Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Centro de Energia Nuclear na Agricultura

A influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO_2 do ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas

Helber Custódio de Freitas

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada

Piracicaba
2012

Helber Custódio de Freitas
Meteorologista

A influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO_2 do ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **HUMBERTO RIBEIRO DA ROCHA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada

Piracicaba
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Freitas, Helber Custódio de
A influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO2 do ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas / Helber Custódio de Freitas. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
93 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2012.

1. Análise de séries temporais 2. Carbono 3. Ecossistemas - Mata Atlântica 4. Micrometeorologia 5. Montanhas 6. Respiração vegetal 7. Topografia 8. Vórtices dos gases I. Título

CDD 574.526
F866i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico

Aos meus pais, Norma e Ednilson (primeiro as damas),
aos meus irmãos, Helen e Henrique
e à minha esposa, Marcela,
não por ser minha esposa,
mas por ser ela como é.
Sempre pacientes e compreensivos
com este meu momento.

AGRADECIMENTOS

Em 1994, fiquei frustrado ao entrar no curso de meteorologia, já que física era minha primeira opção no vestibular. Sabia que previsão do tempo era a última das coisas que eu faria como profissional, mas queria entrar na faculdade e meteorologia era uma opção na ficha de inscrição. Preenchi. Passei. Iniciei. Por vezes pensei em desistir, mas hesitei. Continuei. Aturei por mais um tempo, até cursar a primeira disciplina que relacionava mais estreitamente a meteorologia e o meio ambiente. Percebi ali que poderia me encontrar e foi quando tudo começou. Entendi que a meteorologia vai além, mas não imaginava que poderia ir tão além.

Duas pessoas foram fundamentais deste ponto em diante. Um me deu a oportunidade de vivenciar a relação entre a planta e a atmosfera no campo e acho que entendeu um pouco da minha vocação naquele momento. O outro fazia piada com a minha cara o tempo todo nas campanhas de campo, tomava chopp enquanto me ensinava sem perceber, mas também entendeu que eu gostava do trabalho. Primeiro foi com a cana, depois com a Amazônia e acho que não vai parar mais. Isso é um pouquinho do percurso que me trouxe até aqui e se não fossem eles, provavelmente esta trajetória teria sido diferente. Sei que grande parte da história somos nós que fazemos, mas dependemos de encontrar bons personagens para construí-la com sucesso.

Obrigado, Professor Humberto Ribeiro da Rocha.

Obrigado, Professor Osvaldo Machado Rodrigues Cabral.

É claro que meu pai, Ednilson Custódio de Freitas, e minha mãe, Norma de Maio Freitas me deram a formação fundamental para conseguir aproveitar o que já passei e que continuo a viver. Então, agradeço-os.

Obrigado, Pai, pela disciplina e por ter me dado as chances que tive e creio tê-las aproveitado até aqui.

Obrigado, Mãe, por ter sido mãe, por todas as vezes que cuidou de mim e pelos sufocos que te fiz passar. Valeu à pena.

Agradeço à Emília, ao Jonatan, Duda, Nilson, Gabriel, Jonathan e Rogério L. Carneiro pelas ajudas instantâneas e extensivas e ao Dr. Marcos A. V. Ligo, que trabalhou um bocado na primeira instalação, nada fácil. Agradeço ao amigo e Dr. Celso von Randow pelos toques e papos, desde a graduação. Agradeço ao Professor Carlos Alfredo Joly por mais esta oportunidade que tive de trabalhar com o que eu gosto. Agradeço ao Sr. João Paulo Villani,

administrador do Núcleo Santa Virgínia e toda a equipe do Parque e, sobretudo, agradeço ao Wagner de Toledo, nosso leão da mata atlântica, fundamental nas atividades de campo.

Finalmente, agradeço com a mesma importância, à Universidade de São Paulo, ao programa de pós-graduação em Ecologia Aplicada-ESALQ/CENA e ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, lugar ande nasceram as idéias, e à FAPESP, por tornar possível o desenvolvimento daquilo que buscamos fazer cada vez melhor e continuar sempre aprendendo com ela: a Ciência.

Há algum fenômeno na natureza que seja repentino, permanente
e que ocorra sem a pretensão da busca ao equilíbrio?
Vivo a procurar e sequer encontro ao menos um exemplo.
Somos parte da natureza e pensar nisso me traz
paciência e perseverança, paciência e perseverança...
Helber C. Freitas

SUMÁRIO

RESUMO 11
ABSTRACT 13
LISTA DE FIGURAS 15
LISTA DE TABELAS 19
1 INTRODUÇÃO 21
2 DESENVOLVIMENTO 23
2.1 Revisão bibliográfica 23
2.1.1 Alguns conceitos sobre o ciclo do carbono 23
2.1.2 A técnica Eddy Covariance e a estimativa de FLE 25
2.1.3 Limitações da técnica de EC e implicações na estimativa do FLE 27
2.1.4 FLE na Floresta Tropical Amazônica Brasileira 28
2.1.5 A estimativa do FLE por técnicas micrometeorológicas e transportes por advecção 31
2.2 Materiais e métodos 35
2.2.1. Sítio experimental 35
2.2.2 Equipamentos e variáveis monitoradas 36
2.2.3 Fluxos turbulentos 39
2.2.4 Armazenamento vertical 40
2.2.5 Preenchimento de falhas do FLE 41
2.2.5.1 Períodos diurnos 41
2.2.5.2 Períodos noturnos 41
2.2.6 Transportes advectivos 42
2.2.6.1 Advecção horizontal 42
2.2.6.2 Advecção vertical 44
3 RESULTADOS 45
3.1 Variáveis Climáticas 45
3.2 Os fluxos turbulentos de [CO_2] e a radiação fotossinteticamente ativa 48
3.3 O armazenamento vertical de [CO_2] - St 52
3.4 A composição do FLE por meio do FC e St 53
3.5 Curvas de dependência luminosa 56
3.6 RE, FLE noturno e implicações do u_* 58
3.7 Transportes advectivos 62
3.7.1 Advecção vertical 62
3.7.2 Advecção horizontal 65
3.8 O fluxo líquido do ecossistema entre 2008 e 2010 74
4 CONCLUSÕES 81
REFERÊNCIAS 85
APÊNDICE 91

RESUMO

A influência dos transportes advectivos no balanço de CO_2 do ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas

Para este trabalho, foram realizadas observações de variáveis climáticas e medidas de fluxo de carbono, durante o período de 2008 a 2010, sobre uma floresta de mata atlântica, buscando estimar o balanço de carbono neste sítio experimental, com o objetivo de melhor compreender as trocas de CO_2 entre esta floresta e a atmosfera. Para tanto, foram utilizadas técnicas micrometeorológicas de vórtices turbulentos associadas a medidas de transportes advectivos. Este estudo investigou uma área de características singulares, de intensos gradientes topográficos, na cidade de São Luiz do Paraitinga, estado de São Paulo, região sudeste do Brasil. Com vegetação de dossel irregular e circundada por encostas íngremes de até 30º (em distâncias de 50 metros), uma torre micrometeorológica com 60 m de altura foi instalada ao final de 2007. Em 2010, em uma segunda etapa do estudo, foi finalizado o sistema para medidas de fluxos advectivos composto por outras quatro torres de 27 m de modo a definir um volume de controle em uma das encostas próxima à torre micrometeorológica, assim como sugere a técnica utilizada ao considerar os transportes advectivos na equação da conservação de massa, o que caracteriza uma abordagem mais criteriosa em função do relevo. As análises mostraram que estes transportes 1. atuam na alteração da concentração de CO_2, tanto na vertical como na horizontal; 2. apresentam ciclos diários e 3. estão bem correlacionados com o armazenamento vertical de CO_2, elemento participante na determinação da produtividade primária líquida de uma vegetação monitorada com a técnica comumente utilizada. Considerados os erros inerentes nas estimativas, ao final de três anos de estudo, esta floresta de mata atlântica mostrou comportar-se como uma modesta fonte de CO_2, podendo ainda atuar de forma neutra, mesmo tendo acumulados anuais estimados da forma tradicionalmente encontrada na literatura. Estes resultados concordam com outros obtidos em trabalhos independentes de igual teor científico realizados nesta mesma área investigada. Dessa forma, a exclusão dos transportes advectivos não penalizou o balanço de massa; considerá-los causaria maior incerteza nas somas anuais em função do período de dados disponível e da complexidade da sua determinação, como já discutido em outros trabalhos encontrados na literatura.

Palavras-chave: Topografia complexa; Montanhas; Declive; Correlação de vórtices turbulentos; Advecção; Fluxos turbulentos de CO_2; Produtividade líquida do ecossistema; Respiração do ecossistema; Preenchimento de falha de séries temporais; Torre micrometeorológica; Mata atlântica

ABSTRACT

The influence of advective transports in the net ecosystem CO_2 exchange: a case study for the Atlantic forest using micrometeorological techniques

For this study, observations of climate variables and measurements of carbon fluxes have been done between the years 2008 and 2010 above a brazilian Atlantic forest, aiming to estimate the carbon balance in this experimental site, in order to better understand the exchanges of CO_2 between this forest and the atmosphere. To carry it out, micrometeorological eddy covariance technique was associated with advective transport measurements. This study investigated an specific area with intense topographic gradients located in São Luiz do Paraitinga city, São Paulo state, southeastern Brazil. Surrounded by vegetation with irregular canopy and steep slopes of up to 30° (at distances of 50 meters), a micrometeorological tower 60 m height was installed at the end of 2007. In 2010, the installation has been finished with four towers of 27 m height in order to define a control volume over one of the slopes near the micrometeorological tower, for measurements of advective flows as suggests the technique when advective transports are considered, from equation of mass conservation, which features a more careful approach regarding the relief conditions. The analysis showed that these transports 1. act on changes in CO_2 concentration, both vertically and horizontally; 2. show daily cycles and 3. are well correlated with the vertical CO_2 storage, a key participant element in determining the net primary productivity of vegetation when monitored by the technique as it is commonly applied. Considering the inherent estimated errors, at the end of three years of study, this forest was a modest source of CO_2, and may also acts in a neutral way, even with annual estimated sums obtained as traditionally found in the literature. These results agree with those found through independent studies with considerable scientific content developed in the same investigated area. Thus, the exclusion of advective transport did not penalize the mass balance; consider them could cause greater uncertainty in annual amounts based on the available dataset and the complexity for its determination, as discussed in other works in the literature.

Keywords: Complex topography; Hills; Slope; Eddy covariance; Advection; Turbulent CO_2 fluxes; Net ecosystem exchange; Ecosystem respiration; Gap filling; Micrometeorological tower; Brazilian Atlantic forest

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem de satélite (Google Earth) com delimitação da microbacia de estudo pela linha branca e pontos vermelhos. A localização da torre micrometeorológica é indicada pelo quadrado (23° 17' a 23° 24' S e 45° 03' a 45° 11' W). 36

Figura 2 - Torre micrometeorológica com instrumentação, instalada desde novembro de 2007 na microbacia do Ribeirão da Casa de Pedra, Núcleo Santa Virgínia, São Luiz do Paraitinga – SP.....38

Figura 3 - Projeção das torres segundo interpolação pelo inverso do quadrado das distâncias das suas posições e alturas relativas em um sistema cartesiano (Tabela 3) onde a grade (células de 2 x 2 m) da superfície representa o solo. Flechas vermelhas indicam a posição das torres no volume e flechas azuis indicam a orientação geográfica.....43

Figura 4 - Totais diários de precipitação (mm d^{-1}) de 01-01-2008 a 31-12-2010. As faixas estreitas delimitadas pelas linhas pretas compreendem os períodos secos (de 01-06 a 31-08 de cada ano). Dados ausentes estão representados por valores negativos. 45

Figura 5 - Precipitação total acumulada nos anos de 2008 a 2010. As linhas verticais delimitam o período seco (de 01 de junho a 31de agosto).....46

Figura 6 - (a) médias mensais da radiação solar incidente (K_i); (b) temperatura do ar (T_{ar}); (c) pressão atmosférica (P_{atm}) e (d) umidade específica (q) para os anos de 2008 a 2010.....47

Figura 7 - Rosa dos ventos (médias de 30 minutos). No topo: período seco diurno (a) e noturno (b); na base: período chuvoso diurno (c) e noturno (d). 48

Figura 8 - Sazonalidade dos fluxos turbulentos de [CO_2] em médias de 30 minutos com dados de 2008 a 2010.....50

Figura 9 - Médias diurnas mensais (quando RFA ≥ 10 μmol m^{-2} s^{-1}) dos albedos RFA (2008 a 2010) e K (2008 e 2009). 50

Figura 10 - Médias diurnas (quando RFA ≥ 10 μmol m^{-2} s^{-1}) entre 2008 a 2010 das RFA_r (a) e FA_i (b). 51

