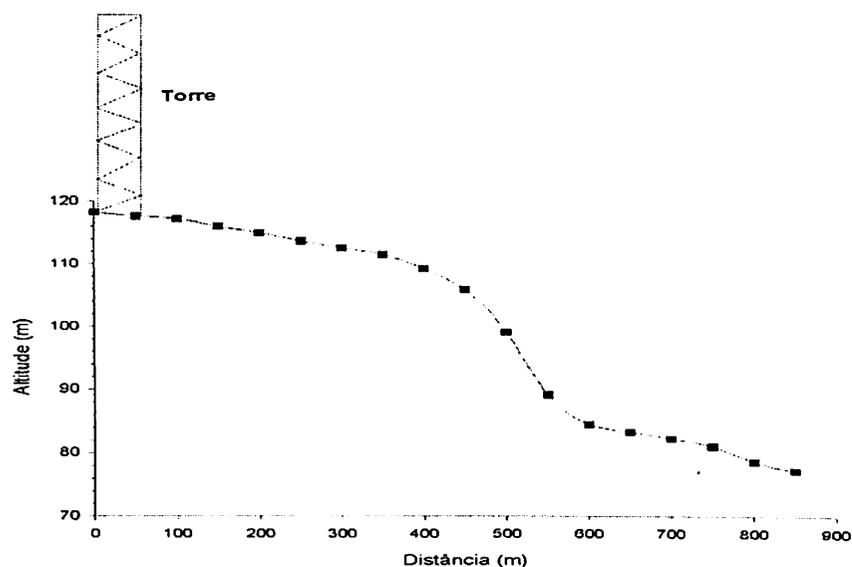


Figura 1: Variação da altitude ao longo do transecto.

Delineamento experimental e amostragem

As medidas e amostragens foram realizadas ao longo de um transecto de 850 m que se inicia na torre, localizada no platô (118,2 m de altitude), e se direciona através da vertente até a margem do igarapé Asu (77,3 m de altitude). Os pontos localizados em altitude superior a 110 m serão considerados pertencentes ao platô, os pontos localizados entre 85 e 110 m foram classificados como vertente e os pontos abaixo de 85 m de altitude foram considerados como pertencentes ao baixio (Figura 1).

Fluxo de CO₂ do solo

As medidas de fluxo de CO₂ foram determinadas *in situ*, semanalmente, a cada 50 m do transecto de 850 m. Objetivando aumentar o número de pontos amostrais na vertente, entre os pontos de 450 e 550 m do transecto as medidas foram realizadas a cada 25 m, totalizando 20 pontos amostrais ao longo de todo transecto. Em cada um dos 20 pontos foram efetuadas três medidas distintas (para gerar uma média) em cada dia de amostragem.

As medidas de fluxo de CO₂ do solo foram realizadas utilizando um analisador de gás por infravermelho portátil (EGM-3, PP Systems, U.K.) conectado a uma câmara de fluxo de CO₂ do solo (SCR-1, PP Systems, U.K.).

Colocando uma câmara fechada de volume conhecido sobre o solo e medindo a razão de aumento da concentração de CO₂ dentro desta câmara, quantificou-se o fluxo de CO₂ do solo. Então, assumindo como um sistema bem fechado, temos:

$$R = \frac{DC}{DT} * \frac{V}{A}$$

Onde:

R - razão de fluxo de CO₂ do solo (fluxo de CO₂/ unidade de área/ unidade de tempo);

DT - tempo decorrido de medida;

DC - é a diferença de concentração de CO₂ no tempo decorrido;

V - volume total do sistema;

A - área do solo exposto à medida.

O equipamento EGM-3 expressa R em g m⁻² h⁻¹. Entretanto, a unidade mais comumente utilizada para medidas de fluxo de CO₂ do solo é μmol m⁻² s⁻¹, para isto multiplicou-se o valor de R do aparelho pelo fator de conversão 6,312. É nesta unidade que os dados obtidos neste estudo serão apresentados.

Para que o equipamento realizasse medidas corretamente foi necessário acoplar a câmara a um anel. Este anel foi cravado, aproximadamente, a 2 cm no solo garantindo a vedação da interface solo-câmara. Objetivando minimizar a morte de raízes no momento em que o anel era pressionado contra o solo, o anel metálico (aço inoxidável) que foi utilizado neste estudo foi especialmente construído com “dentes” atenuando o corte de raízes.

Umidade do solo

A umidade volumétrica do solo foi determinada à 5 cm de profundidade por um sensor (Hydrosense TM, Campbell Scientific Australia Pty. Ltd), que utiliza a condutividade elétrica do solo para estimar o conteúdo de água. As medidas foram obtidas nos mesmos locais e com a mesma frequência que as medidas de fluxo de CO₂ do solo foram realizadas.

Temperatura do solo

O sensor STP-1 (Soil Temperature Probe, PP Systems, U.K.) foi utilizado para determinar a temperatura do solo à 5 cm de profundidade, nos mesmos locais e com a mesma frequência amostral que as medidas de fluxo de CO₂. Este sensor foi utilizado conectado ao EGM-3 (PP Systems, U.K.), no qual os dados podem ser visualizados e armazenados.

Química do solo

As análises químicas do solo foram realizadas 3 vezes durante o período de estudo, abrangendo as duas estações (chuvosa e seca) e o período de transição entre elas, a saber, em 18 de março, 07 de julho e 21 de setembro de 2003.

Além das medidas de fluxo, temperatura e umidade, também foram coletadas amostras de solo para análise. Estas amostras simples foram coletadas de 0 a 5 cm de profundidade nos mesmos pontos em que as medidas de fluxo de CO₂ foram realizadas, e analisadas pela metodologia da EMBRAPA (1997), no Laboratório Temático de Solos e Plantas do INPA.

Estoque de liteira

A amostragem de liteira também foi realizada 3 vezes durante o período de estudo, correspondendo às mesmas datas e pontos de coleta de solo para análise química, utilizando uma moldura de madeira de 20 x 20 cm para cálculos de massa seca pelo método do TSBF (Anderson & Ingram, 1993).

Análise estatística

Para verificar o efeito dos tratamentos (platô, vertente e baixio) e da sazonalidade (variáveis independentes) sobre as estimativas da composição química do solo, massa de liteira e fluxo de CO₂ do solo (variáveis dependentes) foram utilizadas análises de variância com 2 fatores. Quando constatado algum efeito, foi aplicado teste de médias (Tukey), efetuando uma comparação entre as medidas de fluxo de CO₂ do solo dos tratamentos.

Para analisar a relação entre as características do solo e liteira (variáveis independentes) no fluxo de CO₂ do solo (variável dependente) foram utilizadas análises de regressão linear.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o Programa Systat 8.0 (Wilkinson, 1998).

Algumas variáveis foram transformadas, a fim de atender a distribuição normal e conseqüente utilização da estatística paramétrica. Desta forma, os dados de saturação por bases, fósforo disponível, estoque de liteira (folha e total) e umidade volumétrica do solo foram transformados através do logaritmo na base 10. Para cálcio e magnésio trocáveis a melhor transformação foi de raiz quadrada. Para o conjunto de dados de fluxo de CO₂ utilizados nos testes de comparação de médias e nas regressões com temperatura e umidade do solo também foi utilizada a raiz quadrada.

Os dados de fluxo de CO₂ utilizados para as regressões com dados de massa de liteira e características químicas de solo são médias das medidas de fluxo de três datas: do dia da coleta de solo, e das medidas da semana anterior e posterior á coleta. Estes dados de fluxo de CO₂ apresentaram distribuição normal, não necessitando de transformação.

Ajustes metodológicos para o EGM-3

Algumas medidas preliminares foram realizadas com a finalidade de testar o novo equipamento e a metodologia. É importante ressaltar que todas as medidas foram realizadas

no platô e bem próximas umas das outras. Nestes testes (Figura 2), os valores obtidos de fluxo de CO₂ eram muito altos (em média 9,4 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) quando comparados aos valores encontrados por Sotta (1998) e Chambers *et al.* (2002) (médias de 6,86 e 3,2 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectivamente), que desenvolveram seus estudos em áreas próximas ao do atual estudo (todos na mesma Reserva).

Comparando as medidas de concentração de CO₂ (ppm) feitas pelo EGM-3 com as de outros dois analisadores de gás por infravermelho, LI-6400 e Gashound (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA), pode-se observar que as medidas eram coerentes, confirmando que o problema não era relacionado ao analisador de gás por infravermelho.

Para testar se o problema poderia ser com a câmara, J. Chambers (comunicação pessoal) recomendou realizar medidas com o ventilador desligado, sugerindo que o ventilador, embutido na câmara, poderia ser a causa dos altos valores medidos e de fato, sem o ventilador, os valores baixaram significativamente (média dos valores positivos: 2,58 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (Figura 2), porém, algumas medidas apresentaram valores negativos.

Acreditando que os valores negativos eram resultantes da ausência de ventilação no momento em que o equipamento estava sendo calibrado, foi instalado um interruptor ao ventilador permitindo ligá-lo na hora de calibrar o equipamento e desligá-lo no momento da medição. As medidas obtidas deixaram de apresentar valores negativos e permaneceram baixas (média de 2,54 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (Figura 2).

Le Dantec *et al.* (1999) compararam a velocidade de ventilação dentro das câmaras SRC-1 (PP System, UK) e LI-6000-09 (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) a 1 cm de altura do solo e encontraram valores de 0,9 e 0,4 m s⁻¹, respectivamente. Os mesmos autores verificaram que o efluxo de CO₂ do solo medido em um mesmo ponto decresceu rapidamente com a velocidade do vento dentro da câmara SRC-1 até aproximadamente 0,4 m s⁻¹. Abaixo deste valor, a velocidade do vento não afetou fortemente o efluxo de CO₂ do solo. Neste mesmo estudo outros testes foram realizados e os autores concluíram que somente a diferença

de velocidade do vento ocorrendo dentro da câmara de fluxo de CO₂ do solo é consistente com as diferenças nas medidas de efluxo de CO₂ do solo.

Os mesmos autores registraram um decréscimo das medidas de efluxo de CO₂ feitas num mesmo local com o tempo na câmara SRC-1 porque a alta velocidade do vento dentro desta câmara causou uma exaustão inicial do CO₂ acumulado nos poros do solo. Das medidas feitas a campo, houve uma relação altamente significativa dos fluxos medidos pelos dois métodos, mas o fluxo de CO₂ medido pela PPsystems foi 49% maiores do que os registrados pelo sistema LI-COR, sugerindo que a ausência de turbulência dentro da câmara, em um sistema estático fechado, pode acarretar baixas estimativas de efluxo de CO₂, confirmando as medidas realizadas nos testes com o ventilador desligado.

Então, alguns testes foram realizados testando o fluxo medido pelo EGM-3 quando diferentes resistências eram aplicadas a corrente do ventilador da câmara, através do uso de um potenciômetro (Figura 3). Todas as medidas deste teste foram realizadas nas manhãs dos dias 24 e 25 de janeiro de 2003.

Desta forma, visando minimizar erros e tornar os dados comparáveis com estudos feitos em outros locais, a velocidade de ventilação dentro da câmara SRC-1 do aparelho que foi utilizado neste estudo, foi reduzida para aproximadamente 0,4 m s⁻¹, conforme recomendado por Le Dantec *et al.* (1999), através da utilização de um potenciômetro ligado em série ao ventilador. Com este ajuste, a média do fluxo de CO₂ no platô foi de 5,6 μmol CO₂ m⁻² S⁻¹ (Figura 3).

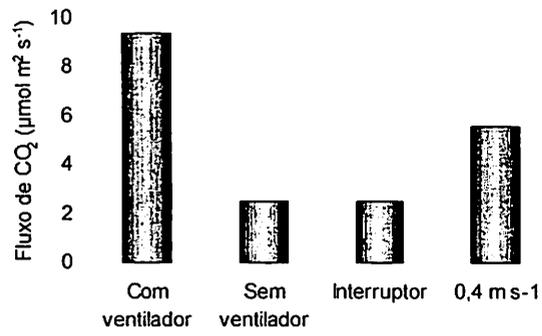


Figura 2: Média do fluxo de CO₂ dos testes para ajuste da câmara SCR-1.

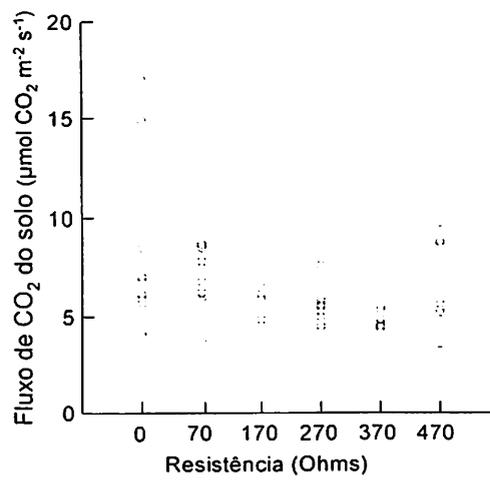


Figura 3: Variação do fluxo de CO₂ do solo em diferentes níveis de resistência aplicadas ao ventilador da câmara.

5- RESULTADOS

Caracterização do solo

De um modo geral, as propriedades químicas do solo apresentaram grande variabilidade (Figuras 4, 5 e 6) com diferenças significativas tanto entre estações do ano como entre posições topográficas (Tabelas 1, 2 e 3), mostrando que existe efeito sazonal e espacial sobre as variáveis avaliadas.

Carbono, nitrogênio e relação C:N

A maior concentração de **carbono** da estação chuvosa foi verificada no solo de platô (Tabela 1), diferindo significativamente ($F=4,80$; $p<0,05$) dos solos da vertente. No período de transição chuvosa-seca não foi detectado efeito da topografia sobre o conteúdo de carbono. Na estação seca, o solo de baixio apresentou conteúdo significativamente ($F=5,42$; $p<0,05$) maior de C do que as demais posições do gradiente topográfico. O conteúdo de carbono do solo de platô foi maior ($F=12,37$; $p<0,05$) na estação chuvosa. Os percentuais de carbono das estações chuvosa e seca, para o solo de vertente, foram similares e maiores ($F=19,96$; $p<0,005$) que as do período de transição chuvosa-seca. Para o solo de baixio não foi verificado efeito sazonal.

Os conteúdos de **nitrogênio** no solo (Tabela 1, Figura 4) do baixio e da vertente, na estação chuvosa, foram similares entre si, e significativamente ($F=10,21$; $p<0,01$) menores que no solo do platô. No período de transição chuvosa-seca não houve diferença significativa para o percentual de N entre as posições topográficas. Entretanto, na estação seca, foi verificado significativo ($F=7,51$; $p<0,05$) maior teor de N na vertente do que nas demais posições topográficas. Para os solos do platô, as maiores concentrações de nitrogênio foram observadas nas estações chuvosa e seca, similares entre si. Na vertente e no baixio os maiores

conteúdos de nitrogênio foram obtidos na estação seca ($F= 101,03$ e $F=8,84$, respectivamente; $p<0,05$).

Ao longo da estação chuvosa, a **relação C:N** observada no solo do baixio foi significativamente ($F=4,61$; $p<0,05$) maior que na vertente. Para as demais estações não foi verificada diferença entre posições topográficas. Os solos de platô apresentaram relação C:N significativamente ($F=18,30$; $p<0,05$) menores na estação seca. Entretanto, não foi evidenciado efeito sazonal na relação C:N para os solos das posições topográficas vertente e baixio.

Tabela 1: Diferença entre médias para C, N e relação C:N do solo.

Variável	Posição topográfica	Estação		
		Chuvosa	Transição chuvosa/seca	Seca
C (%)	Platô	3,79 Aa	2,45 Ba	3,09 Bb
	Vertente	2,51 Ab	1,41 Ba	3,17 Ab
	Baixio	3,41 Aab	2,48 Aa	3,94 Aa
N (%)	Platô	0,23 Aa	0,14 Ba	0,22 Ab
	Vertente	0,15 Bb	0,08 Ca	0,27 Aa
	Baixio	0,16 Bb	0,12 Ba	0,24 Aab
Relação C/N	Platô	17,76 Aab	17,72 Aa	14,37 Ba
	Vertente	16,53 Ab	17,31 Aa	13,24 Aa
	Baixio	20,33 Aa	20,19 Aa	16,51 Aa

Médias seguidas de mesma letra (maiúscula entre colunas e minúscula entre linhas) não diferem estatística pelo teste Tukey ($p<0,05$).

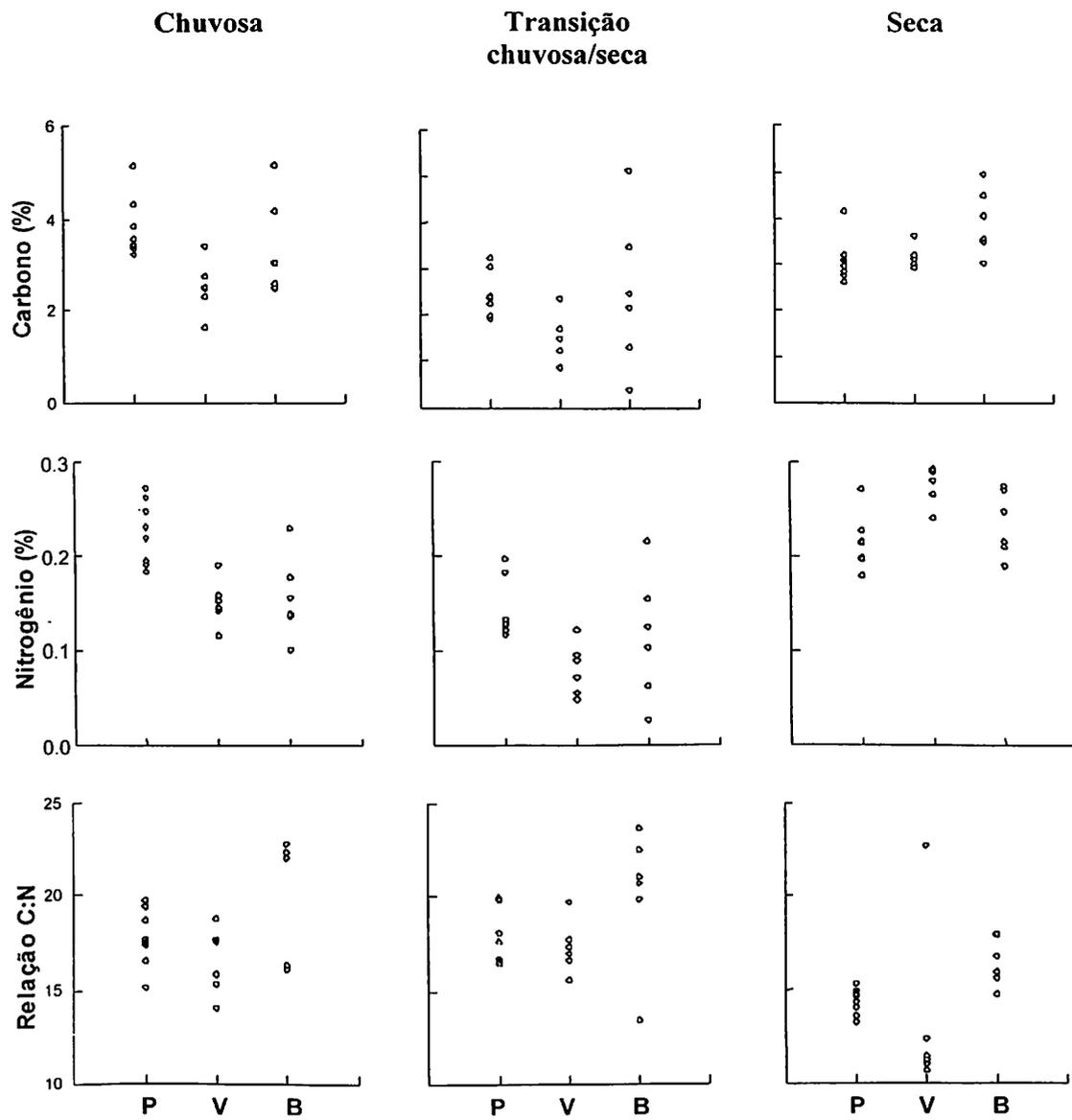


Figura 4: Variação dos conteúdos de C, N e relação C:N do solo, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo) e estações do ano (n = 20).

Outros macronutrientes do solo

Para **Ca trocável**, a diferença entre posições topográficas foi verificada dentro das estações chuvosa e seca (Tabela 2, Figura 5). Na estação chuvosa, o solo do baixio apresentou conteúdo significativamente ($F=3,94$; $p<0,05$) maior de Ca, do que o do platô. Entretanto, na estação seca, o solo de platô apresentou conteúdo de Ca significativamente ($F=5,14$; $p<0,05$) maior do que o solo da vertente, mas similar ao do baixio. Não foi detectado efeito sazonal sobre o cálcio para os solos do platô e do baixio. O solo da vertente, porém teve maior ($F=20,05$; $p<0,005$) teor de cálcio trocável na estação chuvosa.

Não foram verificadas diferenças entre posições topográficas para o conteúdo de **Mg trocável** nas estações chuvosa e no período de transição chuvosa-seca (Figura 5). Mas, na estação seca, o teor de Mg trocável do solo de platô foi significativamente ($F=5,57$; $p<0,05$) maior que o conteúdo medido nos solos da vertente. Para os solos de platô, as maiores quantidades de Mg foram medidas na estações chuvosa e seca. Entretanto, nos solos da vertente, a maior quantidade de Mg ocorreu na estação chuvosa, diferindo significativamente da seca ($F=40,20$; $p<0,05$) e da transição chuvosa-seca ($F=40,20$; $p<0,001$), que teve o menor conteúdo de Mg.

As maiores medidas de **K trocável** (Tabela 2, Figura 5) ocorreram nos solos de platô, diferindo significativamente das demais posições topográficas nas estações chuvosa ($F=6,56$; $p<0,05$) e transição chuvosa-seca ($F=8,43$; $p,0,05$). Na estação seca, porém, o conteúdo de K do solo do platô e do baixio foram similares e significativamente ($F=11,61$; $p<0,01$) maiores que a vertente. Os solos de platô e vertente apresentaram os maiores teores de K na estação chuvosa, enquanto no baixio não houve diferença significativa entre chuvosa e seca, que apresentaram os maiores valores.

Para o conteúdo de **P disponível** (Tabela 2, Figura 5), os solos do baixio apresentaram teores significativamente maiores na estação chuvosa e período de transição chuvosa-seca ($F=11,46$ e $F=70,27$; $p<0,005$). Na estação seca foram observados os menores conteúdos de P

disponível (Figura 2), sem diferença significativa entre as posições topográficas. O conteúdo de P dos solos de platô e da vertente apresentaram concentrações significativamente maiores na estação chuvosa ($F=27,88$ e $F=43,22$; $p<0,001$). Os solos de baixio, porém apresentaram quantidades similares nas estações chuvosa e transição chuvosa-seca, ambas significativamente maiores ($F=26,55$; $p<0,001$) do que o medido na estação seca.

Tabela 2: Diferença entre médias do conteúdo de macronutrientes.

Variável	Posição topográfica	Estação		
		Chuvosa	Transição chuvosa/seca	Seca
Ca trocável** (Cmol _c kg ⁻¹ solo)	Platô	0,052 Ab	0,033 Aa	0,055 Aa
	Vertente	0,055 Aab	0,020 Ba	0,009 Bb
	Baixio	0,091 Aa	0,052 Aa	0,034 Aab
Mg trocável** (Cmol _c kg ⁻¹ solo)	Platô	0,143 Aa	0,057 Ba	0,114 Aa
	Vertente	0,109 Aa	0,028 Ca	0,074 Bb
	Baixio	0,191 Aa	0,080 Aa	0,094 Aab
K trocável (Cmol _c kg ⁻¹ solo)	Platô	0,098 Aa	0,070 Ba	0,054 Ca
	Vertente	0,070 Ab	0,045 Bb	0,020 Cb
	Baixio	0,074 Ab	0,042 Bb	0,044 ABa
P disponível* (ppm)	Platô	3,71 Ab	1,74 Bb	1,23 Ba
	Vertente	3,44 Ab	1,41 Bb	1,04 Ba
	Baixio	6,92 Aa	4,93 Aa	1,30 Ba

Médias seguidas de mesma letra (maiúscula entre colunas e minúscula entre linhas) não diferem estatística pelo teste Tukey ($p<0,05$). * Na análise estatística os valores foram transformados através do logaritmo na base 10. ** Na análise estatística os valores foram transformados pela raiz quadrada.

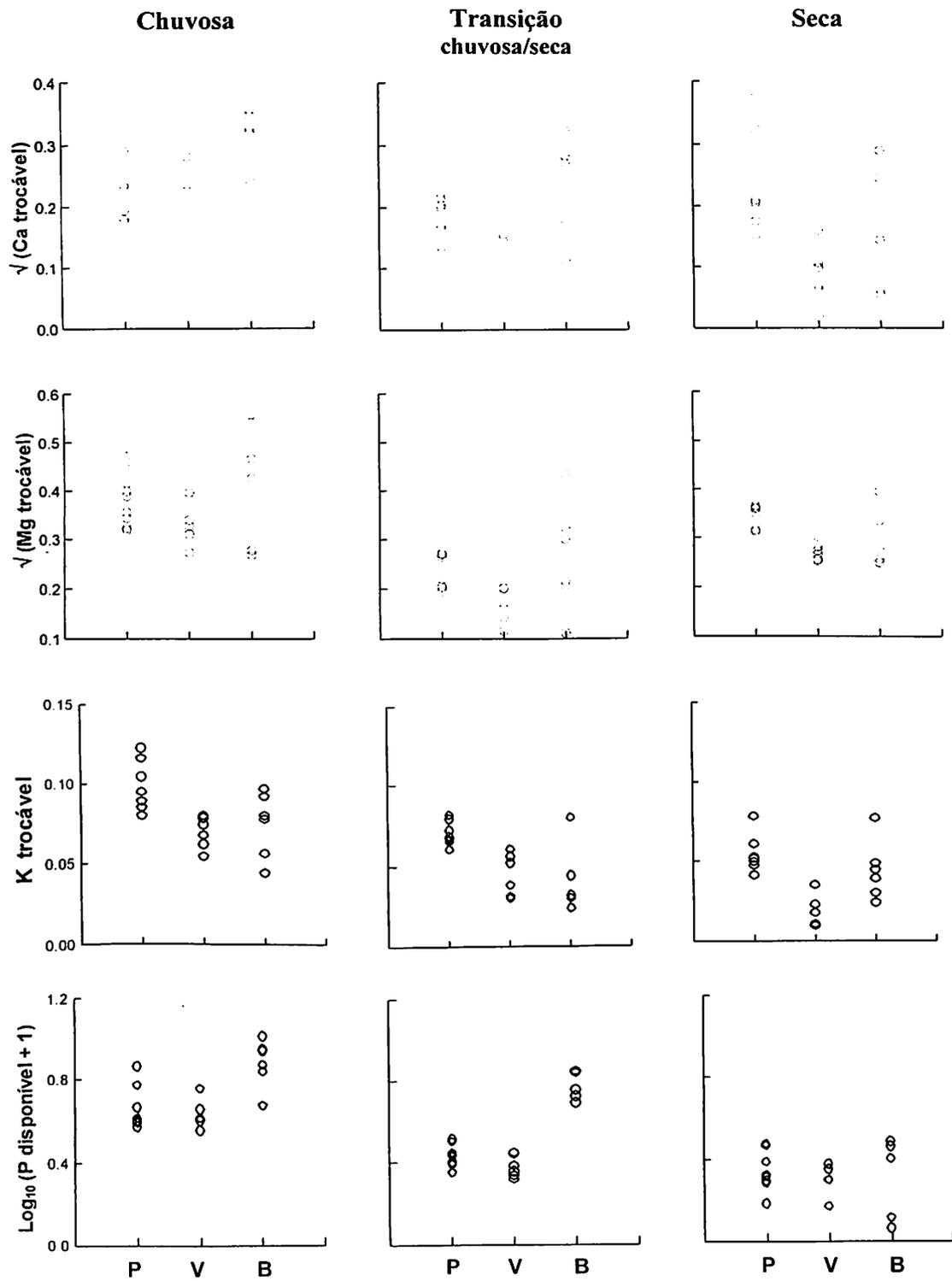


Figura 5: Variação nos conteúdos de Ca, Mg e K trocáveis e do P disponível do solo, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo) e estações do ano (n = 20).