Figura 11 - Ciclo médio diário de FC para os períodos seco e chuvoso. 51

Figura 12 - Ciclo médio diário dos armazenamentos ajustados (St_m) e observados (St_o) para os períodos seco (a) e chuvoso (b). St_m resultou de medidas de 2008 a 2010 com período seco de junho a agosto e período chuvoso com os demais meses; St_o foi observado durante o ano de 2010. Período seco: de 19 de junho a 07 de julho; período chuvoso não inclui meses de janeiro, fevereiro e maio de 2010. (períodos faltantes por falha de energia). 53

Figura 13 - Ciclos médios diários para os períodos seco (a) e chuvoso (b) com dados observados de 2010 do fluxo líquido do ecossistema (FLE2), fluxo turbulento (FC) e armazenamento (Sto).....54

Figura 14 - Ciclo médio diário mensal do FLE_1 (com St_m) e FLE_2 (com St_o) para os meses 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, e 12 de 2010. 55

Figura 15 - Sazonalidade do FLE_1 em médias de 30 minutos com dados de 2008 a 2010 56

Figura 16 - Médias de 30 minutos de FLE em função de RFA_i para períodos seco (a e b) e chuvoso (c e d), matutino (a e c) e vespertino (b e d). $RFA_i \geq 10$ μmol m^{-2} s^{-1} e intervalo matutino até 11h30min. A linha vermelha refere-se à hipérbole ajustada em cada caso. 57

Figura 17 - Valores médios de FLE noturno associados à respectiva mediana dos quantis de 10% de u_*. Retângulos indicam u_* associados às respectivas médias de FLE estatisticamente diferentes segundo teste-*t* (1 e 3: $P < 0.05$; 2: $P < 0.17$; 4: $P < 0.001$). Barras indicam erro padrão.....59

Figura 18 - Médias de 30 minutos do FLE em função da temperatura do ar para a segunda parte da noite durante o período seco. θ_1 corresponde ao FLE com vento entre 135 e 225 º e θ_2, com vento das demais direções. 60

Figura 19 - FLE noturno em função da temperatura do ar para os casos seco(a) e chuvoso (b). “Nd” e “Nw” referem-se a seco e chuvoso, respectivamente. “1” e “2” denotam 1ª e 2ª partes das noites .“*” para FLE aceitos segundo u_{*c}. Barras indicam erro padrão. 61

Figura 20 - FLE noturno em função da temperatura do ar para os casos seco (a) e chuvoso (b). “Nd” e “Nw” referem-se a seco e chuvoso, respectivamente. “1” e “2” denotam 1ª e 2ª partes das noites. Barras indicam erro padrão. 61

Figura 21 - Médias de A_v noturna em função das medianas de u_*. Barras representam o erro padrão. 63

Figura 22 - Ciclo médio diário de A_v (c) e seus componentes: (a) vento residual; (b) diferença entre [CO_2] no topo e médio na coluna vertical; (d) velocidade de atrito..... 64

Figura 23 - Topo: ciclo médio diário para período de 18-09 a 10-11-2010 do perfil vertical dos campos médios horizontais (6 horas) do vento horizontal (em m s^{-1}) e densidade de CO_2 (escala à direita. Valores em mmol m^{-3}). N1 a N4 denotam os níveis. O horário está centrado no intervalo da média (ex.: 03h indica média das 0 às 06 horas); centro: vento horizontal a 63 m acima do solo calculado de forma análoga ao dos campos horizontais do vento horizontal. A figura geométrica formada pela linha branca delimita a área interna às quatro torres; base: perfil vertical de A_{hP} (a) e A_{hE} (b) (com camadas de espessuras iguais a 1 m) em μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, cuja escala é apresentada na vertical (lado direito). 67

Figura 24 - Ciclo médio diário do parâmetro de estabilidade (z/L) para o período de 18-09 a 10-11-2010. Instável: < -0.0625; estável: > 0.0625 (ZERI, 2008). 67

Figura 25 - Ciclo médio diário de A_{hP} calculada com espessuras representativas de cada nível (a) e unitária para todos eles (c). Análogo para A_{hE}, com espessuras representativas (b) e unitária (d). 70

Figura 26 - a) Ciclo médio diário das densidades de CO_2 dos dias 261, 276, 282, 292 e 298 de 2010, com boa homogeneidade vertical; b) ciclo diário (266 de 2010) com fortes gradientes temporal e vertical da densidade de CO_2. As cores nas figuras referem-se à escala vertical (lado direito) em mmol CO_2 m^{-3}. 71

Figura 27 - (a) Ciclo médio diário de A_{hP}, A_v e A_h para os dias 261, 276, 282, 292 e 298 de 2010; (b) análogo à anterior, com A_{TOTAL} e St_m. As linhas verticais indicam horários: 0h, 0h30min , 2h30min , 7h, 8h, 12,15h, 17h30min e 19h30min. 73

Figura 28 - (a) Ciclos médios diários mensais da série de FLE_{oc} em 2010 (observada filtrada por u_{*c}) juntamente com as séries preenchidas com dados filtrados: P1, usando curvas ajustadas com FLE_1 (FC + St_m de 2008 a 2010), e P2, segundo Hutyra et al. (2008) ; (b), análogo a (a), porém preenchidas com dados não filtrados usando as curvas (P3) e o método proposto por Hutyra et al. (2008) (P4). As indicações dos

meses de janeiro a dezembro estão posicionadas às 12 horas nos seus respectivos ciclos médios diários mensais. 76

Figura 29 - (a) Ciclos médios diários mensais da série de FLE_1 sem filtro por u_{*c} juntamente com as séries P1(com filtro) e P3 (sem filtro) preenchida pelas curvas de resposta à luz e RE_A; (b), análogo a (a) com as séries P2(com filtro) e P4 (sem filtro) preenchida pelo método utilizado em Hutyra et al. (2008). 77

Figura 30 - Acumulados anuais de carbono (g m^{-2}) para 2008 (a), 2009(b) e 2010(c) pelas curvas preenchidas P1, P2, P3 e P4. 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sensores instalados na torre micrometeorológica a 60 (*63) metros acima do solo... 37

Tabela 2 - Sensores utilizados nas estimativas do armazenamento vertical e fluxos advectivos. 39

Tabela 3 - Posição relativa e desnível entre torres assumindo a base de TEC como altura zero em um sistema cartesiano de referência. 42

Tabela 4 - Tabela com os coeficientes das curvas de resposta à luz do FLE para os períodos seco e chuvoso, manhã e tarde. Valores em μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Significância estatística com P(>|t|) < 0.001. 58

Tabela 5 - Relações exponenciais ($RE_A = ae^{bT}$) para períodos seco e chuvoso durante as 1ª e 2ª partes das noites. "***" indica sem significância estatística e T, a temperatura do ar. Demais coeficientes com P(>|t|) < 0.05. 62

Tabela 6 - Valores médios e acumulados do ciclo médio diário (dias 261, 276, 282, 292 e 298 de 2010) para A_{hP}, A_v e St_m em μmol m^{-2} s^{-1}. 74

Tabela 7 - Tabela com os dados preenchidos divididos em dia e noite, com e sem aplicação de filtro u_{*c} nos dados noturnos e respectivos acumulados resultantes de cada preenchimento. Um ano completo contém 17.520 médias de 30 minutos. 78

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foi realizado sobre uma área de mata atlântica na Serra do Mar, em São Paulo (Parque Estadual da Serra do Mar, Núcleo Santa Virgínia), com o objetivo de estimar a troca líquida de carbono entre a floresta e a atmosfera na área de abrangência caracterizada pelo sítio experimental, o que requereu a instalação de quatro torres micrometeorológicas para o monitoramento das variáveis necessárias para o estudo. Este número de torres foi definido em função de o experimento ter sido implementado sobre solo de topografia complexa, onde se presume a necessidade de medidas de transportes advectivos de CO_2, além dos fluxos turbulentos e armazenamento, principalmente durante períodos noturnos quando o método de eddy covariance torna-se crítico na ausência de turbulência. Para tanto, atividades de diversas naturezas executadas ao longo do estudo demandaram elevado conhecimento técnico, além do desenvolvimento de sistemas não disponíveis comercialmente e intensivas e numerosas campanhas de trabalho de campo em condições desafiadoras.

As trocas anuais de carbono da biosfera terrestre com a atmosfera envolvem ~15% do carbono atmosférico global (HOUSE et al., 2003). Assim como em qualquer ecossistema vegetado, entender e quantificar os padrões de produtividade e funcionalidade das florestas tropicais com respeito ao clima significa aumentar a previsibilidade do estado destes ecossistemas e dos seus serviços ambientais à sociedade. Muitos trabalhos ao longo dos últimos trinta anos foram desenvolvidos na Amazônia buscando entender estes processos e, sobretudo, compreender a dinâmica do carbono estabelecendo relações com os possíveis impactos climáticos e vice-versa.

Tomando o volume de pesquisas realizadas na floresta amazônica como referência e, apesar da sua grande importância, a floresta de mata atlântica, classificada como um bioma *hot spot* (MYERS et al., 2000) com aproximadamente 8% da sua cobertura original, é um estudo de caso pouco investigado. Sua região tem relevância estratégica, pois 1. abriga uma grande biodiversidade; 2. localiza-se em áreas de cabeceira; 3. tem alta vulnerabilidade ao desmatamento e 4. situa-se em um pólo de desenvolvimento econômico. Embora restem fragmentos florestais, geralmente inferiores a 500 ha (GASCON; WILLIAMSON; DA FONSECA, 2000), 20% dos remanescentes encontram-se em grandes parques estaduais em São Paulo, onde é possível isolar os efeitos de borda para estudos do funcionamento desta floresta.

O clima subtropical e a abundância de chuvas favorecem a existência deste bioma, onde o regime de precipitação varia de 2000 mm, próximo ao litoral, até 4000 mm em áreas na montanha. Considerando sua posição geográfica, é marcante a influência de sistemas de grande escala como as frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul, além da ação de circulações atmosféricas, como o efeito de levantamento orográfico de massas de ar combinado com o transporte de umidade da brisa marítima (SILVA DIAS et al., 1995). Os remanescentes de florestas encontram-se predominantemente sobre topografia acentuada, marcada pela sucessão de cristas e vales, onde podem ocorrer também sistemas locais de circulação de massas de ar como a brisa vale-montanha.

Em vista do desmatamento intensivo das últimas décadas, é uma questão ainda em discussão se a presença da floresta de mata atlântica, por meio da evapotranspiração (RANZINI et al., 2004) e interação com o clima local, contribui para o regime de precipitação e de temperatura em escala regional (WEBB et al., 2005). As perdas de água, como evaporação por interceptação da chuva, foram estimadas em 18% (RANZINI et al., 2004; OLIVEIRA JUNIOR; DIAS, 2005), o que constitui uma grande fonte de umidade para a formação de nevoeiros e nuvens. No contexto climático, as projeções de aumento da temperatura e da variabilidade de chuva na América do Sul (MARENGO, 2007; IPCC, 2007a,b) nas próximas décadas apontam cenários promotores de novos estados de equilíbrio e áreas de ocupação potencial das florestas e cerrados (OYAMA; NOBRE, 2003), incluindo a mata atlântica (LAPOLA et al., 2007). Não há na região da mata atlântica informações hidroclimáticas e do ciclo do carbono integradas e obtidas com técnicas modernas que permitam acompanhar os ritmos biofísicos em andamento relacionados com os potenciais cenários de mudanças climáticas, o que justifica o desenvolvimento do presente trabalho.

Esta tese está estruturada em quatro partes. Na primeira delas são apresentadas uma revisão dos conceitos envolvidos no estudo e uma linha evolutiva das investigações relacionadas a medidas de fluxo de carbono sobre florestas, desde a década de 1980, empregando técnicas micrometeorológicas. Esta seção é finalizada com a inclusão dos fluxos advectivos na estimativa das trocas líquidas de carbono entre ecossistemas e atmosfera. Na segunda parte, é descrito o sítio experimental e as técnicas utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Na seção seguinte, encontram-se os resultados alcançados utilizando as técnicas abordadas na metodologia e, por fim, na quarta e última parte, são apresentadas as conclusões do estudo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Alguns conceitos sobre o ciclo do carbono

Os impactos da variação da concentração do carbono atmosférico nas possíveis alterações do clima terrestre, bem como suas consequências na evolução da vida continental e aquática, caracterizam a grande motivação de se entender os mecanismos de transferência, suas fases e períodos de permanência em cada uma delas, pois o carbono constitui a metade da matéria viva e sedimentar do planeta, principal fator de interesse dos ecologistas de ecossistemas (CHAPIN et al., 2006). Estes elementos portadores e potenciais emissores/fixadores de carbono dividem-se em grupos promotores de ciclagem com diferentes escalas de tempo, indo de poucos dias a milênios (TRUMBORE, 1997). Por esta razão, há décadas, a ciência vem investigando inúmeros ecossistemas na tentativa de entender os processos envolvidos na dinâmica do carbono em cada um para determinar se estão em equilíbrio, se atuam como emissores ou fixadores e quais seriam suas respostas às perturbações. Estas podem ser desde mudança de uso da terra a alterações do clima em cenário de diferentes dimensões espaciais e temporais.

Considerando a amplitude do tema e as inúmeras formas de abordagem e comunidades científicas envolvidas na pesquisa do ciclo do carbono na Terra, é de grande importância que conceitos básicos e terminologias estejam claramente esclarecidos. Desta forma, seguem abaixo as definições das mais importantes trocas de CO_2 por unidade de área e tempo, de acordo com Chapin et al. (2006):

Produtividade Primária Bruta (PPB) ou *Gross Primary Production* (GPP): corresponde à quantidade total de CO_2 assimilado pelo produtor primário via fotossíntese;

Respiração Autotrófica (RA) ou *Autotrophic Respiration* (AR): corresponde à soma da respiração de todas as partes vivas do produtor primário que foi emitida para a atmosfera. Ainda é uma questão em discussão se a respiração das raízes, em função da rizosfera e micorriza, deveria ser considerada parte da respiração heterotrófica.

Produtividade Primária Líquida (PPL) ou *Net Primary Production* (NPP): corresponde à diferença entre o volume total de CO_2 assimilado via fotossíntese e a respiração do produtor primário, ou seja, PPL = PPB - RA;

Respiração Heterotrófica (RH) ou *Heterotrophic Respiration* (HR): corresponde à parte de CO_2 emitido para a atmosfera como produto da respiração dos organismos heterotróficos (animais e micróbios);

Respiração do Ecossistema (RE) ou *Ecosystem Respiration* (ER): é a soma de respiração de todos os organismos, ou seja, RE = RA+RH;

Produção Líquida do Ecossistema (PLE) ou *Net Ecosystem Production* (NEP): é a diferença do CO_2 que foi assimilado pela fotossíntese do produtor primário e a respiração de todo o ecossistema (produzida por plantas, animais, micróbios), ou ainda a taxa líquida de carbono assimilado pelo ecossistema. Desta forma, PLE = PPB-RA-RH = PPB-RE = PPL-RH;

Fluxo Líquido do Ecossistema (FLE) ou *Net Ecosystem Exchange* (NEE): é a troca líquida do fluxo de CO_2 entre o ecossistema e a atmosfera (WOFSY et al., 1993) por todas as possíveis fronteiras, considerando trocas verticais e/ou horizontais (BALDOCCHI, 2003).

Há aproximadamente 1.500 Pg C armazenados como matéria orgânica no primeiro metro de solo cujas escalas de tempo de ciclagem podem ser seculares. Períodos de ciclagem rápida são considerados inferiores a 20 anos, em baixas latitudes, e superiores a 60 anos, em altas latitudes, pois variam com o clima e vegetação. Ecossistemas perturbados podem apresentar trocas de carbono com taxas muito maiores às observadas em ecossistemas maduros (TRUMBORE, 1997). Assim, é possível agregar outros elementos à PLE quando se trata de estudos de troca de carbono em escalas de tempo maiores ou, ainda, quando elementos como rios, estuários, terras alagadas ou cidades são considerados, de modo que o fluxo total de carbono envolvido é definido, segundo Chapin et al. (2006), como:

Balanço Líquido de Carbono do Ecossistema (BLCE) ou *Net Ecosystem Carbom Balance* (NECB): corresponde ao fluxo total de carbono dentro do ecossistema, considerando o monóxido de carbono, metano, compostos orgânicos voláteis, carbono orgânico no solo, carbonos orgânico e inorgânico dissolvidos e outros fluxos laterais de carbono não dissolvido e não gasoso.

O FLE é definido pela comunidade científica atmosférica como a entrada de C na atmosfera enquanto que o PLE e o BLCE são definidos pelos ecólogos como a entrada de C no ecossistema. Desta forma, por convenção, PLE e BLCE são positivos quando FLE é negativo e vice-versa. Diante do exposto, em pequenas escalas de tempo, PPB e RE são os processos chave do BLCE em muitos ecossistemas. Logo, são válidas as igualdades: BLCE=PLE= PPB-RE=-FLE (CHAPIN et al., 2006).

2.1.2 A técnica Eddy Covariance e a estimativa de FLE

Dentro da camada limite planetária, todas as variáveis atmosféricas apresentam flutuações com períodos iguais ou inferiores a uma hora (STULL, 1988, p. 2) em relação aos seus valores médios de longo prazo (médias diárias a anuais, por exemplo) de modo que uma propriedade, ou constituinte *s* qualquer da atmosfera, pode ser descrito como:

$$s = \bar{s} + s' \qquad (1),$$

na qual a barra indica o valor médio no tempo e a aspa remete à flutuação em relação ao valor médio ao longo de um determinado período.

Estas flutuações são causadas por vórtices turbulentos que continuamente transportam as propriedades da superfície à atmosfera e vice-versa. O principal fator responsável pela existência da turbulência é o aquecimento e resfriamento da superfície terrestre em resposta à absorção de cerca de 90% da energia solar incidente (STULL, 1988, p. 3). As contribuições dos processos na escala molecular (condução, difusão e transferência de momento por viscosidade) ocorrem apenas a poucos milímetros acima da superfície e podem ser desprezadas no cálculo dos fluxos turbulentos (STULL, 1988, p. 251).

Segundo Oke (1987, p. 376), no transporte vertical de um constituinte atmosférico por um vórtice estão envolvidas também a densidade ρ e velocidade vertical *w* da massa de ar que o contém. Considerando que todos estes elementos podem ser decompostos em valores médios e suas respectivas flutuações, tem-se que:

$$S = \overline{(\bar{\rho} + \rho')(\bar{w} + w')(\bar{s} + s')}$$

$$S = (\underbrace{\bar{\rho}\bar{w}\bar{s}}_{(1)} + \underbrace{\bar{\rho}\bar{w}\overline{s'}}_{(2)} + \underbrace{\bar{\rho}\overline{w'}\bar{s}}_{(3)} + \underbrace{\bar{\rho}\overline{w's'}}_{(4)} + \underbrace{\overline{\rho'}\bar{w}\bar{s}}_{(5)} + \underbrace{\overline{\rho'}\bar{w}\overline{s'}}_{(6)} + \underbrace{\overline{\rho'}\overline{w'}\bar{s}}_{(7)} + \underbrace{\overline{\rho'w's'}}_{(8)}) \qquad (2)$$

De acordo com as definições das médias de Reynolds, a média de uma única flutuação é igual a zero, logo, os termos 2, 3 e 5 são cancelados. No caso da densidade do ar, seu valor é considerado virtualmente constante na baixa atmosfera, assim, os termos 6, 7 e 8 também são cancelados. A terceira simplificação refere-se à atmosfera local, que deve ser estacionária e homogênea com relação às concentrações de seus constituintes e à área de observação. Considerando esta como horizontalmente plana, uniforme e sem regiões com movimentos verticais preferenciais, os termos compostos com velocidade média vertical também podem ser ignorados $(\bar{w} = 0)$, reduzindo a Equação 2 ao seu quarto termo, tal que:

$$S = \rho \overline{w' s'} \qquad (3)$$

Dentro das hipóteses assumidas, a Equação 3 resume fisicamente os processos de transporte turbulento, resultando na densidade de fluxo de um elemento atmosférico mensurável através da técnica de eddy covariance (EC) sobre uma superfície plana e homogênea. No caso dos fluxos turbulentos de CO_2 (FC; Equação 4), calor sensível (H; Equação 5) e latente (λE; Equação 6) tais fluxo podem ser escritos como:

$$FC = \overline{w' \rho_c'} \qquad (4)$$

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \qquad (5)$$

$$\lambda E = \rho \lambda \overline{w'q'} \qquad (6)$$

nas quais w' , ρ_c' , T' e q' são as variações em torno da média em um intervalo de tempo (geralmente de 30 minutos) da componente vertical do vento, da densidade de CO_2, da temperatura do ar e da umidade específica do ar, respectivamente. λ é o calor latente de vaporização, ρ é a densidade do ar e c_p é o calor específico do ar.

A forma mais comum de avaliar a intensidade da turbulência é através do cálculo de u_* (em m s^{-1}). Valores próximos de 0 indicam regimes não turbulentos e tipicamente superiores a 0,2, regimes turbulentos. É definido como velocidade de fricção (ou de atrito) e está associada com os campos de vento vertical e horizontal, como descrito abaixo (STULL, 1988, p. 67):

$$u_* = \sqrt[4]{\left(\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2\right)} \qquad (7)$$

Desde que satisfeitas as condições necessárias, o método EC mostra-se extremamente vantajoso ao ser comparado com outras técnicas usadas para quantificar as trocas de carbono com utilização de câmaras, pois possibilita medidas contínuas de longo prazo com alta resolução temporal. Além disso, é um método de baixíssimo impacto na área de estudo e, através de um ponto fixo de medidas, consegue estimar as trocas de CO_2 entre o ecossistema e a atmosfera sobre uma dada área de abrangência com raio entre centenas de metros a quilômetros, de modo que PLE = -FLE.

Apesar das limitações tecnológicas, medidas de fluxos turbulentos de CO_2 com o uso da técnica de EC vêm sendo realizadas desde os anos 1970, mas foi em 1990 que o primeiro sistema foi instalado em uma floresta decídua nos Estados Unidos (WOFSY et al., 1993). Desde então, outros experimentos de longa duração começaram a surgir na América do Norte e Europa.

2.1.3 Limitações da técnica de EC e implicações na estimativa do FLE

Mesmo respeitando todas as hipóteses necessárias para a validade do método EC, há momentos durante um ciclo diário quando torna-se crítico estimar o FLE apenas por FC em função das condições estáveis da atmosfera no local das medidas. Este fenômeno é geralmente observado à noite, quando a camada superior da atmosfera acima do dossel encontra-se mais quente que a inferior, próxima ao solo, ou seja, situação de fraca ou nenhuma turbulência térmica. Durante o período noturno, o ecossistema continua respirando, pois se trata de um processo biótico permanente, cujas taxas podem variar de acordo com as condições de temperatura e umidade, cujo CO_2 emitido pode não atingir o sistema de EC instalado acima do dossel. Por esta razão, o sistema de EC, reconhecidamente, subestima RE durante períodos noturnos em condições de atmosfera estável. Ao amanhecer, com o ressurgimento da convecção térmica, todo o CO_2 emitido pela RE armazenado próximo à superfície durante a noite anterior parte para a atmosfera, desta vez, atingindo o sistema de EC. Como resultado, tem-se a superestimativa de FC nas primeiras horas da manhã. Estes são exemplos clássicos de quando PLE$\neq$ -FLE (FLE=FC). Ao longo prazo (ciclo anual, por exemplo), é possível assumir que a subestimativa de um período compense a superestimativa de outro (BALDOCCHI et al., 2000; BALDOCCHI, 2003), de modo que PLE=-FLE, desde que estes fluxos não tenham escoado para fora da região monitorada e, garantidamente, tenham sido contabilizados pelo EC. Por esta razão, o FLE é estabelecido como FC somado ao termo de armazenamento, que é definido como a variação vertical do [CO_2] no tempo. Por ser um processo permanente, espera-se que RE seja independente da turbulência atmosférica, o que geralmente não ocorre, permitindo a substituição de valores noturnos de FLE quando medidos abaixo de um u_* de corte (u_{*c}) pelo RE estimado, ou seja, FLE=RE à noite.