Acidez, pH e saturação por bases

Como pode ser observado na Tabela 3 e Figura 6, o **pH do solo** da posição topográfica baixo foi significativamente maior que as do platô em todas as três estações ($F=4,01$, $F=23,20$ e $F=6,36$, $p<0,05$, para chuvosa, transição chuvosa-seca e seca, respectivamente). O solo da vertente apresentou pH intermediário entre platô e baixo na estação chuvosa, e nas demais estações foram similares ao observado no platô. Não foi detectado efeito sazonal sobre o pH do solo medido no baixo. Entretanto, no platô ($F=5,40$; $p<0,05$) e na vertente ($F=4,64$; $p<0,05$), o pH do solo foi significativamente maior na estação seca do que no período de transição entre as estações chuvosa e seca.

Não houve efeito sazonal sobre a **acidez potencial** ($Al + H$ trocáveis) do solo de nenhuma das três posições topográficas. No entanto, dentro das três estações avaliadas foi observado que a acidez do solo do platô foi significativamente maior que a do baixo ($F=6,57$, $F=10,59$ e $F=15,73$; $p<0,05$, respectivamente, para chuvosa, transição chuvosa-seca e seca). O solo da vertente apresentou acidez intermediária na estação chuvosa, apresentou teor de acidez similar ao do baixo no período de transição chuvosa-seca, enquanto na estação seca, apresentou conteúdo de acidez potencial similar ao medido no platô.

O percentual de **saturação por bases** (Tabela 3, Figura 6) no solo do baixo apresentou valores maiores em todas as estações ($F=5,89$, $F=13,59$ e $F=8,49$; $p<0,05$, respectivamente, para chuvosa, transição chuvosa-seca e seca) com valores similares ao encontrado para o platô na estação seca, e ao da vertente na estação chuvosa. Não houve efeito sazonal na saturação por bases entre as medidas feitas nos solos do baixo. Entretanto, nos solos do platô, os maiores percentuais de saturação por bases foram observados nas estações chuvosa e seca, as quais foram similares entre si e significativamente ($F=7,84$; $p<0,05$) diferentes da saturação por bases observada no período de transição chuvosa-seca. Nos solos da vertente, a percentagem de saturação por bases medida na estação chuvosa foi

significativamente ($F=17,28$; $p<0,005$) maior do que os percentuais medidos nas outras estações.

Tabela 3: Diferença entre médias do valor de pH, teor de acidez potencial e percentual de saturação por bases.

Variável	Posição topográfica	Estação		
		Chuvosa	Transição chuvosa-seca	Seca
pH do solo	Platô	3,96 ABb	3,86 Bb	4,11 Ab
	Vertente	4,08 ABab	3,93 Bb	4,17Ab
	Baixio	4,27 Aa	4,29 Aa	4,44 Aa
Acidez potencial (Cmol. Al + H kg ⁻¹ solo)	Platô	2,20 Aa	2,02 Aa	1,75 Aa
	Vertente	1,58 Aab	1,41 Ab	1,41Aa
	Baixio	1,35 Ab	0,97Ab	0,92 Ab
Saturação por bases* (%)	Platô	11,56 Ab	7,61 Bb	11,18 Aa
	Vertente	13,36 Aab	6,2 Bb	6,97 Bb
	Baixio	21,05 Aa	14,45 Aa	15,24 Aa

Médias seguidas de mesma letra (maiúscula entre colunas e minúscula entre linhas) não diferem estatística pelo teste Tukey ($p<0,05$). * Na análise estatística os valores foram transformados através do logaritmo na base 10.

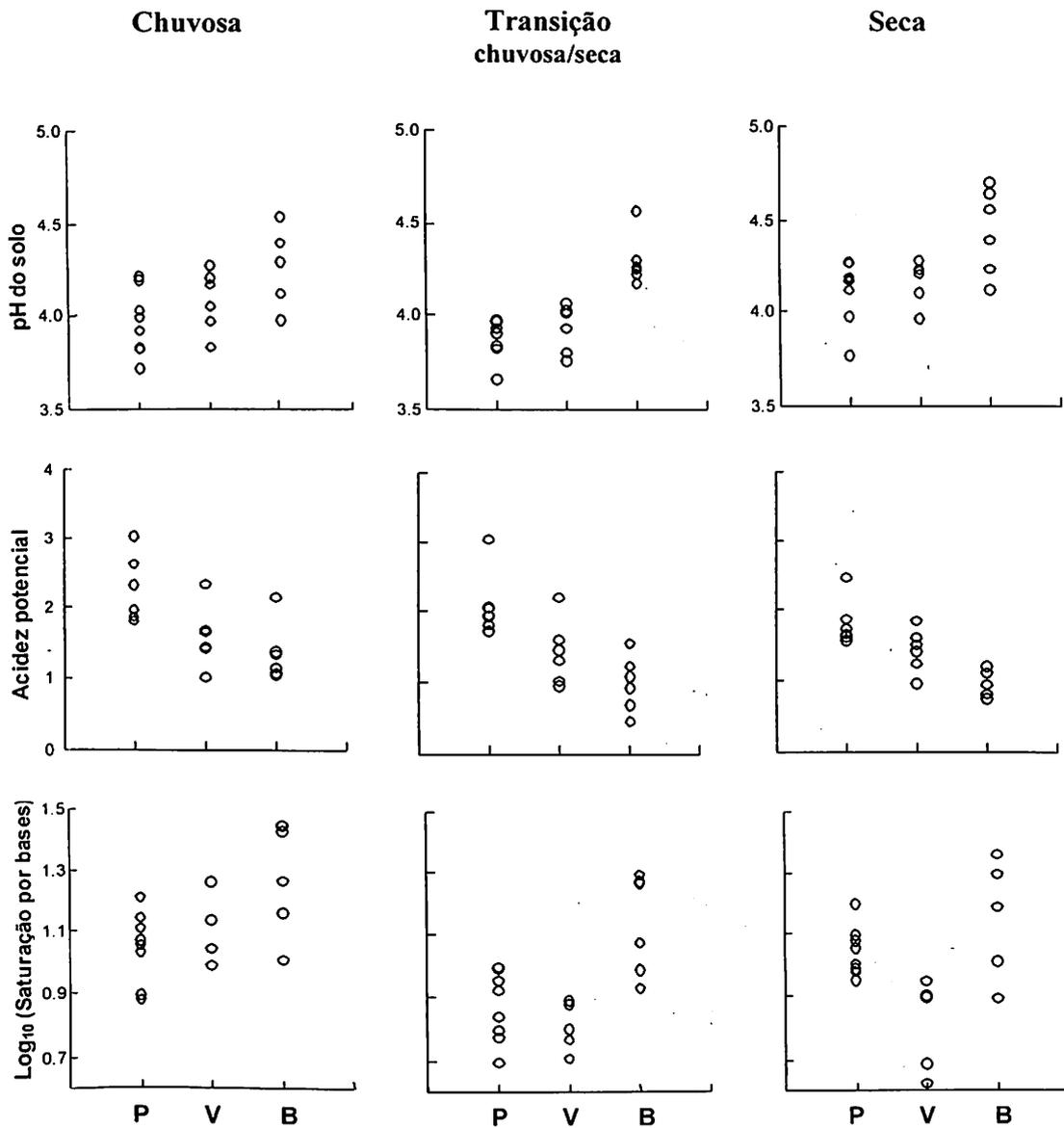


Figura 6: Variação do pH, acidez potencial e do percentual de saturação por bases do solo, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixio) e estações do ano (n = 20).

Gradiente textural

Existe grande variação no conteúdo de argila e areia, o qual está intrinsecamente relacionado à altitude (Figura 7). O menor valor registrado foi 1,5% de argila no solo do baixo, e a maior foi 73,8% nos solos de platô. O conteúdo de areia apresentou comportamento inverso ao da argila, e o silte quase não apresentou variação mantendo-se, em torno de 1% ao longo de todo o gradiente topográfico.

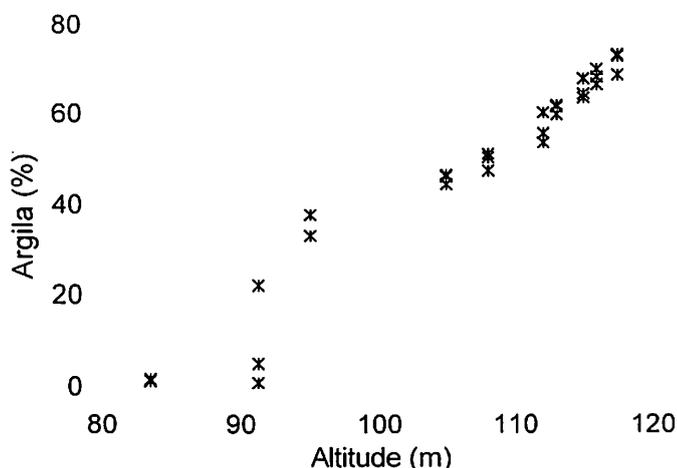


Figura 7: Variação do conteúdo de argila em função da altitude ao longo do transecto.

Caracterização do estoque de liteira

O maior **estoque de liteira fina** (massa de folha) depositado sob o solo (Tabela 4, Figura 8), foi encontrado na vertente, na estação seca, cujo valor diferiu estatisticamente ($F=10,07$; $p<0,05$) das outras duas posições do gradiente topográfico, platô e baixo. A vertente, na estação seca, também apresentou estoque de liteira significativamente ($F=15,60$; $p<0,005$) maior do que o medido nas outras estações (chuvosa e transição chuvosa-seca).

O estoque de **liteira total** (folha + galhos) apresentou o mesmo comportamento sazonal que o estoque de folhas, ou seja, apenas a vertente apresentou diferença entre as estações, com maior estoque obtido na estação seca ($F=10,01$; $p<0,05$). Entretanto, a comparação feita entre as posições topográficas dentro de cada estação, mostrou que houve maior acúmulo de liteira no baixo e na vertente durante a estação seca (Tabela 4, Figura 8), os quais foram similares entre si, porém diferentes do acumulado no platô ($F=10,50$; $p<0,05$).

Tabela 4: Diferença entre médias do estoque de liteira acumulada sob o solo.

Variável	Posição topográfica	Estação		
		Chuvosa	Transição chuvosa/seca	Seca
Massa liteira folhas*	Platô	187 Aa	166 Aa	192 Ab
	Vertente	182 Ba	208 Ba	306 Aa
	Baixio	235 Aa	193 Aa	216 Ab
Massa liteira total*	Platô	289 Aa	321 Aa	297 Ab
	Vertente	254 Ba	306 Ba	421 Aa
	Baixio	327 Aa	274 Aa	411 Aa

Médias seguidas de mesma letra (maiúscula entre colunas e minúscula entre linhas) não diferem estatística pelo teste Tukey ($p < 0,05$). * Na análise estatística os valores foram transformados através do logaritmo na base 10.

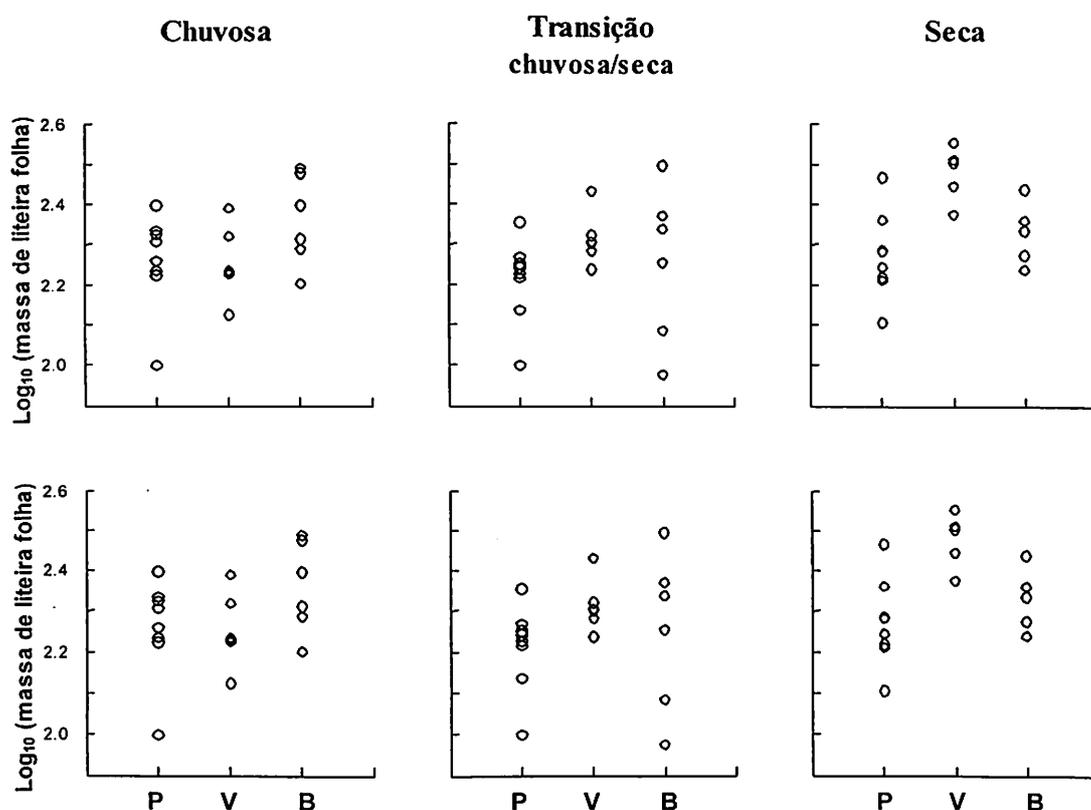


Figura 8: Variação do estoque de liteira de folhas e total, nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixio) e estações do ano (n = 20).