Em condições mais realistas, as áreas de observação não são planas como idealmente necessário (GOULDEN; MILLER; DA ROCHA, 2006), possibilitando a existência de fluxos bi ou tridimensionais acima e abaixo do dossel, podendo, também, provocar a subestimativa do FLE. Estes fenômenos físicos são caracterizados como processos de transportes advectivos e invisíveis ao EC. No caso da atmosfera, a advecção é definida como o transporte de uma propriedade qualquer pelo escoamento médio do vento em direção ao lugar onde esta propriedade é menos intensa, ou seja, ocorre quando o gradiente desta dada propriedade é não nulo (BALDOCCHI; HICKS; MEYERS, 1988). Podem ocorrer a qualquer hora do dia, em qualquer direção e sentido, porém, é no período noturno que se tornam mais importantes. Nas áreas de relevo complexo, susceptíveis aos escoamentos gerados por aquecimento diferencial

da superfície e forçantes gravitacionais (por exemplo, os ventos anabáticos e catabáticos), os transportes advectivos de CO_2 têm a mesma ordem de grandeza dos fluxos noturnos não-turbulentos e respondem substancialmente pela variância das trocas de CO_2 com o ecossistema, o que é o caso, por excelência, de regiões de vales e montanhas (AUBINET et al., 2000; AUBINET; HEINESCH; YERNAUX, 2003; FINNIGAN, 1999). Desta forma, alternativamente à substituição dos valores noturnos para a correta estimativa do FLE, um volume de controle pode ser considerado e a equação da conservação de massa, após simplificações criteriosas (FINNIGAN, 1999; FINNIGAN et al., 2003), é reescrita incluindo os termos advectivos, tal que:

$$FLE = \underset{(1)}{\int_0^h \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz} + \underset{(2)}{\int_0^h \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} dz} + \underset{(3)}{\int_0^h \bar{w}(z) \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} dz} + \underset{(4)}{\int_0^h \left(\bar{u}(z) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v}(z) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \partial z} \qquad (8),$$

na qual, o termo 1 representa a variação temporal do armazenamento de CO_2 no perfil vertical (St), o termo 2 representa FC (equivalente à Equação 4, desconsiderando o erro) e os termos 3 e 4 representam os transportes advectivos vertical (A_v) e horizontal (A_h), respectivamente.

2.1.4 FLE na Floresta Tropical Amazônica Brasileira

Mesmo sem a aplicação do EC, Wofsy, Harris e Kaplan (1988) apresentaram os primeiros estudos, para uma área de abrangência, do comportamento ecofisiológico da floresta tropical amazônica associado a ciclos diurnos do perfil vertical da concentração de CO_2 (de 0 a 2000 m) em conjunto com medidas de fluxo de CO_2 do solo. Com quatro dias de dados obtidos em julho e agosto de 1985, observaram o acúmulo de CO_2 durante a noite, seguido por declínio da concentração até valores mínimos à tarde. As maiores concentrações ocorreram entre a superfície e 6 m, e uma camada tendendo a homogênea até 30 m de altura. A absorção de CO_2 foi estimada com base na variação da concentração de CO_2 na coluna vertical, entre 8 e 13 horas, chegando ao valor médio diário de -2,8 $\pm$1,2 kg C $ha^{-1}h^{-1}$. Assumindo o valor mínimo de -1,6 kg C $ha^{-1}h^{-1}$ e fazendo a equivalência anual apenas para avaliar a ordem de grandeza, esta fixação corresponderia a -5 Mg C $ha^{-1}ano^{-1}$.

Com 55 dias de medidas obtidas com EC, separados em estação seca (1992) e chuvosa (1993), Grace et al. (1995) calibraram um modelo capaz de simular processos de interação biosfera-atmosfera e estimaram uma fixação anual de -1,4 Mg C. Para o cálculo do FLE,

foram considerados o FC e armazenamento. Durante as manhãs, eram notáveis os pulsos de CO_2 em direção à atmosfera, associados ao início dos processos turbulentos convectivos. O dia seguia com o decaimento da concentração até o novo anoitecer, quando a atmosfera era comumente calma (sem turbulência). As maiores taxas de fotossíntese ocorriam nas primeiras horas da manhã que antecediam o pico da irradiância solar; às 16 horas, o FLE era nulo. A preocupação com eventuais fluxos noturnos promovidos por resfriamento e drenagem já existia, entretanto, não foram verificados. A respiração noturna foi avaliada comparando-a com medidas de câmaras instaladas no solo, troncos e folhas. Emissões de carbono foram contabilizadas e associadas a um período de 11 dias, quando a atmosfera permaneceu nublada, com a presença de vento anômalo e temperaturas baixas. Baseados em seus resultados, argumentaram a importância do FLE potencial anual da região amazônica (5×10^{12} m^2), que seria de -560.000 Mg C.

Três anos mais tarde, Malhi et al. (1998) realizaram o primeiro experimento de longa duração, utilizando EC e armazenamento para a quantificação do FLE. Contando com um ano de medidas, iniciadas em setembro de 1995, tinham o objetivo de entender a funcionalidade ecofisiológica da floresta amazônica. Diferentes dinâmicas foram observadas no CO_2 armazenado, que era eliminado nas manhãs posteriores às noites calmas (u_* inferior a 0,1 m s^{-1}). A sazonalidade do FLE noturno mostrou-se pouco expressiva, com valores médios de 6,46 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (mesmo valor encontrado por Grace et al., 1995), ao contrário do observado durante os dias. Argumentaram fortes indícios do controle da umidade do solo na sazonalidade do FLE. Os maiores valores ocorreram no período chuvoso (picos em torno de -21 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$). Além das estimativas da RE pelo FLE noturno, o valor de 6,9 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ foi obtido por meio da curva de resposta do FLE à luz, com pontos de compensação do ecossistema e saturação à irradiância solar incidente de 80 e 600 W m^{-2}, respectivamente. Os dados foram medidos em 54% do ano e, associados a um modelo numérico calibrado para aquele ecossistema, o FLE estimado foi de -5,9 Mg C $ha^{-1}ano^{-1}$. Os autores, ao comparar seu resultado com o obtido por Grace et al. (1995), sugeriram que a alta assimilação poderia ser uma resposta do ecossistema às possíveis mudanças climáticas ou a algum distúrbio local recente, como enchentes, queimadas ou secas, por exemplo, ou ainda, a algum erro não aparente nas medidas.

Enquanto os trabalhos anteriores indicavam a região amazônica como potencial absorvedora de carbono, anos mais tarde, Saleska et al. (2003) chegaram a resultados de FLE positivo em seus estudos realizados em dois locais próximos no leste amazônico, ou seja,

emissão de carbono do ecossistema à atmosfera estimado com 83% de 3 anos de dados de FC e armazenamento, a partir de julho de 2001. Seus resultados foram confirmados com medidas biométricas de diferentes fontes e períodos de monitoramento. Subestimativas do FLE noturno também foram observadas e, neste caso, corrigidas em função do u_*. A sazonalidade do FLE com fixação no período seco, controlada pela umidade do solo, mostrou-se oposta a resultados de modelos e àquela observada por Malhi et al. (1998). Segundo os autores, os modelos limitam a fotossíntese pela precipitação, enquanto que a RE respondeu fortemente à precipitação. Este foi o primeiro trabalho com uso de EC que indicou perda de carbono à atmosfera (1,3 Mg C $ha^{-1}ano^{-1}$), cujo efeito seria oposto e indicaria grande assimilação, caso não fossem aplicadas correções nos fluxos noturnos. Este resultado foi associado à prevalência das emissões por decomposição de madeira morta (resultante de um episódio recente de alta mortalidade) à fotossíntese, apesar da alta taxa de crescimento da vegetação. A resposta da área de abrangência do EC relacionada a eventuais distúrbios foi discutida, pois, em larga escala, torna-se extremamente complicada a validade da representatividade espacial, uma vez que os sítios experimentais tendem a ser representativos de áreas não perturbadas, potencializando superestimativas de absorção de carbono quando tais distúrbios são negligenciados.

Uma abordagem importante foi dada por Miller et al. (2004) na estimativa do FLE também composto por FC e armazenamento sobre uma área de floresta amazônica. Este trabalho baseou-se em 95% de dados coletados em um ano, a partir de julho de 2001, e mostrou que as correções por u_* nos fluxos noturnos pode inverter o sinal do FLE, passando a área de fonte para sumidouro. A melhor estimativa do FLE foi calculada usando $u_* = 0,2$ m s^{-1}, sendo que valores inferiores ocorreram em cerca de 70% do todo o período noturno. Como nos trabalhos já citados, comportamentos semelhantes do FLE noturno também foram verificados, além de sua sazonalidade (FLE noturno maior no período chuvoso). A magnitude do armazenamento noturno de CO_2 mostrou-se comparável ao FC, salientando sua importância. Argumentaram também os processos biológicos como sendo independentes à turbulência, pois emissões foram medidas com câmaras de solo, mesmo em condições de estabilidade atmosférica. Os autores sugeriram que os transportes de CO_2 para fora da área de observação foram responsáveis pela redução do FLE noturno, invisível ao EC. As falhas dos fluxos noturnos foram preenchidas sazonalmente e sua melhor estimativa foi de + 0,4 Mg C $ha^{-1}ano^{-1}$, ou seja, a floresta mostrou-se praticamente neutra durante o período das medidas. Este resultado foi corroborado pelos inventários de monitoramento biométrico, pois não

seriam suficientes apenas as medidas micrometeorológicas para estimar o FLE, dada a grande incerteza em função do filtro por u_*. Neste trabalho, também foi feita uma importante observação ao comparar a RE das florestas tropicais com a das florestas de latitudes mais altas, onde o RE é bem menor e, por isso, o efeito da correção por u_* chega a ser até 10 vezes menor.

Procurando por indícios de escoamentos capazes de influenciar na quantificação do FLE, Goulden, Miller e da Rocha (2006) conseguiram inferir padrões de drenagem de ar frio no mesmo sítio experimental estudado por Miller et al. (2004) usando dados de topografia e temperatura de superfície, estimados por imagens de satélite, associados aos dados locais do perfil vertical de vento horizontal, temperatura e concentração de CO_2. Além disso, foi discutida outra forma de avaliar o FLE noturno por meio de seus percentis em relação aos correspondentes gradientes de temperatura vertical (de 64 a 40 m) e u_*. Concluíram que maiores FLE noturnos (acima de 6 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$) estão pouco correlacionados com o gradiente de temperatura e bem correlacionados com o u_*. Por outro lado, o gradiente de temperatura mostrou-se eficiente para identificar períodos com baixos valores de FLE (abaixo de 5 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$). Duas camadas de ar desacopladas foram identificadas. A camada superior, acima de 20 m, concordava com a circulação local de leste enquanto a inferior, sempre estável com relação à superior, movia-se respeitando o gradiente local de topografia, caracterizando drenagem subdossel. O escoamento da camada inferior foi consistente com o esperado para uma massa de ar mais fria em relação ao gradiente topográfico, dirigindo-se para regiões mais baixas. Esses resultados reforçaram ainda mais as evidências de que o EC subestima os fluxos noturnos de CO_2 das florestas tropicais em noites com fraca ou nenhuma turbulência da forma como vêm sendo medidos.

Em um outro trabalho para a mesma região, Hutyra et al. (2008) argumentaram haver evidências de perdas por escoamento baseando-se nas diferenças do comportamento do armazenamento noturno em noites calmas e turbulentas e, por isso, aplicaram correções pelo filtro u_* no FLE noturno.

2.1.5 A estimativa do FLE por técnicas micrometeorológicas e transportes por advecção

Há muitas razões capazes de explicar a subestimativa do FLE noturno quando este é composto apenas pelos fluxos turbulentos (FC) e o termo de armazenamento que corresponde

à formulação da conservação de massa em um volume de controle, guardadas as devidas simplificações para este tipo de aplicação. Limitações técnicas ou ainda o processamento dos dados no cálculo dos fluxos indiscutivelmente colaboram na incerteza das estimativas de troca de CO_2 entre os ecossistemas e a atmosfera. Entretanto, muitos trabalhos apontam os transportes advectivos como sendo os principais responsáveis pela subestimativa do FLE (AUBINET; HEINESCH; YERNAUX, 2003) e, recentemente, também os processos de intermitência (AUBINET, 2008). Por outro lado, a complexidade técnica para medir os fluxos advectivos é um fator de extrema relevância, ora pela configuração do experimento, ora pela própria incerteza dos equipamentos, que chega a ser, por exemplo, da mesma ordem de grandeza dos gradientes de CO_2 (AUBINET; HEINESCH; YERNAUX, 2003). Não há atualmente um protocolo instrumental e geométrico para o monitoramento de processos advectivos capaz de ser utilizado de modo comum pela comunidade científica. Ao considerar a heterogeneidade dos sítios experimentais e suas topografias, às vezes acentuadas, esta questão torna-se ainda mais delicada.

Lee (1998) foi um dos pioneiros na tentativa de quantificar a contribuição dos fluxos advectivos no FLE através de uma aproximação unidimensional da advecção, apenas na vertical, que fosse capaz de, junto com os termos de armazenamento e FC, quantificar as trocas de carbono com medidas feitas em um único ponto. Finnigan (1999) criticou o método justificando que a adição deste único termo poderia ser pior do que não contabilizá-lo, uma vez que as advecções (horizontal e vertical) poderiam anular-se na somatória dos fluxos do FLE.

A aproximação de Lee (1998) foi testada por Baldocchi et al. (2000) que chegaram a bons resultados do FLE noturno no período de crescimento de uma floresta temperada, porém, as medidas feitas com câmaras de solo divergiram das estimativas noturnas durante o inverno, concordando apenas quando a camada superficial era bem homogênea durante o meio dia. O FLE mais realista calculado com a aproximação proposta também concordou com resultados de modelo nas escalas de tempo horária, diurna e anual. Apesar dos sucessos obtidos, os autores não concluíram que o termo de advecção horizontal fosse desnecessário em experimentos realizados sobre relevos complexos.