Fluxo de CO₂ do solo

Influência da sazonalidade

Não foi verificada diferença significativa da média do fluxo de CO₂ do solo entre as medidas realizadas nas estações chuvosa e seca. As análises dos dados separados por posição topográfica (Tabela 5, Figura 9), mostraram que o fluxo de CO₂ do solo do platô e da vertente não apresentaram influência sazonal. Entretanto, para o solo de baixio houve influência sazonal com fluxo significativamente maior ($F=6,45$; $p<0,05$) na estação seca.

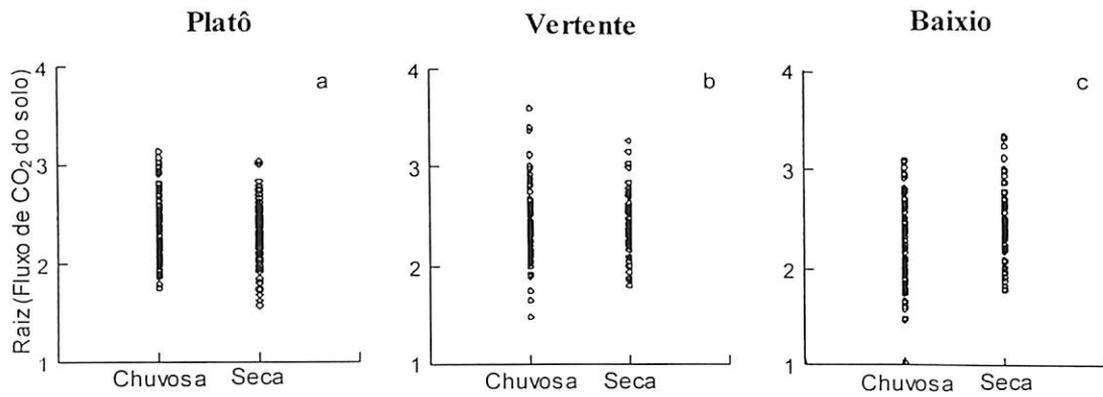


Figura 9: Variação sazonal no fluxo de CO₂ do solo, nas diferentes posições topográficas: (a) Platô, (b) Vertente e (c) baixo.

Influência da variação topográfica

A análise dos fluxos de CO₂ independentemente da estação do ano (todos os dados) mostrou diferença significativa entre as posições topográficas ($F=4,902$; $p<0,01$) (Tabela 5, Figura 10). O fluxo foi significativamente maior no solo da vertente do que no solo do platô ($p<0,01$), enquanto o baixo apresentou um fluxo de CO₂ intermediário. Na estação chuvosa, o solo do baixo produziu menores fluxos ($F=4,155$; $p<0,05$), do que o solo da vertente ($p<0,05$), que continuou produzindo os maiores fluxos. Na estação seca ocorreu um padrão inverso e maiores fluxos de CO₂ foram produzidos pelo solo do baixo e da vertente, similares entre si, mas sendo ambos significativamente diferentes dos fluxos medidos no solo do platô ($F=6.639$; $p<0,05$).

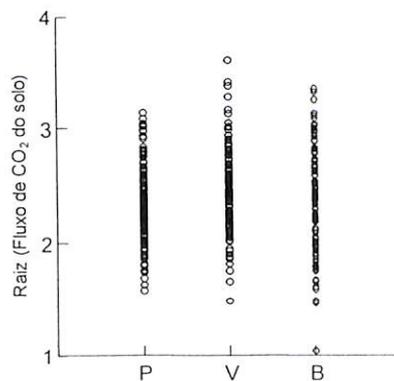


Figura 10: Fluxo de CO₂ do solo nas diferentes posições topográficas (P = Platô, V = Vertente e B = Baixo).

Tabela 5: Diferença entre médias do fluxo de CO₂ do solo emitido nas diferentes posições e estações.

Posição topográfica	Estação		Média
	Chuvosa	Seca	
Platô	5,64 Aab	5,30 Ab	5,49 b
Vertente	6,13 Aa	6,02 Aa	6,11 a
Baixio	5,43 Bb	6,24 Aa	5,78 ab
Média	5,74 A	5,80 A	5,77

Médias seguidas de mesma letra (maiúscula entre colunas e minúscula entre linhas) não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05).

Influência da umidade do solo

De um modo geral todas as relações entre o fluxo de CO₂ do solo e umidade volumétrica foram inversamente proporcionais e apresentaram baixo coeficiente de determinação (r^2).

a- Por estação

Houve relação entre o fluxo de CO₂ do solo e umidade volumétrica tanto na estação chuvosa (p<0,001) (Figura 11a), como na seca (p<0,01) (Figura 11b), mas embora ambas fossem altamente significativas, o coeficiente de determinação foi muito baixo ($r^2=0,070$ e $r^2=0,046$, respectivamente).

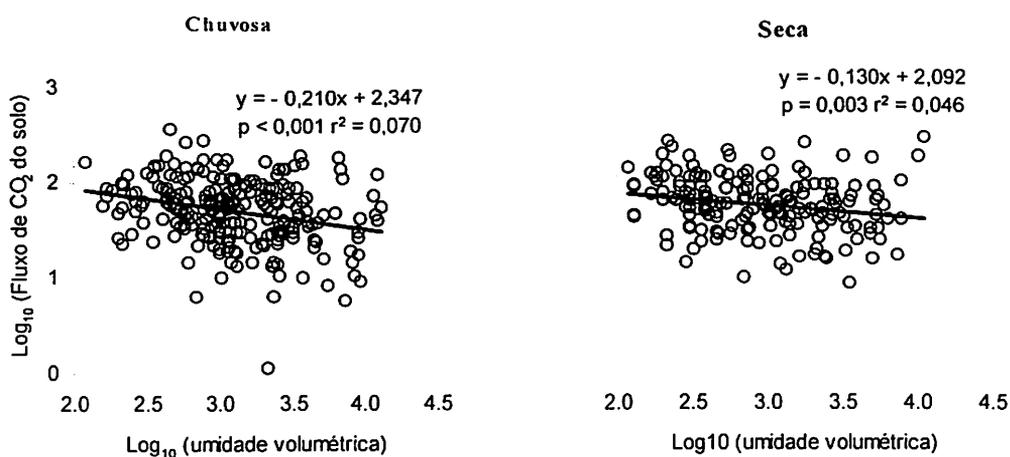


Figura 11: Relação entre o fluxo de CO₂ e a umidade volumétrica do solo por estação.

b- Por posição topográfica

Houve relação significativa entre o fluxo de CO₂ e a umidade volumétrica do solo na vertente ($p < 0,05$) (Figura 12a) e no baixio ($p < 0,01$) (Figura 12b), embora também com baixo coeficiente de determinação ($r^2 = 0,044$ e $r^2 = 0,083$ respectivamente).

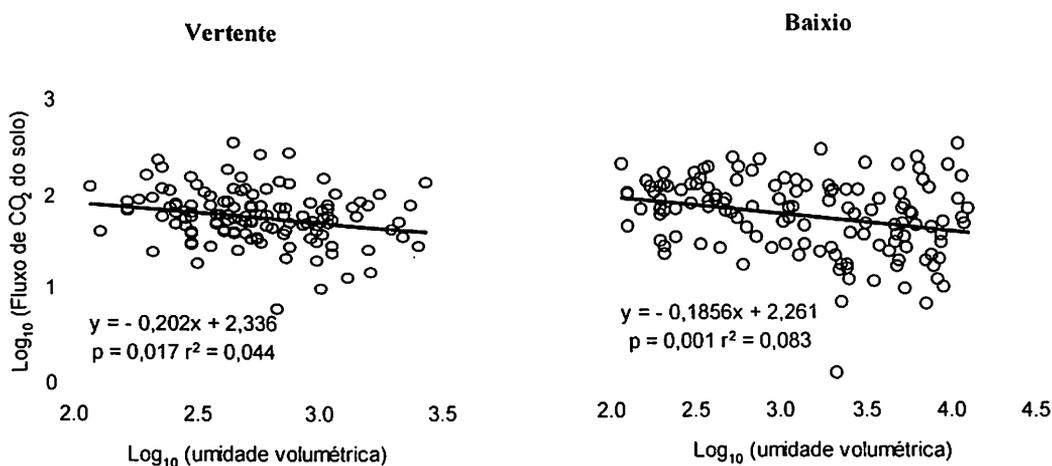


Figura 12: Relação entre o fluxo de CO₂ e a umidade gravimétrica do solo por posição topográfica.

Quando os dados de umidade volumétrica foram cruzados para avaliar a influência da interação estação e posição topográfica sobre os fluxos de CO₂ do solo, a relação foi significativa apenas para o baixio dentro da estação chuvosa ($p < 0,01$, $r^2 = 0,102$) (Figura 13b).

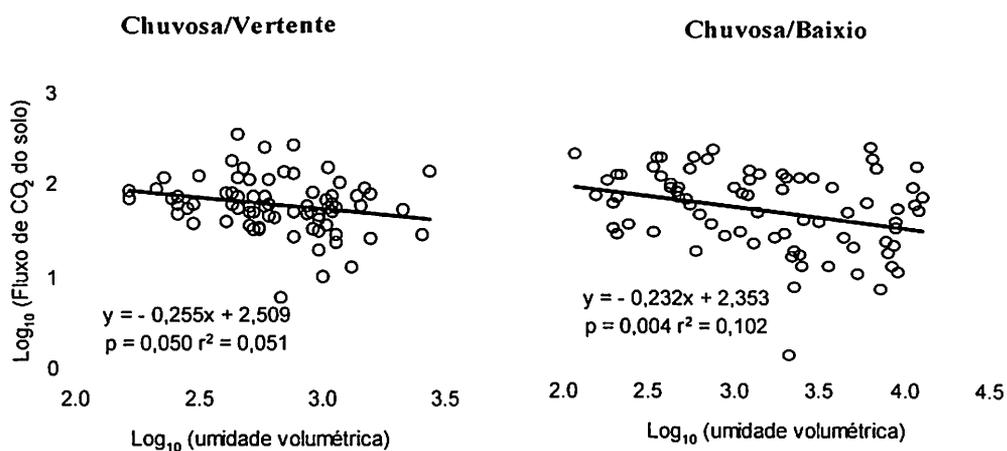


Figura 13: Relação entre o fluxo de CO₂ e umidade gravimétrica do solo para vertente e baixio durante a estação chuvosa.

Influência da temperatura do solo

De um modo geral, as relações entre o fluxo de CO₂ e temperatura do solo foram diretamente proporcionais, diferindo das relações entre o fluxo de CO₂ e umidade gravimétrica do solo. Entretanto, tal como ocorreu para a umidade, as relações do fluxo de CO₂ com a temperatura do solo também apresentaram baixo coeficiente de determinação.

a- Por estação

A relação entre fluxo de CO₂ e temperatura do solo foi significativa na estação chuvosa ($p < 0,01$, $r^2 = 0,038$) (Figura 14). Na estação seca não foi verificada nenhuma relação significativa.

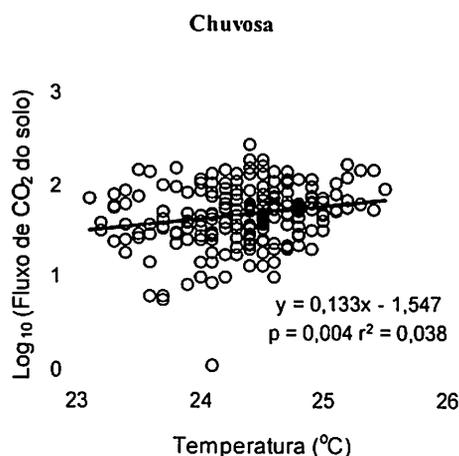


Figura 14: Relação entre o fluxo de CO₂ e temperatura do solo na estação chuvosa.

b- Por posição topográfica

Houve relação significativa entre o fluxo de CO₂ e temperatura do solo na vertente ($p < 0,01$) (Figura 15a) e no baixio ($p < 0,05$) (Figura 15b), com $r^2 = 0,071$ e $0,057$ respectivamente. No platô não foi observada nenhuma relação significativa.

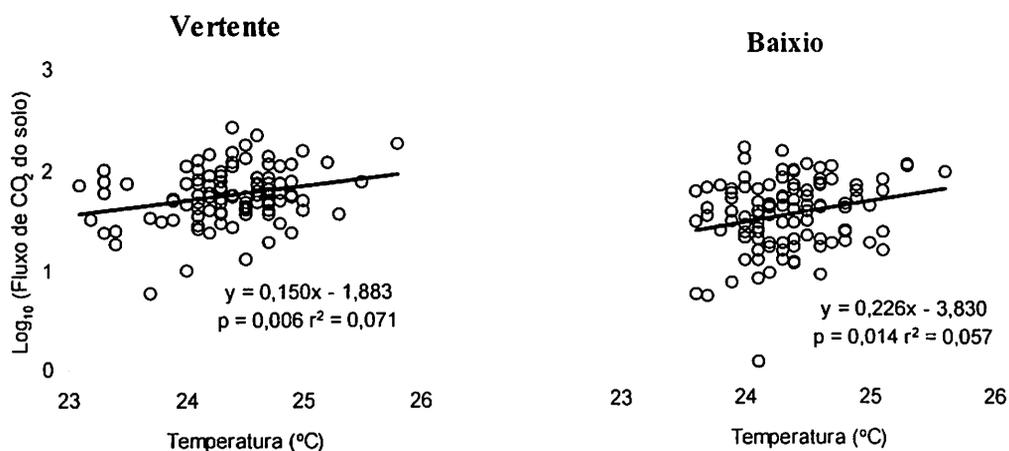


Figura 15: Relação entre o fluxo de CO₂ e temperatura do solo por posição topográfica.

Quando os dados foram analisados por estação e posição topográfica (Figura 16), ocorreu o mesmo padrão observado para a umidade volumétrica do solo, evidenciando

relações significativas nos solos da vertente ($p < 0,05$) (Figura 16a) e do baixio ($p < 0,01$) (Figura 16b) na estação chuvosa, com $r^2 = 0,089$ e $0,112$, respectivamente.