Durante um período de verão no hemisfério norte, Aubinet, Heinesch e Yernaux (2003) estudaram, sobre uma floresta com superfície inclinada, os transportes advectivos vertical e horizontal com o objetivo de entender quais eram seus controles e magnitudes sob condições de atmosfera estável durante a noite. Verificaram forte correlação entre a

velocidade vertical no topo do dossel e a velocidade superficial em direção ao gradiente topográfico (escoamento gravitacional), mecanismo provavelmente causado por resfriamento radiativo na porção mais elevada da área experimental. Como consequência, um possível entranhamento de ar pelo dossel alterou a concentração de CO_2, que passou a ser diluída na superfície. Esta dinâmica sugeriu fluxos advectivos horizontal e vertical de mesma magnitude com sinais contrários, corroborando o argumento de Finnigan (1999). Os autores concluíram que havia a necessidade da inclusão destes termos nos cálculos do FLE e que, naquele momento, não era possível mensurá-los com a acurácia necessária em função das limitações técnicas e do desenho experimental usado.

A abordagem investigativa de processos advectivos pode ser dada de diversas formas e, dependendo do sítio experimental, é possível estimar estes transportes com medidas em um único nível, desde que o escoamento seja coerente, persistente e organizado em uma escala espacial adequada. Diante destas características em uma floresta dos Estados Unidos, Staebler e Fitzjarrald (2004) conseguiram reduzir as diferenças entre fluxos noturnos de noites com e sem déficit ao incluir os transportes laterais no balanço.

Com o objetivo de investigar a advecção de modo bidimensional e o seu impacto no FLE durante eventos de escoamentos horizontais significativos em uma direção preferencial durante noites estáveis, Marcolla et al. (2005) mostraram que os gradientes verticais de CO_2 são menos intensos e que as camadas de ar sub e sobredossel apresentavam condições de acoplamento (direções do vento similares) em noites instáveis. Na condição de atmosfera neutra ou estável, a camada inferior deslocava-se no sentido do gradiente topográfico. Encontraram também relações entre u_* e as advecções, que contribuíam, da mesma forma, para o FLE em situações de fraca turbulência e de modo compensatório quando $0,3 < u_* < 0,6$ m s^{-1}. Os autores também testaram a aproximação da advecção vertical modelada (LEE, 1998) com a medida, obtendo bons resultados. Concluíram, sobretudo, que a contabilização dos fluxos advectivos é indispensável durante a noite, pois a somatória de todos os termos pode reduzir o FLE a 35% do que seria obtido se calculado apenas com o FC e armazenamento em um ciclo diário, por exemplo. Este trabalho também reforçou o argumento de Finnigan (1999) com relação à correção proposta por Lee (1998), pois as advecções vertical e horizontal não se anulavam durante a noite.

Uma solução proposta como alternativa à soma dos transportes advectivos no FLE é a identificação dos momentos e condições nas quais ocorrem associadas aos fluxos turbulentos. A partir daí, podem os fluxos noturnos obtidos a partir do FC e armazenamento serem

removidos e substituídos por outros julgados válidos por terem sido medidos em condições (neutra ou estável) alheias às perturbações indutoras de medidas errôneas do ponto de vista fisiológico (REBMANN et al., 2010).

No Brasil, os primeiros esforços voltados à investigação de fluxos advectivos foram realizados na floresta amazônica por Tóta (2009). Segundo o autor, os transportes horizontais mais significativos ocorreram até 10 m de altura e durante a noite, sendo responsáveis por cerca de 70% do déficit no FLE. Com relação ao armazenamento, notou que os menores valores ocorreram entre 1 e 6 horas comparados aos observados entre 17 e 22 horas, possivelmente associados à respiração do solo, condição atmosférica, drenagem e estrutura do dossel. Assim como Marcolla et al. (2005), Tóta (2009) notou dependência no sinal da advecção, que era positivo para $u_* < 0{,}55$ m s^{-1} e negativo para valores maiores que este, exercendo importante papel no cálculo do FLE, mesmo com u_* superior ao limite usado no filtro para correção dos fluxos. O empuxo (flutuabilidade) foi eleito o principal mecanismo físico gerador dos escoamentos horizontais noturnos que, quando positivos, contribuíam para a redução do armazenamento na segunda parte da noite.

A questão do acoplamento do vento sobredossel com o vento abaixo dele é constantemente associada a processos advectivos em períodos noturnos (MARCOLLA et al., 2005; FEIGENWINTER et al., 2008; ZERI et al., 2010) em função do entranhamento de ar pelo topo do dossel que promove o empobrecimento do ar em relação ao [CO_2] próximo à superfície. Consequentemente, esta advecção, negativa do ponto de vista físico, deve ser contabilizada como fonte na soma do FLE noturno, assumindo que não há absorção de carbono pela vegetação durante este período.

Como resultado de um grande projeto europeu desenvolvido com foco nos transportes advectivos e intitulado ADVEX, Feigenwinter et al. (2008) compararam três sítios experimentais na Europa onde o mesmo conjunto de instrumentos e metodologia de processamento e análise de dados foram empregados. Os autores concluíram que: i) a advecção vertical é inexpressiva durante o dia como resultado da homogeneidade e difere entre sítios em função do relevo; ii) a advecção horizontal ocorreu principalmente durante a noite e foi positiva para o sítio com superfície inclinada; iii) apesar da magnitude da média destes fluxos ser comparável à dos fluxos turbulentos, a grande dispersão das medidas de advecção não permite que sejam somadas em escala horária aos fluxos turbulentos; iv) o desenvolvimento de um esquema robusto de correção do FLE baseado nos transportes lentos

deve ser específico do site e depende de análises detalhadas para identificação dos processos forçantes da advecção.

Aubinet et al. (2010), ao sintetizarem a produção científica do projeto ADVEX, concluíram que a adição da advecção no balanço de massa não resolve os problemas das medidas noturnas e que um esquema eficaz de medidas seria difícil de conceber. Nos três sítios investigados, o FLE integrado por setores de direção do vento não apresentou coerência após a inclusão destes transportes lentos na soma, além dos valores noturnos obtidos terem atingido patamares irreais (35 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$), tomando como referência a respiração do ecossistema, ou, até mesmo, comportarem-se como absorvedor durante a noite. Finalmente, ao incorporarem a advecção no FLE em função do u_* por setor de vento, constataram que, para quatro de seis setores, o potencial sumidouro foi inalterado ou, ainda, amplificado.

2.2 Materiais e métodos

2.2.1. Sítio experimental

O sítio experimental está estabelecido na microbacia do Ribeirão Casa de Pedra (Figura 1, ~1,2 km^2) sobre área perturbada por corte há aproximadamente 40 anos (MEDEIROS, 2009), altitude de 900 a 1000 m, definida entre 23°17' a 23° 24' S, e 45°03' a 45°11' W, no Núcleo Santa Virgínia/Parque Estadual da Serra do Mar/Instituto Florestal de São Paulo. O PESM foi legalizado em 1977 e possui núcleos administrativos para cuidar de 315 mil há. Cobre de SP até o sul do RJ (Itariri), sendo a maior porção contínua preservada de Mata Atlântica do Brasil. A Serra do Mar é uma região de relevo de escarpas com típica borda de planalto, nivelada pelo topo em altitudes de 800 a 1200 m (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). O Núcleo Santa Virgínia cobre as cidades de São Luiz do Paraitinga (70%), Cunha (20%) e Ubatuba (10%). Possui aproximadamente 5 mil ha de extensão, predominantemente cobertos por floresta ombrófila densa montana (VELOSO; RANGEL FILHO; LIMA, 1991), com escarpas e reversos da Serra do Mar sobre o Planalto de Paraitinga – Paraibuna, marcada por morros e vales que se alternam em amplitudes de até 100 m. A temperatura média anual varia de 22,5° C na costa (de 19° C, no inverno, a 25° C, no verão) até 21° C no planalto. Possui precipitação anual entre 2500 mm (setor leste e oeste na baixada, com clima tropical superúmido) até 1500 mm (setor central, em direção ao planalto, com clima tropical subúmido). A estação seca estende-se de junho a agosto com precipitação sempre superior a 60 mm /mês (SETZER, 1966). Sobre uma floresta com altura média de dossel 18 m acima do

solo, a direção do vento predominante no Núcleo Santa Virgínia tem distribuição bimodal, de sudeste (associado à brisa marítima e frentes frias) e de norte-noroeste (associado ao centro de alta pressão do Atlântico subtropical em grande escala).

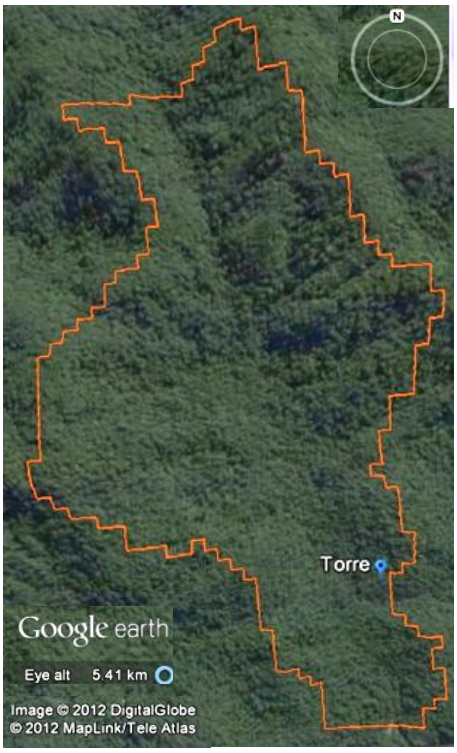

Figura 1 - Imagem de satélite (Google Earth) com delimitação da microbacia de estudo pela linha branca e pontos vermelhos. A localização da torre micrometeorológica é indicada pelo quadrado (23° 17' a 23° 24' S e 45° 03' a 45° 11' W)

2.2.2. Equipamentos e variáveis monitoradas

A implementação da plataforma experimental (Figura 2) teve início em novembro de 2007 com a instalação dos equipamentos em uma torre triangular de 60 m de altura e seção lateral de 1 m, que será referenciada como TEC a partir de agora. Os sensores que compõem a estação meteorológica automática e o sistema de medidas de fluxos turbulentos estão apresentados na Tabela 1 (instalados a 60 m acima do solo).

Tabela 1 - Sensores instalados na torre micrometeorológica a 60 (* 63) metros acima do solo

Item	Sensor	Variável
1	Rebs Q-7.1	Saldo de radiação
2	Kipp-Zonen CM 3	Irradiância solar incidente
3	Kipp-Zonen CM 3	Irradiância solar refletida
4	Kipp-Zonen PAR Lite	Irradiância fotossinteticamente ativa incidente
5	Kipp-Zonen PAR Lite	Irradiância fotossinteticamente ativa refletida
6	Hydrological Servs TB4	Precipitação
7	Vaisala HMP 45C	Umidade relativa e temperatura do ar
8	LiCor LI 7500 *	Concentração de CO_2, H_2O e pressão atmosférica
9	CSI CSAT-3 *	Velocidade tridimensional do vento

Um gerenciador de tarefas e coletor de dados (Campbell Scientific CR1000) é responsável pela interrogação, realização das medidas e armazenamento dos dados. Apenas as concentrações de vapor d'água, CO_2, componentes vetoriais do vento e temperatura do anemômetro sônico tridimensional são registradas em alta frequência (10 Hz). Para as demais variáveis, médias de 10 minutos são calculadas e armazenadas.

Figura 2 - Torre micrometeorológica com instrumentação instalada desde novembro de 2007 na microbacia do Ribeirão da Casa de Pedra, Núcleo Santa Virgínia, São Luiz do Paraitinga – SP

As medidas do analisador de gás por infravermelho e o anemômetro sônico tridimensional são empregadas nos cálculos das médias de 30 minutos dos fluxos de FC, obtidos por meio da técnica de EC.

Medidas de [CO_2] (Tabela 2) para estimativa do armazenamento vertical e transportes advectivos são realizadas por um analisador de gás de caminho fechado cujas amostras são aspiradas simultaneamente por duas bombas de alta vazão (ligadas por 2 minutos, a cada 30 minutos) e permanecem armazenadas no tubo até o momento da medida. Posteriormente, cada linha de amostragem é selecionada por uma eletroválvula e, com o auxílio de uma segunda bomba de menor vazão (5 l m^{-1}), analisada por 1 minuto. Apenas os 20 segundos "centrais" são utilizados para o cálculo da média representativa do [CO_2] de cada respectivo ponto. O ciclo se repete a cada 30 minutos e, desta forma, as medidas podem ser consideradas simultâneas, pois referem-se ao momento quanto foram tomadas as amostras. Três vezes ao dia, o sistema recebe gases de referência com concentrações conhecidas para avaliar seu

desempenho. Tanto o controle das eletroválvulas como a coleta dos dados de vento horizontal são realizados por gerenciadores de tarefas e coletor de dados independentes (Campbell Scientific CR1000).

As medidas de vento horizontal e [CO_2], necessárias para o cálculo dos fluxos advectivos horizontais, são provenientes de um conjunto de 16 anemômetros sônicos bidimensionais e 16 tomadas de ar, respectivamente. Estes foram dispostos de modo a definir um volume de controle (pontos na vertical e horizontal) por meio de três torres auxiliares, além da TEC. Em cada uma delas, os pares de elementos (anemômetros e tomadas de ar) estão posicionados a 1.5, 6.5, 11.5 e 25.0 m acima do solo. As torres auxiliares serão referenciadas como TA (a leste de TEC), TB (a nordeste de TEC) e TC (a sudeste de TEC).

A Tabela 2 apresenta os elementos sensores do sistema de medidas de perfil vertical de [CO_2] e advecção.

Tabela 2 - Sensores utilizados nas estimativas do armazenamento vertical e fluxos advectivos

Item	Sensor	Variável
1	Windsonic	Anemômetro sônico bidimensional (16 unidades)
2	LiCor 7000	Concentração de CO_2

2.2.3. Fluxos turbulentos

Com medidas de alta frequência (10 Hz) de [CO_2] vento vertical e vapor d'água a 63 m acima do solo (2008 a 2010), foram calculados os fluxos turbulentos em pós-processamento (rotina em linguagem FORTRAN; Osvaldo M. R. Cabral – comunicação pessoal) no laboratório por meio da correlação entre as variações em torno da média (blocos de 30 minutos) da componente vertical do vento e dos escalares de interesse (equação 4). Em função de limitações do sistema de medidas, as amostragens dos elementos (w, [CO_2], q e T) não são simultâneas e para maximizar a covariância entre as flutuações, as séries temporais são defasadas no cálculo, de modo a compensar este atraso relativo entre amostragens das variáveis. Esta correção é conhecida com *lag correction* (ZERI, 2008). Alterações termodinâmicas e/ou na composição do ar também afetam medidas de concentração de gases. A diferença de densidade do ar causada pela variação da quantidade de vapor d'água e/ou aquecimento/resfriamento entre parcelas de ar que atravessam o analisador de gás de caminho aberto também afetam a medida do [CO_2]. Para que a variação da densidade molar do CO_2 fosse corretamente medida, a correção proposta por Webb, Pearman e Leuning (1980) foi

aplicada. Além destas perturbações fisico-químicas inerentes às medidas feitas como neste trabalho, o relevo e posicionamento horizontal inexato do anemômetro sônico podem provocar o surgimento de velocidades verticais aparentes. A correção deste efeito foi realizada com rotações das coordenadas dos eixos das componentes do vento aplicada nas médias de 30 minutos, alinhando algebricamente o escoamento médio do vento com os eixos do sensor (WILCZAK; ONCLEY; STAGE, 2001; KVON RANDOW et al., 2004; ZERI, 2008).

Os dados foram filtrados segundo critérios de bom funcionamento do analisador de gás. Medidas feitas uma hora antes ou após a ocorrência de chuva, além daquelas realizadas durante a chuva, também foram excluídas. Após a remoção dos valores médios obtidos em condições inadequadas, foram ainda removidas, das 24.149 médias, outras frações de 3,5% das caudas superior e inferior (7% no total) consideradas não representativas. Deste modo, cerca de 22.500 médias foram utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Filtragens relacionadas às condições de turbulência noturna serão discutidas adiante. Hipoteticamente, 52.608 valores médios existiriam caso ocorresse um aproveitamento de 100% dos dados neste período.

2.2.4. Armazenamento vertical

O armazenamento vertical é representado pelo primeiro termo na Equação do balanço de massa (Equação 8), corresponde à variação do [CO_2] desde a superfície até o nível de referência *h* em um intervalo de tempo. Foi calculado por meio da média móvel centrada de três pontos (MORGENSTERN et al., 2004; CABRAL et al., 2011) das diferenças finitas entre medidas sucessivas e integrado na altura de forma ponderada pelas espessuras das camadas verticais de acordo com a representatividade de cada nível de amostragem (VON RANDOW et al., 2004; CABRAL et al., 2011). Os níveis utilizados nestes cálculos são os mesmos usados em $A_{v.}$

O período de medidas do armazenamento estendeu-se de março a dezembro de 2010 (com exceção dos meses de maio e agosto). Para os anos anteriores, foram estimados por meio de ajustes lineares (1. diurno: das 7 às 18 horas; 2. noturno: demais horários) com as médias de 30 minutos de [CO_2] obtido pelo analisador de gás de caminho aberto instalado no topo da torre.

2.2.5. Preenchimento de falhas do FLE

2.2.5.1. Períodos diurnos

A clara relação entre a irradiância solar e o FLE de uma floresta já foi extensamente discutida e utilizada como mecanismo de preenchimento na ausência de medidas diurnas (GOULDEN et. al., 1996; MALHI et al., 1998; GOULDEN et al., 2004; HUTYRA et al., 2008; CABRAL et al., 2011). Esta relação tem comportamento hiperbólico e seus coeficientes representam a máxima eficiência fotossintética do dossel (A_{max}), o seu rendimento (γ) e a média da respiração noturna do ecossistema ($\overline{RE}$) como intercepto da curva (POWELL et al., 2008; CABRAL et al., 2011), tal que (Equação 11):

$$FLE = \frac{\gamma A_{\max RFA_i}}{\gamma RFA_i + A_{\max}} + \overline{RE} \qquad (11)$$

As curvas de resposta à luz permitiram preencher lacunas de FLE durante o dia, de acordo com cada um dos quatro momentos separadamente: períodos seco e chuvoso, intervalos matutino e vespertino. As regressões foram realizadas com médias de 30 minutos, sendo removidos 5% das caudas superior e inferior do FLE pertencentes a intervalos de RFA_i de 130 μmol m^{-2} s^{-1}, aceitos a partir de 10 μmol m^{-2} s^{-1}.

2.2.5.2. Períodos noturnos

Em diversos trabalhos, a RE usada para a substituição de valores noturnos (faltantes ou discrepantes) foi estimada por meio de uma relação exponencial entre a temperatura do solo e as medidas consideradas válidas do FLE noturno (GOULDEN et. al., 1996; MALHI et al., 1998). Outros autores relacionam ainda a temperatura do ar e umidade do solo para a mesma inferência (POWELL et al., 2008; CABRAL et al., 2011). Souza Neto et al. (2011) constataram forte relação da respiração do solo apenas com a temperatura do solo nesta mesma área de estudo, o que permitiu o mesmo tipo de ajuste em função da temperatura do ar, considerando que 60% de RE é proveniente do solo (LUYSSAERT et al., 2009). Na regressão exponencial, *a* e *b* são os coeficientes relativos a cada período (Tabela 5) e T_{ar} é a temperatura do ar (POWELL et al., 2008; CABRAL et al., 2011) (Equação 12).

$$RE = a * e^{bT_{ar}} \qquad (12)$$

As regressões foram realizadas através do *lookup table* dos dados de temperatura com seus valores médios de FLE correspondentes.

Outra forma utilizada seguiu a metodologia de Hutyra et al. (2008). Os valores noturnos faltantes ou obtidos em condições de baixa turbulência tiveram como origem a média de FLE de dias anteriores e posteriores, distribuídos ao redor do dado faltante por meio de conjuntos de valores que variou de tamanho, atingindo, no máximo, 31 dias, de acordo com o necessário para o preenchimento do valor temporalmente centrado no referido conjunto.

2.2.6. Transportes advectivos

2.2.6.1. Advecção horizontal

A advecção horizontal (A_h) (setembro a novembro de 2010) foi calculada de duas formas distintas. A primeira delas (A_{hP}), baseada em Feigenwinter, Bernhofer e Vogt (2004), estima os gradientes de [CO_2] nas direções x e y, para os 4 níveis verticais, através de uma equação de plano (Apêndice) diferente para cada nível a cada passo de tempo (30 minutos). As medidas usadas foram obtidas em TEC, TA e TB apenas quando todas as variáveis envolvidas em todos os níveis existiam. As caudas superior (2.5%) e inferior (2.5%) do conjunto de dados, consideradas discrepantes, foram removidas.

É evidente, mas importante ressaltar, que esta interpolação pressupõe superfícies planas para a determinação dos gradientes d [CO_2]/dx e d [CO_2]/dy, o que poderia ser diferente, caso estes valores fossem obtidos por meio de algoritmos capazes de gerar superfícies curvas utilizando as medidas em 4 pontos espacialmente distintos.

A segunda forma de estimativa dos gradientes horizontais foi feita com a diferença do [CO_2], para cada nível e tempo, sendo $[CO_2]_{(TA)}$ - $[CO_2]_{(TEC)}$ para d [CO_2]/dx e entre $[CO_2]_{(TB)}$ - $[CO_2]_{(TC)}$ para d [CO_2]/dy (Tabela 3 e Figura 3) e deu origem a A_{hE}. A remoção de valores discrepantes foi aplicada da mesma forma, assim como a condição de existência dos dados no caso de A_{hP}.

Tabela 3 - Posição relativa e desnível entre torres assumindo a base de TEC como altura zero em um sistema cartesiano de referência

Torre	x(m)	y(m)	z(m)
TEC	00.0	00.0	00.0
TA	49.8	04.4	23.0
TB	17.1	47.0	05.0
TC	41.0	-28.7	14.0

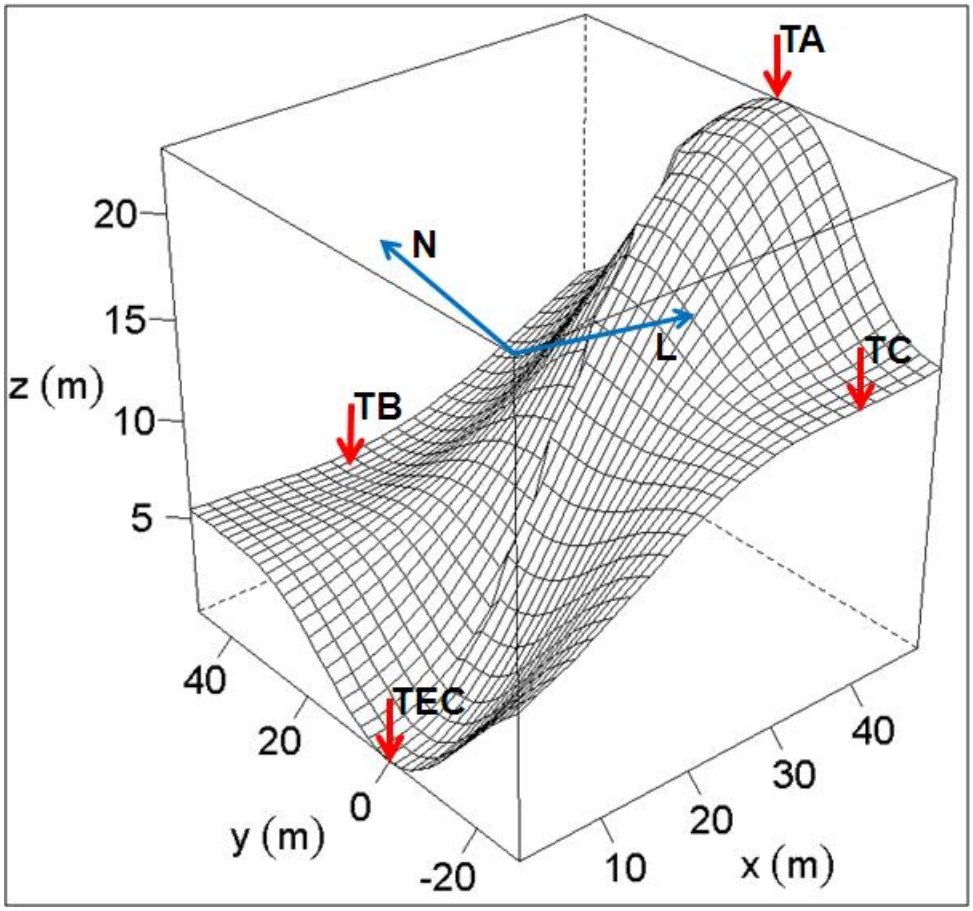

Figura 3 - Projeção das torres segundo interpolação pelo inverso do quadrado das distâncias das suas posições e alturas relativas em um sistema cartesiano (Tabela 3) onde a grade (células de 2 x 2 m) da superfície representa o solo. Flechas vermelhas indicam a posição das torres no volume e flechas azuis indicam a orientação geográfica

Em ambos os casos, foram utilizadas as componentes médias do vento horizontal medido em cada torre participante da composição dos gradientes horizontais na estimativa do A_h. As medidas foram feitas a 1.5, 6.5, 11.5 e 25.0 m acima do solo e serão referenciadas, quando necessário, como N1, N2, N3 e N4.