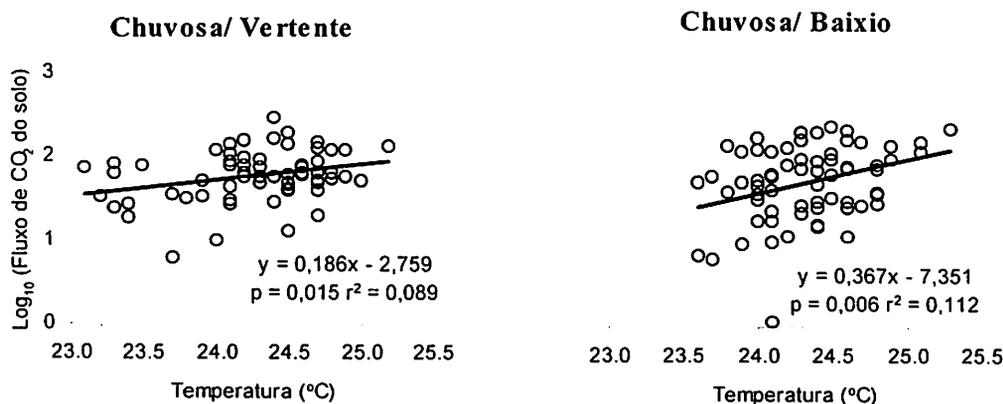


Figura 16: Relação entre o fluxo de CO_2 e temperatura do solo na vertente e baixio, dentro da estação chuvosa.

Influência do estoque de liteira e propriedades químicas do solo

As análises de regressão entre fluxo de CO_2 e todas as características do solo medidas (porcentagem de C e N, e relação C:N, Ca, Mg, K trocáveis, P disponível, pH, acidez potencial, porcentagem de saturação por bases) e do estoque de liteira (massa de liteira total e de folhas) foram realizadas de duas formas: dentro de cada estação (independente da posição topográfica) e dentro de cada posição topográfica (independente da estação). Não foram realizadas regressões para os dados por posição topográfica e estação, pois o número de dados seria insuficiente.

a- Por estação

Na estação chuvosa foi verificada relação significativa entre o fluxo de CO_2 do solo e o pH ($p < 0,01$; $r^2 = 0,469$), Ca trocável ($p < 0,05$ $r^2 = 0,213$) e saturação por bases ($p < 0,01$; $r^2 = 0,351$) (Figuras 17a, 17b e 17c respectivamente). Na transição chuvosa-seca, houve relação significativa entre o fluxo de CO_2 do solo e pH ($p = 0,050$; $r^2 = 0,197$) e P disponível ($p < 0,05$;

$r^2=0,227$), respectivamente Figuras 18a e 18b. Na estação seca, foi observada a relação do fluxo de CO_2 apenas com o conteúdo de Ca trocável do solo ($p<0,05$; $r^2=0,259$) (Figura 19).

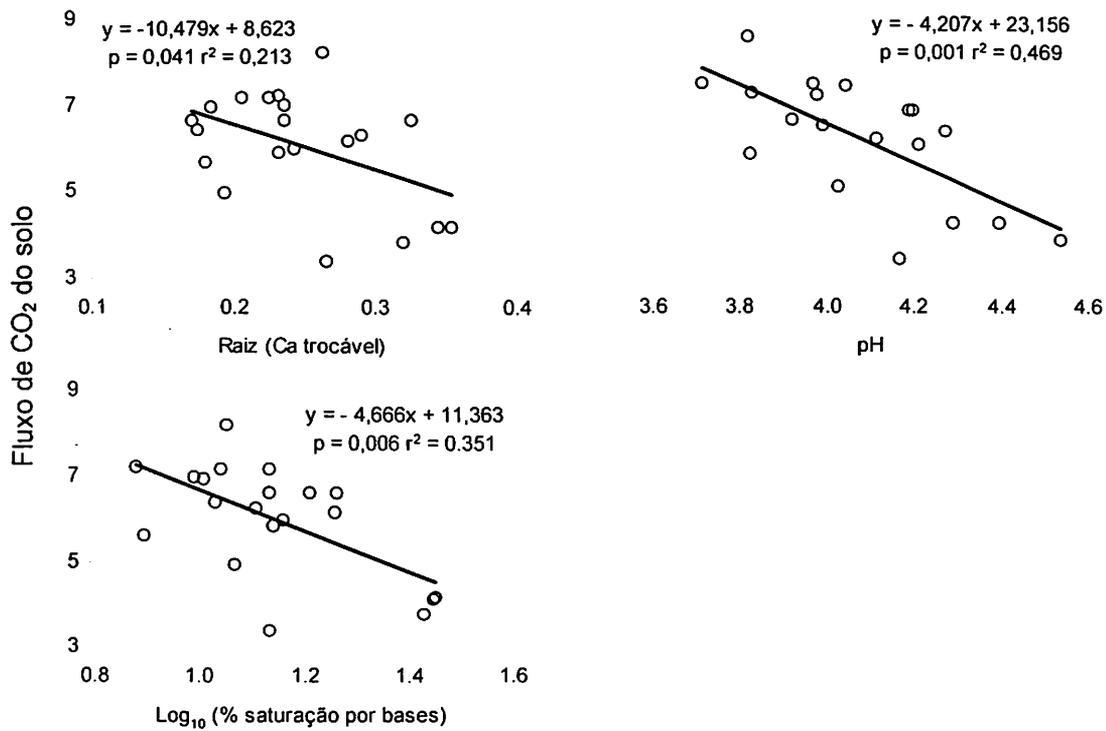


Figura 17: Relações entre fluxo de CO_2 do solo e Ca trocável (a), pH (b) e percentual de saturação por bases (c), na estação chuvosa.

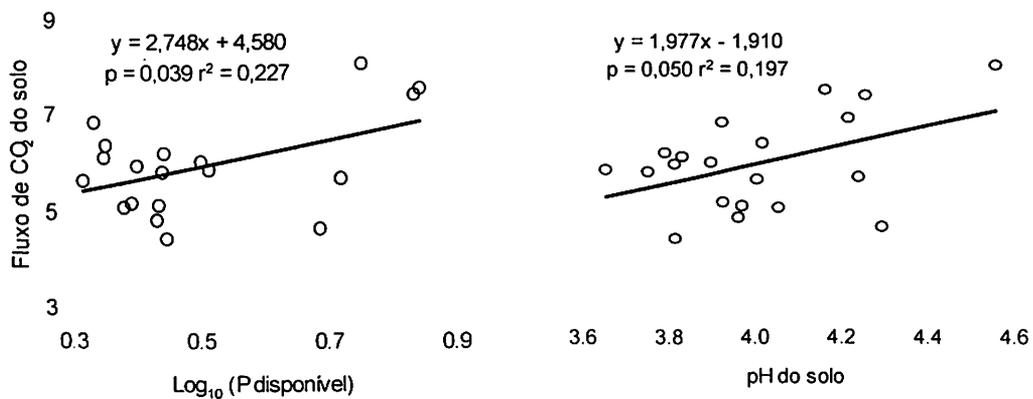


Figura 18: Relações entre fluxo de CO_2 do solo e P disponível (a) e pH (b), no período de transição chuvosa-seca.

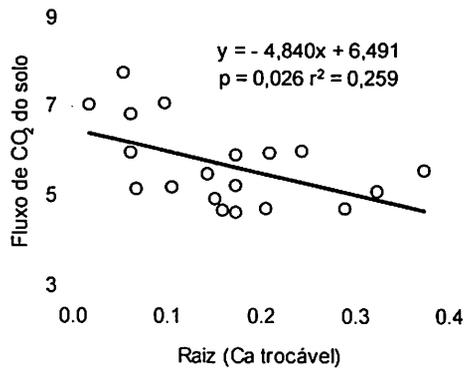


Figura 19: Relação entre fluxo de CO₂ e conteúdo de Ca trocável do solo, na estação seca.

b- Por posição topográfica

No solo do platô foi verificada relação significativa entre fluxo de CO₂ do solo e o conteúdo de C ($p < 0,01$; $r^2 = 0,373$), N ($p < 0,05$; $r^2 = 0,175$) e relação C:N ($p < 0,05$; $r^2 = 0,228$) (Figuras 20a, 20b e 20c, respectivamente).

Na Figura 21, pode-se observar relações entre fluxo de CO₂ do solo e Mg trocável ($p < 0,05$; $r^2 = 0,171$) (a), k trocável ($p < 0,001$; $r^2 = 0,489$) (b), P disponível ($p < 0,001$; $r^2 = 0,518$) (c) e acidez potencial ($p < 0,01$; $r^2 = 0,281$) (d).

Entre as relações significativas observadas no platô, o melhor coeficiente de determinação foi verificado entre o fluxo de CO₂ do solo e o conteúdo de P disponível ($r^2 = 0,518$), e a relação mais fraca foi estabelecida entre o fluxo de CO₂ e o teor de Mg trocável ($r^2 = 0,171$).

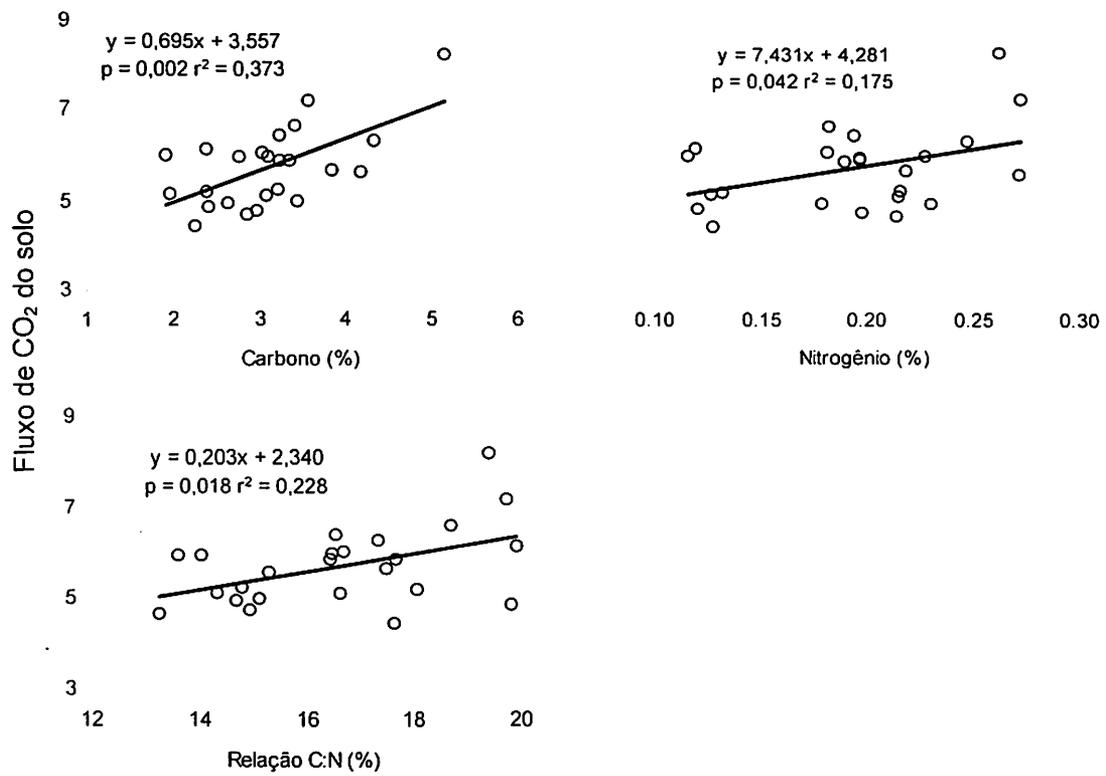


Figura 20: Relações entre fluxo de CO₂ e percentual de C (a), percentual de N (b) e relação C:N (c) no solo do platô.

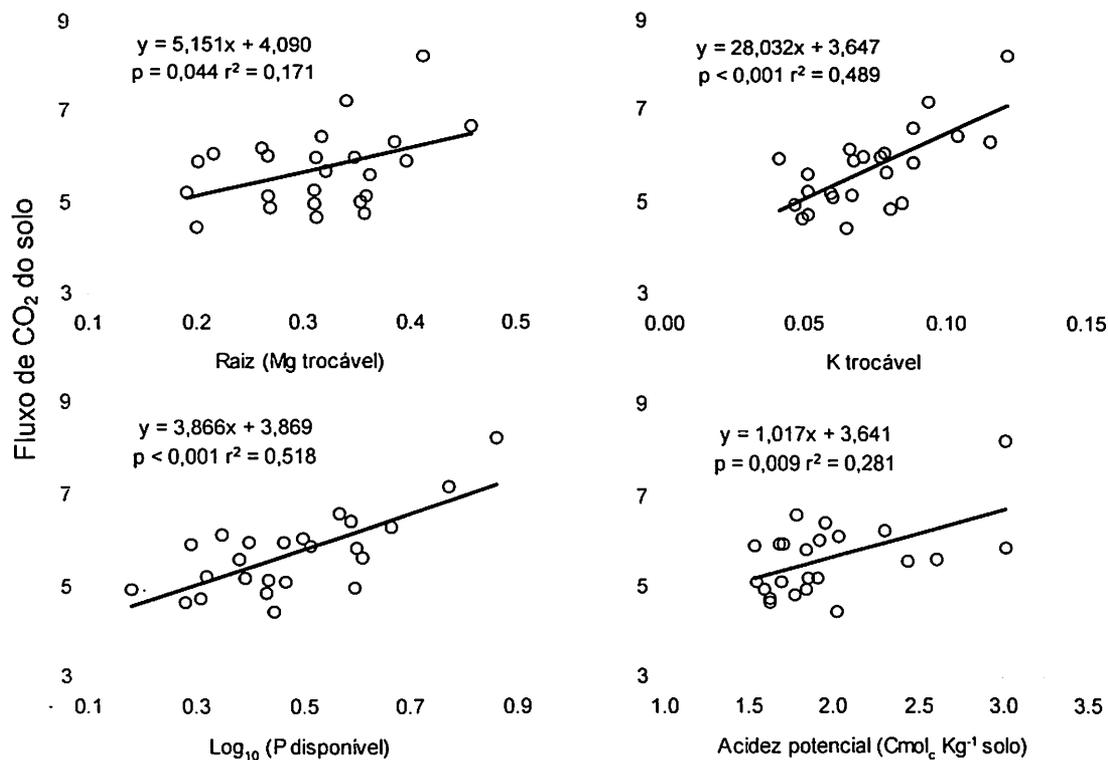


Figura 21: Relações entre fluxo de CO₂ e Mg trocável (a), K trocável (b), P disponível (c) e acidez potencial (d) no solo do platô.