O sinal deste termo (A_h) foi adotado de acordo com Feigenwinter et al. (2008). Ao empobrecimento da camada, atribui-se um valor positivo, pois a remoção do [CO_2] por este termo não representa assimilação no balanço de massa e deve ser compensado com a soma de igual valor no FLE. A interpretação é análoga quando seu valor é negativo, pois o enriquecimento não representa uma fonte de [CO_2] da mesma forma.

2.2.6.2. Advecção vertical

A advecção vertical (A_v) corresponde ao terceiro termo da Equação 8 e representa um dos elementos no balanço de massa. Em uma aproximação proposta por Lee (1998), A_v é obtida através do produto entre fração residual da velocidade do vento vertical (w_r) e a diferença entre [CO_2] de referência (c_h) medido no topo da torre (altura de referência h) e o [CO_2] médio (c_m) ponderado pela altura de amostragem do [CO_2] no perfil vertical ($c(z)$), de modo que:

$$F_v = w_r(c_r - c_m) \quad (9),$$

$$c_m = \frac{1}{h}\int_0^h c(z)\,dz \quad (10),$$

na qual w_r representa a diferença entre o vento vertical medido e o estimado por meio de regressões lineares entre o vento vertical (variável independente) e o vento horizontal (variável dependente) para cada setor de 10º, de 0 a 360º. Este procedimento é adotado com o objetivo de remover, da componente vertical do vento, os efeitos da topografia e inclinação do sensor (LEE, 1998; MARCOLLA et al., 2005).

Composto por 8 níveis, o perfil vertical de [CO_2] foi amostrado a 0.4, 1.0, 1.5, 5.0, 9.0, 25.0, 40.0 e 59.0 m acima do solo.

O sinal deste termo foi adotado de acordo com Feigenwinter et al. (2008), significando empobrecimento da camada quando o valor é positivo e vice-versa, pois a análise com relação a sua contribuição no balanço de massa é análoga ao A_h.

3 RESULTADOS

Os resultados mostram as análises realizadas para o período entre os anos de 2008 a 2010. Períodos específicos serão destacados quando necessário. Todos os gráficos apresentados foram gerados utilizando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

3.1 Variáveis Climáticas

A estação seca correspondeu ao encontrado na literatura (SETZER, 1966), entre junho e agosto (Figura 4 e Figura 5) e não houve período superior a 11 dias consecutivos sem chuva. Os totais precipitados para 2008 e 2009 foram de 1990 e 2997 mm, respectivamente. O Ano de 2009, além de ter sido o mais chuvoso, concentrou o maior volume precipitado no segundo semestre (Figura 5). Com uma falha de 07 de janeiro a 05 de fevereiro, em 2010, seu total acumulado subestimado foi de 2549 mm.

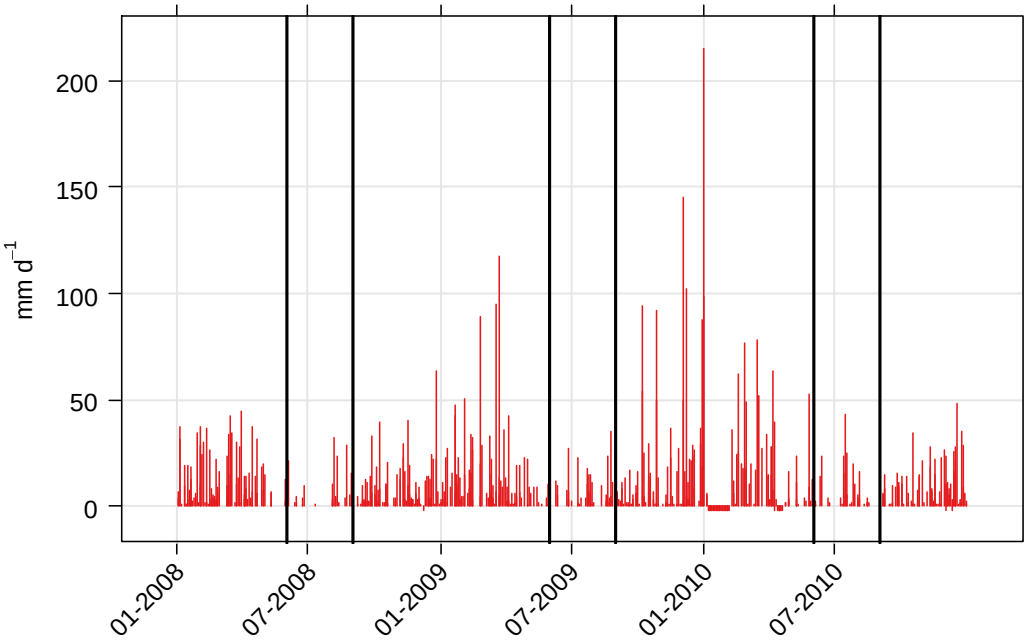

Figura 4 - Totais diários de precipitação (mm d^{-1}) de 01-01- 2008 a 31-12-2010. As faixas estreitas delimitadas pelas linhas pretas compreendem os períodos secos (de 01-06 a 31-08 de cada ano). Dados ausentes estão representados por valores negativos

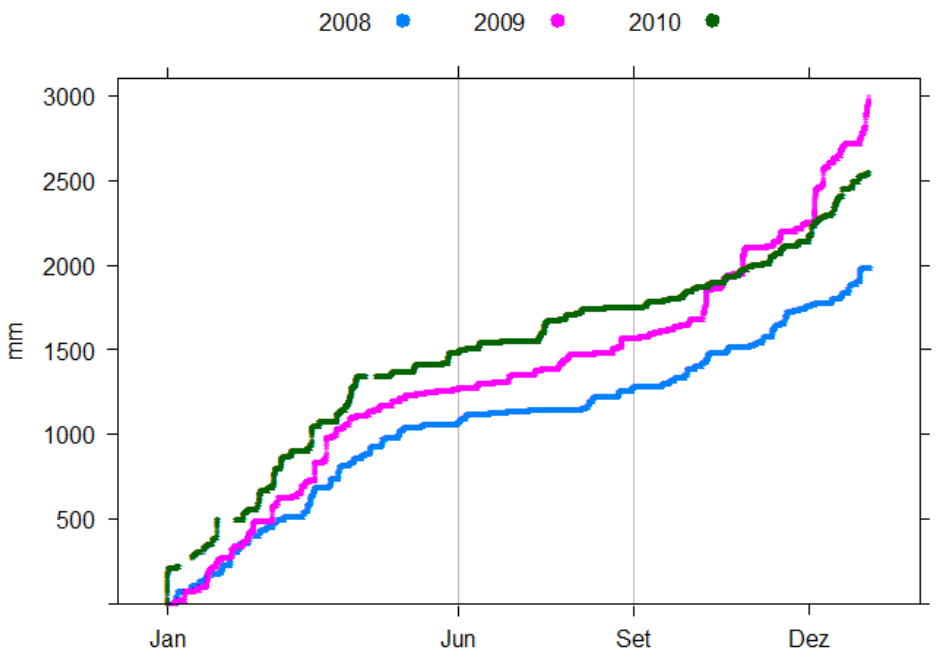

Figura 5 - Precipitação total acumulada nos anos de 2008 a 2010. As linhas verticais delimitam o período seco (de 01 de junho a 31de agosto)

A umidade específica q (Figura 6d) representa a massa de água presente na atmosfera em relação à massa de ar e mostra a marcante sazonalidade entre o período seco e chuvoso. Da mesma forma, a variação anual do ciclo solar no hemisfério sul em latitudes subtropicais foi observada na radiação solar incidente (K_i) (Figura 6a). Esta energia é redistribuída ao atingir a superfície terrestre e parte dela, transformada em energia térmica (radiação de onda longa), cuja sazonalidade também foi notada na temperatura do ar (T_{ar}) (Figura 6b). A pressão atmosférica à superfície (P_{atm}), que tem o centro de alta pressão semipermanente do Atlântico Sul deslocado em direção ao continente durante o inverno, também decorrente do ciclo anual da distribuição de energia no globo terrestre, é apresentada na Figura 6c. Todas as variáveis mostraram-se muito bem correlacionadas.

As médias mensais de q, K_i e T_{ar} oscilaram entre 8.0 e 13.5 g/kg, 120 e 200 W m^{-2} e 12 e 19º C, respectivamente, para os períodos seco e chuvoso. P_{atm}, com valores mais elevados no período seco, variou entre 89.4 e 90.4 kPa, coerente com as demais variáveis.

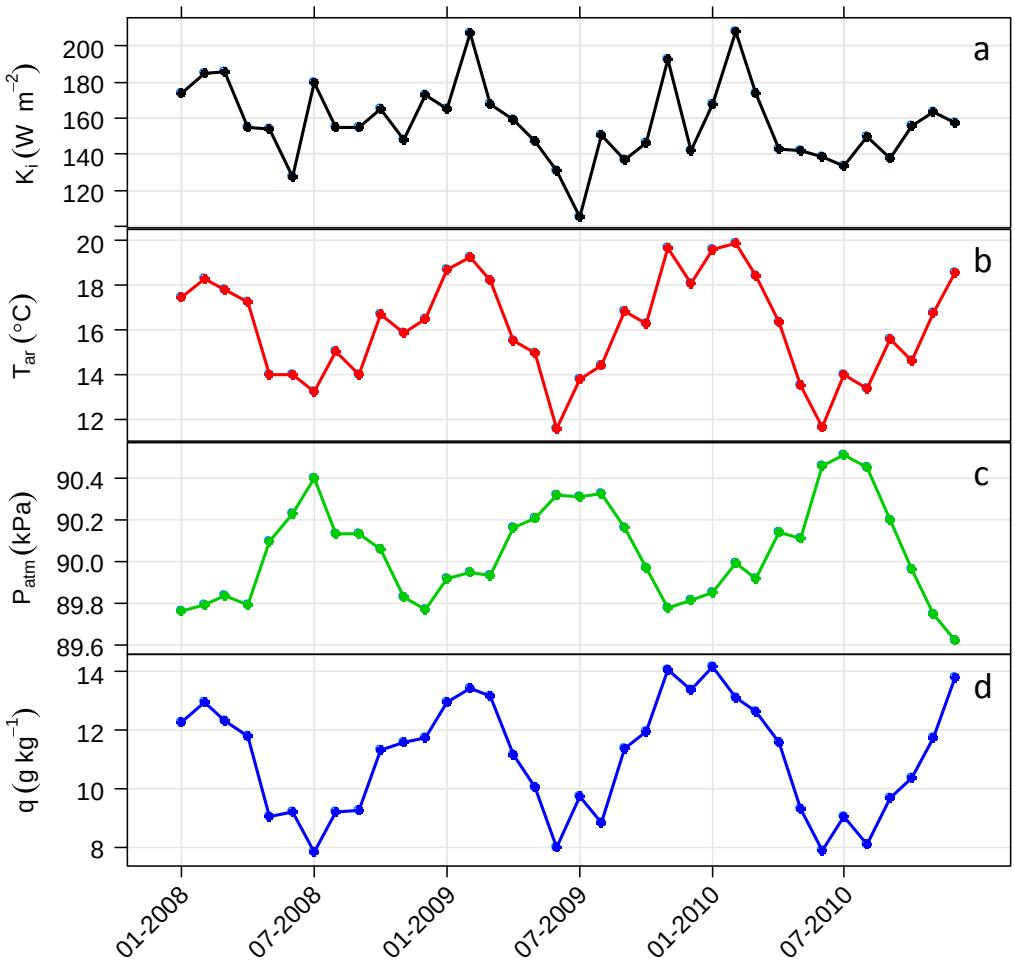

Figura 6 - (a) médias mensais da radiação solar incidente (K_i); (b) temperatura do ar (T_{ar}); (c) pressão atmosférica (P_{atm}) e (d) umidade específica (q) para os anos de 2008 a 2010

O comportamento anual do vento horizontal pode ser visto na Figura 7 e reflete a composição dos diferentes fenômenos meteorológicos que influenciam a circulação. O sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul é o elemento de grande escala que atua na região Sul e Sudeste do Brasil e produz vento de nordeste em baixos níveis. Este vento muda para noroeste, sudoeste e sudeste à medida que uma frente fria (sistema de mesoescala) se aproxima e se desloca em direção ao Norte (CAVALCANTI et al., 2009). Além destes fenômenos, efeitos locais de circulações de brisa continente-oceano e/ou vale-montanha também afetam a circulação. Separados em diurno e noturno para os períodos seco e chuvoso, nota-se baixa ocorrência de vento do setor limitado entre sul-sudoeste e norte-noroeste na Figura 7 comparado ao vento proveniente das demais direções, concordando com a literatura

(CAVALCANTI et al., 2009). Os ventos de leste podem estar associados a fatores locais e/ou a eventos de transição entre predominância dos diferentes fenômenos atuantes.