Nos solos do baixio houve relação significativa entre o fluxo e a massa de liteira de folha ($p < 0,05$; $r^2 = 0,263$), Ca trocável ($p < 0,05$; $r^2 = 0,271$), e porcentagem de saturação por bases ($p < 0,05$; $r^2 = 0,364$) (Figuras 22a, 22b e 22c respectivamente). A relação mais forte obtida nos solos do baixio foi entre o fluxo de CO₂ do solo e o percentual de saturação por bases. Ainda no baixio, a relação com o teor de K trocável apresentou um valor de p marginal ($p = 0,054$), com $r^2 = 0,226$.

Para o solo da vertente não foi detectada nenhuma relação significativa ($p > 0,05$).

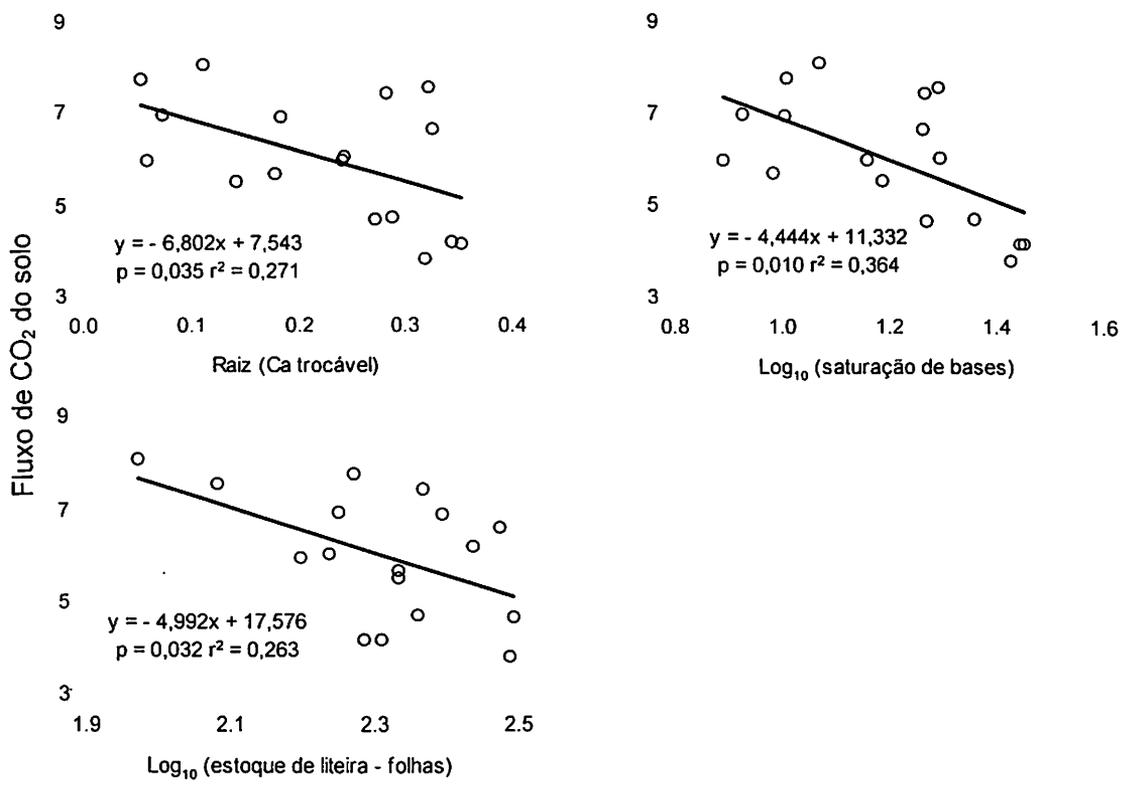


Figura 22: Relações entre fluxo de CO₂ e Ca trocável (a), percentual de saturação por bases (b) do solo e massa de liteira (c), no solo do baixo.

6- DISCUSSÃO

Solos e liteira

A determinação do conteúdo de nutrientes, do pH, acidez potencial, da textura do solo e do estoque de liteira serviu para caracterizar o solo do ambiente onde o estudo foi desenvolvido, gerando as bases para as interpretações dos resultados. Além disso, serviu ainda, para estabelecer relações destas propriedades com o fluxo de CO₂ do solo apresentados a seguir.

Solos

No estudo realizado por Luizão *et al.* (2004), a maior relação C:N da liteira foi obtida no baixio, o mesmo padrão foi evidenciado para a relação C:N do solo no presente estudo, indicando a baixa qualidade da matéria orgânica destes locais. A análise dos conteúdos de C e N do solo tanto por posição topográfica como por estação do ano indicam a ocorrência de lixiviação destes nutrientes na estação chuvosa ao longo da vertente e baixio, quando apresentaram menores valores, seguida de uma aparente estabilização de seus conteúdos no período de transição chuvosa-seca (quando provavelmente a lixiviação atingiu o platô, e esta posição topográfica apresentou os menores percentuais de C e N). Finalmente, na estação seca, a situação é reversa e o solo do baixio acumula mais C e N, como consequência da menor precipitação pluvial. As menores concentrações de C e N observadas no período de transição chuvosa-seca foram consequência das freqüentes chuvas ao longo de toda a estação chuvosa anterior, que pode ter carregado estes nutrientes para o igarapé (Luizão *et al.*, 2004).

A baixa disponibilidade de nutrientes do solo observada neste estudo já é conhecida e registrada para solos tropicais (Ranzani, 1980; Chauvel & Boulet, 1987; Primavesi, 1999; Fearnside & Leal Filho, 2001). Em geral, os solos do baixio apresentaram maior disponibilidade de nutrientes, refletido nos maiores percentuais de saturação por bases. Esses maiores valores podem ser uma consequência do processo de lixiviação ocorrido nas posições

superiores do relevo, da menor acidez dos solos do baixio e do acúmulo de material orgânico nas áreas mais baixas. Os solos do platô são os mais ácidos, que foi verificado tanto pela acidez potencial, como pelos valores de pH, indicando que esta acidez é gerada por íons livres de H^+ e Al^{+3} , em conjunto (Brady, 1989). As propriedades químicas do solo neste estudo foram similares aquelas medidas por Luizão *et al.* (2004) na mesma área de estudo, utilizando outro delineamento experimental.

A textura do solo é uma característica física que exerce grande influência nas demais características físicas, químicas e biológicas do solo, principalmente em solos muito intemperizados como os da bacia amazônica. Na área de estudo, foi verificada grande variação da textura do solo, partindo de um solo muito argiloso (senso Lemos & Santos, 1984) no platô (73,8% de argila), passando por uma gradativa redução do conteúdo de argila ao longo da vertente (textura média), com uma abrupta redução logo no início do baixio (9,4%, textura arenosa), diminuindo até 1,5 % de argila na margem do igarapé. Essa grande variação do conteúdo de argila implica em mudanças, por exemplo, na dinâmica e estocagem de carbono, como demonstrado por Silver *et al.* (2000). Estes autores encontraram relação significativa entre o conteúdo de argila e vários parâmetros químicos, físicos e biológicos do solo, em estudo realizado na Floresta Nacional do Tapajós (Santarém, PA).

Liteira

De um modo geral, o maior estoque de liteira ocorreu na época seca, fato conhecido na região (Luizão & Schubart, 1987). O maior estoque de liteira total na vertente, quando comparado às outras posições topográficas pode ser explicado pela influência conjunta da sazonalidade e da maior incidência solar nestas áreas (propiciada pela declividade), o que parece ter favorecido a maior eficiência fotossintética da vegetação desta posição topográfica.

Fluxo de CO₂ do solo

A comparação dos fluxos de CO₂ obtidos no presente estudo com outras medidas de fluxo de CO₂ do solo realizadas na Amazônia, mostrou uma grande variação nas medidas desse fluxo (Tabela 6). O fluxo de CO₂ médio registrado neste estudo (5,76 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) foi muito similar ao obtido por Meir *et al.* (1996), e próximo ao observado por Trumbore *et al.* (1995). Entretanto, foi maior que o fluxo de CO₂ medido por Chambers *et al.* (2002) e inferior ao verificado por Sotta (1998). Apesar de a média do fluxo de CO₂ obtida neste estudo ser maior do que o verificado por Chambers *et al.* (2002), Rayment (2000) observou que medidas feitas com a câmara SRC-1, subestima o valor real do fluxo em torno de 10%.

Assim como em outros estudos, ocorreu uma grande variação no fluxo de CO₂ do solo, com os menores fluxos registrados no solo do baixo (1,07 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) e os maiores registrados no solo da vertente (12,94 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), ambos durante a estação chuvosa.

Tabela 6: Valor médio do fluxo de CO₂ do solo e metodologias utilizadas em outros estudos conduzidos na Amazônia (modificado de Sotta, 1998).

Autor	Local	Média μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	Metodologia
Coutinho & Lamberti, 1971	Barcelos, AM	7,64	Solução KOH 0,5 N
Martins & Matthes, 1978	Manaus, AM	3,8	Solução KOH 0,5 N
Medina <i>et al.</i> 1980	San Carlos, Venezuela	7,2	Solução KOH 0,5 N
Kepler <i>et al.</i> , 1990	Manaus, AM	4,7	IRGA- Câmara estática
Trumbore et al, 1995	Paragominas, PA	6,1	IRGA- Câmara dinâmica ¹
Meir <i>et al.</i> , 1996	Reserva Jarú, RO	5,8	IRGA- Câmara dinâmica ¹
Sotta, 1998	Manaus, AM	6,86	IRGA- Câmara dinâmica ²
Chambers <i>et al.</i> , 2002	Manaus, AM	3,2	IRGA- Câmara dinâmica ¹
Presente estudo	Manaus, AM	5,76	IRGA- Câmara dinâmica ³

¹ sistema fechado; ² Sistema aberto; ³ Sistema fechado com ventilação

A metodologia utilizada nos três primeiros estudos da Tabela 6 é considerada ultrapassada, e praticamente sem uso atualmente. Entretanto, mesmo observando apenas os

estudos em que IRGAs foram utilizados, continua existindo grande variação na média dos fluxos medidos do solo. Isto pode ser explicado pela diferenciação no tipo de IRGA e tipo de câmara que cada estudo utilizou, e este fator exerce grande influência sobre as estimativas do fluxo de CO₂, conforme detalhado na seção “Metodologias de medida”. Além disso, os estudos foram realizados em locais e anos diferentes, o que cria condições espaço-temporais suficientemente peculiares, capazes de gerar medidas distintas, uma vez que, para fluxo de CO₂ do solo, pequenas distâncias e fatores micro-climáticos são suficientes para causar grandes variações nos fluxos medidos (La Scalla Jr *et al.*, 2000).

a - Influência sazonal – o efeito da água

Na região amazônica, a sazonalidade é demarcada pelo regime de precipitação pluvial (Sioli, 1991). Com a grande variação entre os extremos dos meses de maior (junho) e menor precipitação (setembro), também ocorre uma grande mudança nos processos e ciclos dentro da floresta. Entre estes, ocorrem alterações nas características químicas, físicas e biológicas do solo (Tiwari, 1987 e Primavesi, 1999), e conseqüentemente, nas variáveis influenciadas por essas propriedades.

Uma das características diretamente afetada pelo regime sazonal é a umidade do solo. Como o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas (EMBRAPA, 1999), os poros formados pela organização tridimensional da fase sólida oferecem espaço para acomodar as fases líquida e gasosa. Entretanto, o espaço que a fase líquida pode ocupar é inversamente proporcional ao espaço disponível para a fase gasosa (Brady, 1989; Pereira & Cruciani, 2001).

Desta forma, o alto conteúdo de água do solo interferirá no fluxo de CO₂ do solo, tanto através de um efeito físico de real impedimento à passagem do CO₂ até atingir a interface solo-atmosfera, como também através da redução da atividade respiratória aeróbica, que é a principal responsável pela produção de CO₂ nos solos (Ross, 1989). O baixo fluxo de CO₂ do

solo, em medidas realizadas após eventos de chuva, registrado por Sotta (1998), pode estar relacionada com este efeito.

No presente estudo, a redução na média do fluxo dos solos do baixio na época chuvosa, refletiu claramente o efeito do preenchimento dos poros e redução da atividade aeróbica. Este processo também contribuiu para diminuir a taxa de decomposição, propiciando o acúmulo de carbono em formas mais estáveis do material orgânico. Com a chegada da época seca (menor precipitação) e conseqüente escoamento da água, as condições se tornam bastante favoráveis à atividade aeróbica do solo. Assim, no baixio a grande quantidade de matéria orgânica acumulada e maior disponibilidade de nutrientes quando comparados às outras posições do relevo (platô e vertente), parece ter causado uma rápida explosão microbiana e o rápido desenvolvimento radicular nas plantas, resultando nas maiores medidas de fluxo de CO₂ na época seca. Nessa estação, a redução da umidade do solo e o aumento da temperatura do solo são condizentes com os dados de regressão que mostram uma relação inversa entre o fluxo de CO₂ e a umidade, e uma relação diretamente proporcional entre o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo. Desta maneira, a ocorrência de eventos, como o El Niño, que promovem o prolongamento do período de seca pode acarretar maior emissão de CO₂ pelos baixios, aumentando a emissão de CO₂ para a atmosfera, e diminuindo o estoque de carbono no ecossistema solo no baixio.

A ausência de sazonalidade nos fluxos de CO₂ do solo do platô e da vertente indica que solos destas porções da topografia não sofreram estresse por água (excesso ou escassez) durante o período de medidas, ou que, se algum dos componentes ou mecanismos que perfazem o fluxo foi afetado pela redução da precipitação na época seca, este foi compensado de alguma outra maneira.

No estudo desenvolvido por Trumbore *et al.* (1995) em Paragominas (Pará), o menor fluxo foi medido na época seca, diferindo do observado neste estudo. Entretanto, estes autores não trabalharam em um gradiente topográfico, e neste estudo, o fluxo de CO₂ medido na

estação seca sob solo do platô foram mais baixos do que as medidas da estação chuvosa, mas não diferiram estatisticamente.

b – Influência topográfica (espacial) – o efeito da textura e vegetação

O maior fluxo de CO₂ foi verificado nos solos da vertente (6,113 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) em contraste com Chambers *et al.* (2002), que encontraram maiores fluxos nos solos do platô (\cong 3.8 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). Os maiores fluxos na vertente parecem refletir as melhores condições físicas, no que se refere à dinâmica da água destes solos. A textura argilo-arenosa entre o platô e o baixio e sua melhor drenagem após eventos de chuva no declive, contribuíram para ter os macroporos livres de água. Como a água necessária às plantas e biota do solo é aquela encontrada nos microporos, e este solo ainda mantém conteúdo de argila significativa e estrutura suficiente para garantir a manutenção de água nos microporos, a rápida liberação da água livre cria ambiente propício à atividade aeróbica. Além disso, as áreas de vertente neste estudo recebem mais luz solar causada pelo declive, e têm conteúdo mais alto de C nas folhas do dossel de suas árvores (Luizão *et al.* 2004).

A análise dos fluxos de CO₂ do solo por estação (chuvosa e seca), mostrou que na época seca o solo do baixio, sem limitação causada pelo encharcamento, apresentou valores de fluxo similares aos do platô. Outra importante informação é que os pontos de coleta no transecto foram classificados em platô, vertente e baixio, levando em consideração apenas a variação topográfica. Entretanto, neste transecto, entre a vertente e o baixio, existe uma floresta de campinarana, e os pontos de medida que se encontravam nesta porção da paisagem apresentaram as médias de fluxo de CO₂ mais altas que o restante dos pontos de medida do baixio (Figura 23). Estes altos fluxos na campinarana devem-se ao fato de que este tipo florestal é caracterizado por árvores que têm folhas coriáceas com alta relação C:N (baixa decomposição), como o macucu (*Aldina heterophylla*), formando uma espessa camada de material orgânico sobre a superfície do solo, onde se forma um manto de raízes (Anderson,

1981; Guillaumet, 1987; Ribeiro *et al.*, 1999). Além disso, o tipo de vegetação de campinarana é bem característico, e como demonstrado por Raich & Schlesinger (1992), existe uma relação muito próxima entre o fluxo de CO₂ do solo e o tipo de vegetação sobre este.

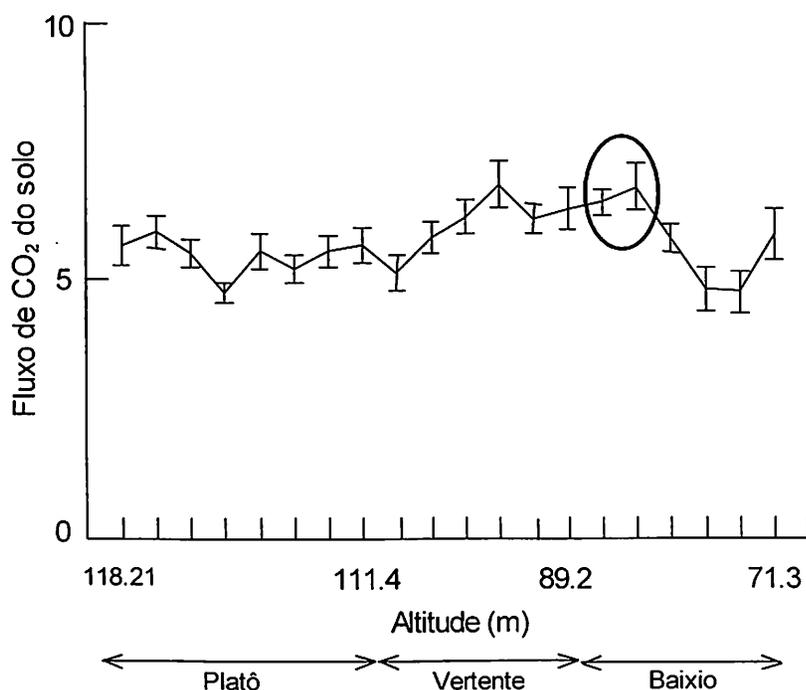


Figura 23: Variação no fluxo de CO₂ do solo ao longo do gradiente topográfico. Os pontos circundados referem-se aos pontos amostrais situados na área de campinarana. Barras verticais indicam o erro padrão.

Estes resultados mostram que para estabelecer uma estimativa anual do fluxo de CO₂ de solo na Amazônia é necessário considerar o número de meses dentro de cada estação (seca e chuvosa) e a variação do relevo. Além disso, seriam necessários estudos de fluxo que enfocassem o tipo de vegetação, que está diretamente ligado ao tipo de solo sob o qual se encontram, incluindo áreas de campina e campinarana.

Solos com diferentes graus de declividade podem apresentar padrões muito distintos de fluxo de CO₂ (Kang *et al.*, 2003). Como este estudo foi conduzido apenas em uma área de vertente, a extrapolação dos resultados deve ser evitada.

Relação entre o fluxo de CO₂ e a umidade do solo

A umidade exerce grande influência na emissão de gases do solo, conforme demonstrado neste estudo e por muitos outros autores (Rovira, 1953; Tiwari *et al.*, 1987; Howard & Howard, 1993; Ball & Drake, 1997; Sotta, 1998; Mielnick & Dugas, 2000; Chambers *et al.*, 2002; Vanhala, 2002; Kang *et al.*, 2003),

Neste estudo, diferente dos resultados obtidos por La Scala Jr *et al.* (2000) e por Yim *et al.* (2002), foi detectado um efeito da umidade sobre o fluxo de CO₂ do solo. Embora com baixos coeficientes de determinação, os resultados mostraram que, com o aumento da umidade volumétrica, ocorre a redução nos fluxos de CO₂ do solo, tanto na estação seca como na chuvosa. Quando os fluxos foram analisados por posição topográfica, o mesmo padrão foi verificado nos solos da vertente e do baixio, indicando que a relação inversamente proporcional é estável, e que estes ambientes apresentam interferência da água dificultando a emissão de CO₂ durante a estação chuvosa. A relação entre o fluxo de CO₂ e a umidade do solo no platô não foi evidenciada por causa da maior homogeneidade dos dados de umidade para esta posição da topografia.

Mesmo sem uma relação clara com a umidade, La Scala Jr *et al.* (2000) destacaram que o maior fluxo de CO₂ foi obtido após uma noite em que ocorreu um evento de chuva (14,6 mm), e que este fato pode ter sido o causador de mudanças nas condições do solo.

Relação entre fluxo de CO₂ e temperatura do solo

Considerando que a temperatura exerce papel essencial na velocidade das reações enzimáticas, seu efeito sobre o fluxo de CO₂ é consequência de sua influência sobre a biota do solo. Neste estudo, as relações entre o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo foram diretamente proporcionais, revelando um incremento no fluxo de CO₂ com o aumento da temperatura. Os baixos coeficientes de determinação apresentados podem ser explicados pela

pequena variação nas medidas de temperatura (de 23,1 a 26,0 °C) ao longo de todo o estudo, com grande variação dos fluxos (de 1,07 a 12,94 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Assim como neste estudo, outros estudos relataram relação entre o fluxo de CO_2 e a temperatura do solo (Sotta, 1998; Wagai *et al.*, 1998; Mielnick & Dugas, 2000; Fang & Moncrieff, 2001; Chambers *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2003; Pumpanem *et al.*, 2003). Embora, Ball & Drake (1997), La Scala Jr. *et al.* (2000) e Yim *et al.* (2002) não encontraram relação significativa. La Scala Jr. *et al.* (2000) sugeriram a baixa variabilidade da temperatura como causa para a ausência de relação significativa, enquanto Yim *et al.* (2002), que avaliaram a variabilidade espacial, propuseram que a temperatura do solo estaria correlacionada com a variabilidade temporal do fluxo de CO_2 do solo.

Relação entre o fluxo de CO_2 e características do solo e o estoque de liteira

As relações entre fluxo de CO_2 e umidade e/ou temperatura do solo tem sido extensamente explorada na literatura. Entretanto, estudos mostrando relações entre o fluxo de CO_2 e as propriedades químicas ainda são escassos na literatura, tornando-se mais restrito quando se trata de solos tropicais. Mas, uma vez que, o fluxo de CO_2 varia em função do tipo de cobertura vegetal sobre ele (Raich & Schlesinger, 1992) e esta com o tipo de solo, a inserção de características químicas do solo nos modelos preditores de fluxo pode ser útil.

La Scala Jr. *et al.* (2000), quando comparando a relação entre o fluxo de CO_2 do solo com a disponibilidade de nutrientes do solo, encontraram correlação positiva entre o fluxo de CO_2 e o conteúdo de carbono do solo, bem como entre o fluxo e a capacidade de troca catiônica do solo. No presente estudo, algumas relações positivas entre fluxo e nutrientes foram encontradas; entretanto, surpreendentemente, alguns resultados foram inversamente relacionados com o fluxo.

A maioria das relações significativas entre características químicas do solo e fluxo de CO_2 do solo foram obtidas na estação chuvosa, provavelmente pela maior disponibilidade,

deslocamento, lixiviação, enfim maior dinâmica dos elementos nesta estação, devido à alta precipitação. Quando considerada a posição na topografia, grande parte das relações foram observadas nos solos do platô. Os fatores físicos do solo aparentaram exercer maior influência no fluxo de CO₂ emitido do solo das áreas de baixio e vertente, e, portanto, a maioria das relações com temperatura e umidade ocorreu nestas posições topográficas. No platô foram obtidas melhores relações entre fluxo de CO₂ e características químicas do solo.

Quando o fator “estação” foi considerado, a melhor relação foi estabelecida na época chuvosa entre fluxo de CO₂ e pH do solo ($r^2 = 0,47$). Entretanto, esta relação foi inversamente proporcional, acontecendo o mesmo com as relações com Ca trocável e percentual de saturação por bases. Este comportamento pode ser explicado pelos menores fluxos de CO₂ do baixio nesta época (estresse por excesso de água), que apresentou a maior disponibilidade de nutrientes.

No período de transição chuvosa-seca, as esperadas relações diretamente proporcionais entre o fluxo de CO₂ e pH do solo e entre o fluxo de CO₂ e conteúdo de P disponível do solo foram observadas. O pH controla o ótimo de atividade de diversos microrganismos no solo (Richards, 1987), e regula a disponibilidade de P (Brady, 1989). O P participa diretamente no metabolismo energético (ATP) dos seres vivos, e a respiração (emissão de CO₂) é, na verdade, um gasto energético (Taiz, 1998). Na estação seca, a relação inversa entre fluxo de CO₂ e Ca trocável foi novamente observada, mas desta vez os menores fluxos de CO₂ foram medidos nos solos do platô, que, nesta estação, apresentaram os maiores conteúdos de Ca trocável, uma possível consequência da redução da lixiviação.

Estes resultados revelam que existem muitos outros fatores inter-relacionados explicando o fluxo de CO₂, e portanto, a previsão inicial (maior disponibilidade de nutriente → maior fluxo) para solos tropicais não foi observada. De fato, a dinâmica da água parece ter dominado a emissão de CO₂ nesta área de estudo, como anteriormente verificado por Sotta (1998). La Scala Jr. *et al.* (2000) estudando a relação entre fluxo de CO₂ e características

químicas e físicas em solos tropicais (São Paulo) enfatizaram que a relação entre cada variável e o fluxo de CO₂ só é significativa quando pequenas áreas são consideradas, com suas características específicas de temperatura e umidade.

Quando o fator “posição topográfica” foi considerado, as melhores relações foram observadas no platô, onde 52% do fluxo foi explicado pelo P disponível, e 49% pelo K trocável. Nos solos do platô todas as relações significativas observadas apresentaram o coeficiente angular positivo, indicando relação direta, ou seja, maior disponibilidade de nutrientes conduz a maiores taxas da emissão de CO₂. Entretanto, no baixio, as relações são inversas, reafirmando que fatores físicos têm maior expressão nos solos do baixio e que a dinâmica da água pode estar exercendo maior influência nos fluxos desta posição topográfica, mascarando (invertendo) o tipo de relação prevista com os nutrientes. Ocorre que, na estação chuvosa, embora haja maior disponibilidade de nutrientes no solo, há também excesso de água que restringe a produção e liberação do CO₂ do solo.

7 – CONCLUSÕES

Os maiores fluxos de CO₂ ocorreram nos solos da vertente. Entretanto, na estação seca, os solos do baixio atingem valores semelhantes aos da vertente, mostrando a existência de uma variação tanto espacial como sazonal do fluxo de CO₂ na área de estudo.

Existe relação linear inversamente proporcional entre o fluxo de CO₂ e umidade volumétrica do solo e diretamente proporcional com a temperatura do solo.

Há relação entre o fluxo de CO₂ e propriedades químicas do solo. Entretanto, o tipo de relação (direta ou inversamente proporcional) foi influenciado pela umidade do solo, que nos solos do baixio gerou relações inversas e nos solos do platô, relações diretas.

As melhores relações entre fluxo de CO₂ e propriedades químicas do solo ocorreram nos solos do platô, onde a umidade volumétrica apresentou menor variação. Para melhor relacionar o fluxo de CO₂ com propriedades químicas do solo é necessário isolar o fator umidade.

9- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, A. B. 1981. White-sand vegetation of Brazilian Amazonia. *Biotropica*, 13(3): 199-210
- Anderson, J. M.; Ingran, J. S. 1993. *Tropical biology and fertility, a handbook of methods*. 2^a ed. Wallingford: Commonwealth Agricultural Bureau. 240p.
- Araújo, A. C.; Nobre, A. D.; Kruijt, B.; Elbers, J. A.; Dallarosa, R.; Stefani, P.; von Randow, C.; Manzi, A. O.; Culf, A. D.; Gash, J.H.C.; Valentini, R.; Kabat P. 2002. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a Central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. *Journal of Geophysical Research*, 107 (20): 1-20
- Ball, A. S.; Drake, B. G. 1998. Stimulation of soil respiration by carbon dioxide enrichment of marsh vegetation. *Soil Biology and Biochemistry*. 30 (8-9): 1203-1205
- Bekku, Y.; Koizumi, H.; Oikawa, T.; Iwaki, H. 1997. Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*, 5: 247-254
- Bernoux, M.; Graça, M. A.; Cerri, C. C.; Fearnside, P. M.; Feigl, B. J.; Piccolo, M. C. 2001. Carbon storage in biomass and soils. In: McClain, M.E.; Victoria, R.L.; Rickey, J.E. (eds) *The Biogeochemistry of the Amazon Basin*. Oxford University Press, New York, U.S.A. p. 165-184
- Bosatta, E.; Agren G. I. 1999. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 1889-1891
- Chambers, J. Q.; Higuchi, N.; Tribuzy, E. S.; Trumbore, S. E. 2001. Carbon sink for a century: intact rainforest have a long-term storage capacity. *Nature*, 410: 429
- Chambers, J. Q.; Tribuzy, E. S.; Toledo, L.; Crispim, B. F. O.; Higuchi, N.; Santos, J.; Araújo, A. C.; Kruijt, B.; Nobre, A. D.; Trumbore, S. E. 2002. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecological Applications (In pres)*.

- Chauvel, A.; Lucas, Y.; Boulet, R. 1987. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. *Experientia*, 43:234-241
- Crutzen, P. J. 2001. Foreword. In: Schulze E. -D.; Heimann, M.; Harrison, S.; Holland, E.; Lloyd, J.; Prentice, I. C.; Schimel, D. *Global biogeochemical cycles in the climate system*. London, Academic Press. 350p.
- Curi, N.; Larach, J. O. I.; Kämpf, N.; Monis, A. C.; Fontes, L. E. F. 1993. Vocabulário de Ciência do solo. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, SP. 89 p.
- Davidson, E. A.; Savage, K.; Verchot, L. V.; Navarro, R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 21-37
- Drewitt, G. B.; Black, T. A.; Nesic, Z.; Humphreys, E. R.; Jork, E. M.; Swanson, r.; Ethier, G. J.; Griffis, T.; Morgenstern, K. 2002. Measuring forest floor CO₂ fluxes in a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110: 299-317
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997 *Manual de métodos de análise de solo*. 2^a ed. Rio de Janeiro, RJ. (EMBRAPA-CNPS. Documentos; 1). 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1999. *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. 1^a ed. Rio de Janeiro, RJ. (EMBRAPA-CNPS). 412p.
- Fang, C.; Moncrieff, J. B. 1998a. An open-top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure difference on CO₂ efflux measurement. *Functional Ecology*, 12: 319-325.
- Fang, C.; Moncrieff, J. B. 1998b. Simple and fast technique to measure CO₂ profiles in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (14): 2107-2112
- Fang, C.; Moncrieff, J. B. 1999. A model for soil CO₂ production and transport I: model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 225- 236
- Fang, C.; Moncrieff, J. B. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33: 155-165

- Fearnside, P. M.; Leal Filho, N. 2001. Soil and Development in Amazônia: lessons from the Biological Dynamics of Forest Fragments Project. In: Bierregard, R. O.; Gascon, C.; Lovejoy, T. E.; Mesquita, R. (eds) *Lessons from Amazonia. The ecology and conservation of a fragment forest*. Yale University Press, U.S.A. p. 291-312
- Guillaumet, J. L. 1987. Some structural and floristic aspects of the forest. *Experientia*, 43: 241-251
- Houghton, R. A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. *Advances in Soil Science*, 4: 45-65
- Houghton, R. A.; Hobbie J. E.; Melillo, J. M.; Moore, B.; Peterson, B. J.; Shaver, G. R.; Woodwell, G. M. 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soil between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecological Monographs*, 53: 235-262
- Howard, D. M.; Howard, P. J. A. 1993. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soils types. *Soil Biology and Biochemistry*, 25 (11): 1537-1546
- Iritz, Z.; Lindroth, A.; Gärdenäs, A. 1997. Open ventilated chamber system for measurements of H₂O and CO₂ fluxes from the soil surface. *Soil Technology*, 10: 169-184
- Janssens, I. A.; Kowalski, A. S.; Longdoz, B.; Ceulemans, R. 2000. Assessing forest soil CO₂ efflux: an *in situ* comparison of four techniques. *Tree Physiology*, 20: 23-32
- Kang, S.; Doh, S.; Lee, D.; Lee, D.; Jin, V. L.; Kimball, J. S. 2003. Topographic and climate controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology*, 9:1427-1437
- La Scala Jr, N.; Marques Jr., J.; Pereira, G. T.; Cora, J. E. 2000. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 1469-1473

- Le Dantec, V.; Epron, D.; Dufrene, E. 1999. Soil CO₂ efflux in a beechforest: comparison of two closed dynamic systems. *Plant and Soil*, 214: 125-132
- Lehninger, A. L. 1976 Bioquímica; 2^a edição Vol. 2. (Edigard Blücher) São Paulo, Catabolismo e a produção de energia das ligações de fosfato. 248p.
- Lemos, R. C.; Santos, R. D. 1984. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. SBCS/SNLCS, Campinas, SP. 45p.
- Luizão, F. J.; Schubart, H. O. R. 1987. Litter production and decomposition in a Terra-Firme forest of Central Amazonia. *Experientia*, 43: 259-265.
- Luizão, F. J. 1989. Litter production and mineral element input to the forest floor in a Central Amazonian forest. *Geojournal*, 19: 407-417
- Luizão, R. C. C.; Luizão, F. J.; Paiva, R. Q.; Monteiro, T. F.; Sousa, L. S.; Kruijt, B. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a Central Amazonian forest. *Global Change Biology*, LBA Special Issue (*In Press*).
- Malhi, Y.; Grace, J. 2000. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution*, 15 (8): 332-337
- Malhi, Y.; Nobre, A. D.; Grace, J.; Kruijt, B.; Pereira, M. G. P.; Culf, A. D.; Scott, S. 1998. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rainforest. *Journal of Geophysical Research*, 103 (31): 593-612
- Meir, P.; Grace, J.; Miranda, A. C.; Lloyd, J. 1996. Soil respiration in a rainforest in Amazônia and cerrado in central Brazil. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. (Eds.). *Amazonian deforestation and climate*. Wiley, Chichester. 319-330p.
- Milnick, P. C.; Dugas, W. A. 2000. Soil CO₂ in a Tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 221-228
- Pereira, A. A. A.; Cruciani, D. E. 2001. Estimativa de variações no coeficiente relativo de difusão dos gases no solo com base na análise da curva de retenção de água. *Ciência Rural*, 31(2): 245-249

- Phillips, O. L.; Malhi, Y.; Higuchi, N.; Laurance, W. F., Nuñez, P. V.; Vásquez, R. M.; Laurance, S. G., Ferreira, L. V.; Stern, M.; Brown, S.; Grace, J. 1998. Changes in the Carbon Balance of Tropical Forests: Evidence from Long-Term Plots. *Science*, 282: 439-442
- Post, W. M.; Emanuel, W. R.; Zinke, P. J.; Stangenberger, A. G. 1982. Soil Carbon pools and world life zones. *Nature*, 298: 156-159
- Pumpanem, J.; Ilvesniem, H.; Perämäki, M.; Hari, P. 2003. Seasonal patterns of soil CO₂ efflux and soil CO₂ concentration in a Scots pine forest: comparison of two chamber techniques. *Global Change Biology*, 9: 371-372
- PP System 2000. Environmental Gas Monitor. *Operator's manual, Version 1.8*. Reino Unido. 69 p.
- Primavesi, A. 1999. *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. Nobel, São Paulo. 549 p.
- Raich, J. W.; Schlesinger, W. H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B: 81-99
- Ranzani, G. 1980. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. *Acta Amazonica*, 10 (1): 7-41
- Rayment, M. B. 2000. Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux. *European Journal of soil science*, 51: 107-110
- Rayment, M. B.; Jarvis, P. G. 2000. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 35-45
- Ribeiro, J. E. L. S.; Hopkins, M. J. G.; Vicentini, A.; Sothers, C. A.; Costa, M. A. S.; Brito, J. M.; Souza, M. A. D.; Martins, L. H. P.; Lohmann, L. G.; Assunção, P. A. C. L.; Pereira, E. C.; Silva, C. F.; Mesquita, M. R.; Procópio, L. C. 1999. Flora da Reserva Ducke: Guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central. Manaus: INPA. 816 p.

- Richards, B. N. 1987. The microbiology of terrestrial ecosystems. Longman Scientific & Technical, New York, U.S.A. 399p.
- Roberts, J. M. 2000. *Effects of temperature on soil respiration: A brief overview*. Center for Ecology and Hydrology Wallingford, Crowmarsh Gifford, Wallingford, Oxfordshire. 45p.
- Roberts, T. W. 2001. Climate change. In: Sixth Conference of Parties to the United Nations Framework on Climate Change. Bonn, Alemanha.
- Rosenzweig, C.; Hillel, D. 2000. Soil and global climate change: challenges and opportunities. *Soil Science*, 165: 47-56
- Ross, S. 1989. *Soil Processes: A systematic approach*. Routledge, New York, U.S.A. 444p.
- Rovira, A. D. 1953. Use of the Warburg apparatus in soil metabolism studies. *Nature*, 172: 29
- Seneviratne, G.; Van Holm, L. H. J. 1997. CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a wetted tropical upland soil following surface mulch application. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (120): 1619-1622
- Silver, W. L.; Neff, J.; McGroddy, M.; Velkamp, E.; Keller, M.; Cosme, R. 2000. Effects of soil on belowground carbon and nutrient storage in a lowland amazonian forest ecosystem. *Ecosystems*, 3: 193-209
- Sioli, H. 1991. *Amazônia: Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. 3^a ed. Vozes, Petrópolis, R.J. 72p.
- Sotta, E. D. 1998. *Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central*. Dissertação de mestrado. INPA, Manaus-AM. 87p.
- Taiz, I.; Zeiger, E. 1998. *Plant Physiology*. 2^a ed. Sinauer Associates, Inc., U.S.A. 792p.
- Tiwari, S. C.; Tiwari, B. K.; Mishra, R. R. 1987. The influence of moisture regimes on the population and activity of soil microorganisms. *Plant and Soil*, 101: 133-136
- Trumbore, S. E.; Davidson, E. A.; Camargo, B. P.; Nepstad, D.C., Martinelli, L. A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochemistry Cycle*, 9 (4): 515-528

- Vanhala, P. 2002 Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 34 (9):1375-1379
- Veloso, H.P.; Rangel filho, A. L. R. & Lima, J. C. A. 1991. Classificação da Vegetação Brasileira, adaptada a um sistema Universal. IBGE, Rio de Janeiro. 123p.
- Vieira, L. S. 1988. Manual de Ciência do Solo, com ênfase aos solos tropicais. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 2a ed. 454 p.
- Yim, M. H.; Joo, S. J.; Nakane, K. 2001. Comparison of field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods. *Forest Ecology and Management*, 5814: 1-9
- Yim, M. H.; Joo, S. J.; Syudou, K.; Nakane, K. 2002. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. *Forest Ecology and Management*, 5979: 1-4
- Wagai, R.; Brye, K. R.; Gower, S. T.; Norman, J. M.; Bundy, L. G. 1998. Land use and enviromental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1501-1509
- Wilkinson, L. 1998. Systat: The system for statistics. Evanston, IL, Systat Inc.



Programa Integrado de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais - PIPG BTRN

Um dos principais fatores que tem prejudicado o desenvolvimento de pesquisas na Região Amazônica é a insuficiência de pessoal de alto nível, devidamente qualificado do ponto de vista teórico e prático, para a abordagem de problemas específicos da região. Deve-se ainda considerar que o volume de conhecimentos sobre os trópicos é reduzido, o que, somado ao fato dessas áreas estarem em desenvolvimento, torna premente a necessidade de formação e fixação de pesquisadores qualificados para atuarem em campos como levantamento da flora e da fauna, manejo de sistemas terrestres e aquáticos, controle ambiental e planejamento racional da exploração dos recursos naturais renováveis.

A Amazônia, que ocupa áreas de 6 países (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Peru, e Venezuela), representa: a vigésima parte da superfície terrestre; quatro décimos da América do Sul; três quintos do Brasil; um quinto da disponibilidade mundial de água doce; um terço das reservas mundiais de florestas latifoliadas e 69% dessa área pertence ao Brasil, abrangendo os Estados do Pará, Amazonas, Maranhão, Goiás, Mato Grosso, Acre, Amapá, Rondônia e Roraima. São 4.871.000 km², uma imensidão de terras, águas e florestas, que abrigam 10 milhões de habitantes, apenas dois e meio milésimos da população mundial, com uma densidade de 2 hab./km².

Cabe-nos uma enorme responsabilidade na preparação dos recursos humanos necessários ao desenvolvimento científico e tecnológico dessa região, passando a atuar junto às instituições de ensino superior, fortalecendo-as e multiplicando os centros de formação de pessoal. Assim, para que atinjamos nossos objetivos, é imprescindível manter e intensificar contatos e intercâmbios principalmente com as Universidades da região, nos vários níveis de formação.

Dentro deste objetivo primordial enquadra-se o Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais (PPG-BTRN), mantido pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA/MCT, em convênio com a Universidade Federal do Amazonas - UFAM.

Av. André Araújo, 2936 - Petrópolis
Caixa Postal 478
69083-970 - Manaus-AM.
E-mail: inpappg@inpa.gov.br
site: pg.inpa.gov.br