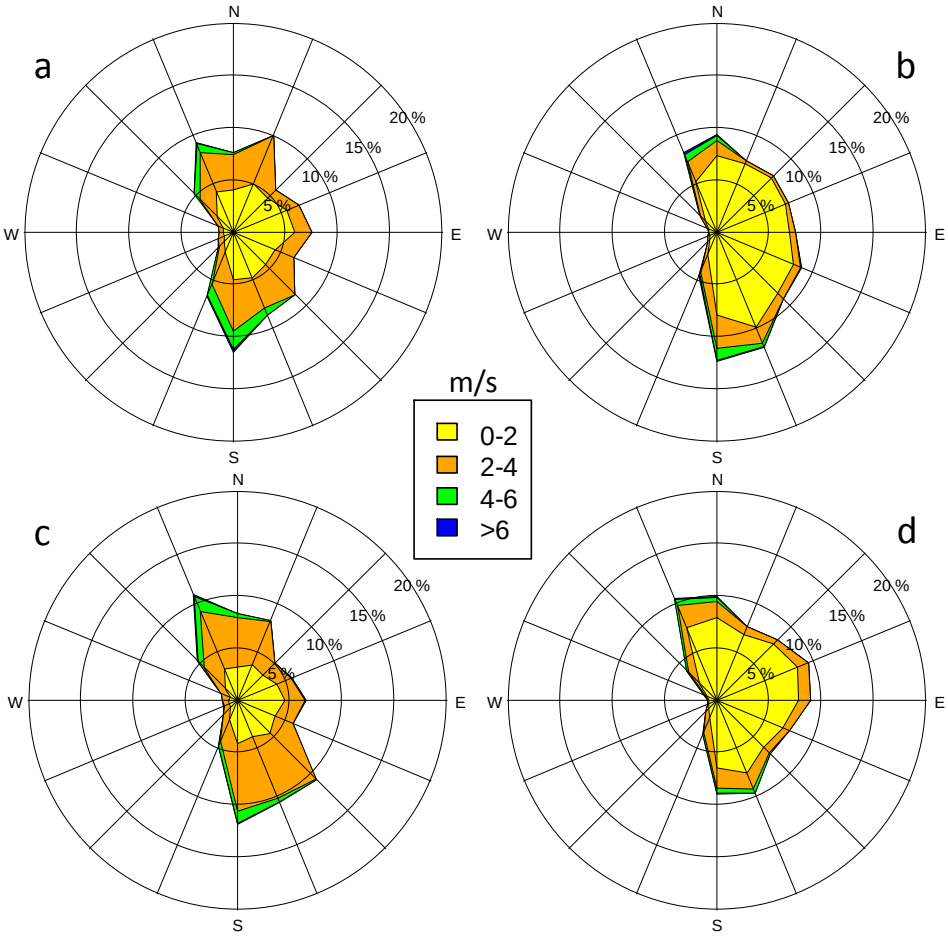

Figura 7 - Rosa dos ventos (médias de 30 minutos). No topo: período seco diurno (a) e noturno (b); na base: período chuvoso diurno (c) e noturno (d)

Ventos de menor intensidade (até 2 m s^{-1}) ocorreram em maior quantidade no período noturno, distribuídos entre norte, leste e sul, com maior predominância de leste no período chuvoso em relação ao seco. Os mais fortes (entre 2 e 4 m s^{-1}), durante o dia, predominaram na direção norte-sul e com volume ligeiramente maior durante o período chuvoso quando comparado ao seco.

3.2 Os fluxos turbulentos de [CO_2] e a radiação fotossinteticamente ativa

Com o objetivo de avaliar qualitativamente FC nas diferentes condições climáticas e discutir seu padrão sazonal, não foram excluídos valores negativos noturnos segundo critérios de turbulência mecânica. Aproximadamente 22.500 médias de 30 minutos (de 2008 a 2010)

compõem a Figura 8, a qual mostra a resposta ecofisiológica da floresta por meio da variação da amplitude de FC entre o período seco e chuvoso. A figura sugere que durante o período chuvoso houve maior atividade metabólica, quando a respiração e a fotossíntese provavelmente foram maiores do que no período seco. A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é uma forçante de expressiva importância no ciclo anual da produtividade das florestas, assim como a temperatura e a oferta de água. Grande parte desta energia que atinge a vegetação (RFA_i) é por ela aproveitada e uma pequena fração é refletida à atmosfera (RFA_r) em função do albedo, determinado pelas características intrínsecas da superfície, e que podem variar no tempo. O mesmo ocorre com K, que também divide-se em fração incidente (K_i) e refletida (K_r).

Como se trata de uma razão, o albedo RFA (α_{RFA}= RFA_r/RFA_i) pode diminuir tanto com o aumento da fração de energia incidente (RFA_i) quanto com a diminuição da fração refletida (RFA_r), ou, ainda, com ambas simultaneamente. As médias diurnas mensais do α_{RFA} mostraram clara sazonalidade e variaram de 4 a 5% do período chuvoso (fevereiro) ao seco (julho) com a maior atividade metabólica da floresta no período chuvoso (Figura 8 e Figura 9). Excluindo 2010, por problemas com K_i neste ano, e calculados nas mesmas condições de RFA, o albedo K (α_K) variou entre 18.3 a 19.9 %. Os mínimos ocorreram no final do período seco (agosto) e os máximos, entre novembro e janeiro, durante o período chuvoso. Ollinger et al. (2008) encontraram em florestas temperadas e boreais maiores taxas de assimilação de [CO_2] associadas a valores mais elevados de α_K e nitrogênio no dossel. A senescência arbórea e consequente mudança de coloração, perda das folhas, variação do conteúdo de nitrogênio na folha e exposição da superfície do solo à superfície solar são características relacionadas à variação do albedo. Apesar do padrão invertido entre α_{RFA} e α_K, estes fatores, combinados de forma exclusiva, podem ser os responsáveis pela defasagem entre os albedos, pois o máximo do α_{RFA} ocorreu dois meses antes do mínimo do α_K .

Na Figura 10 estão as médias diurnas das frações incidente e refletida do RFA e mostra que tanto a redução de RFA incidente quanto a redução da sua refletância ocorreram no período seco. Então, as alterações do α_{RFA} tiveram como participantes tanto o ciclo anual do RFA_i como a sazonalidade das características espectrais da superfície que ocorreram no sentido de reduzir RFA_r no período seco, o que pode ter ocorrido simplesmente por uma questão de menor reflexão associada ao ângulo de incidência de RFA_i. Desta forma, o aumento de α_{RFA} no período seco tem a redução de oferta desta energia como sua maior forçante.

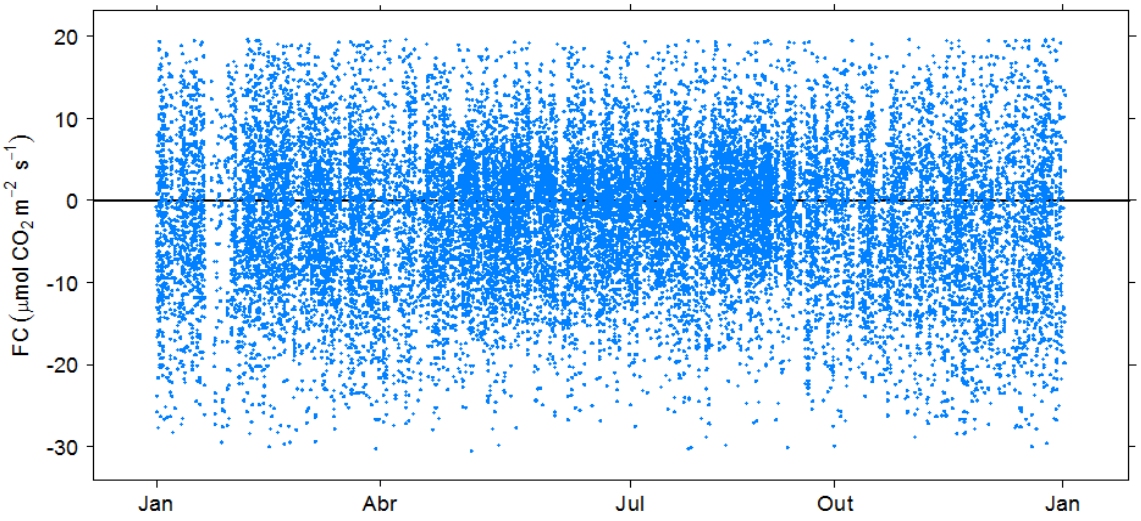

Figura 8 - Sazonalidade dos fluxos turbulentos de [CO_2] em médias de 30 minutos com dados de 2008 a 2010

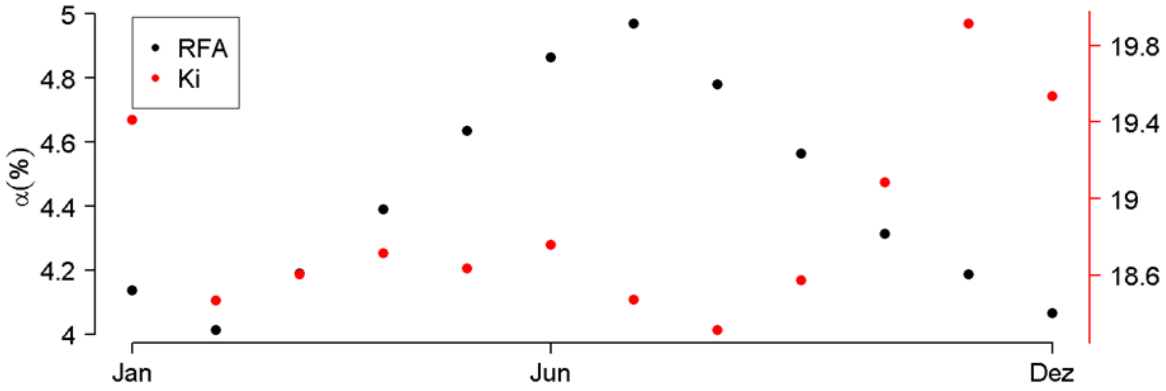

Figura 9 - Médias diurnas mensais (quando RFA ≥ 10 μmol m^{-2} s^{-1}) dos albedos RFA (2008 a 2010) e K (2008 e 2009)

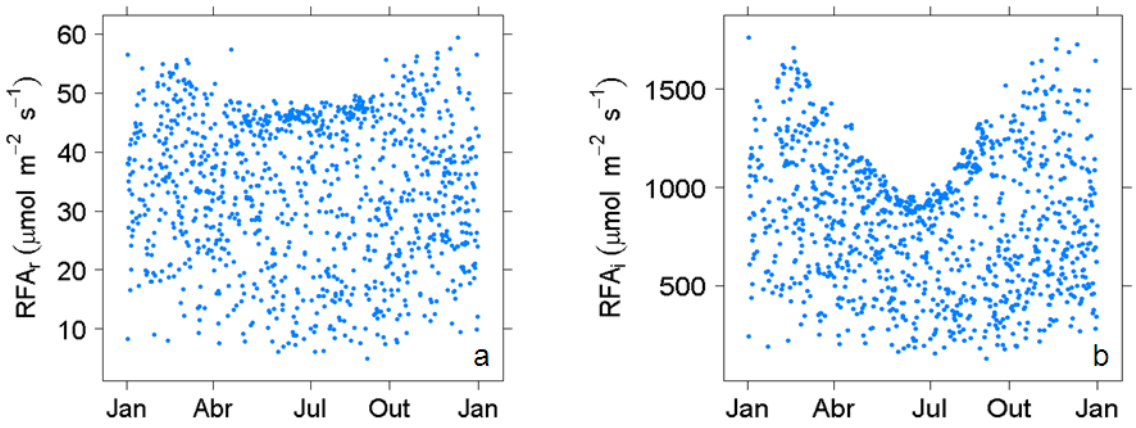

Figura 10 - Médias diurnas (quando RFA ≥ 10 µmol m^{-2} s^{-1}) entre 2008 a 2010 das RFA$_r$ (a) e RFA$_i$ (b)

As médias diurnas do RFA$_i$ variaram de 1700 a 900 µmol m^{-2}s^{-1} do período chuvoso ao seco, paralelamente o RFA$_r$ variou de 58 para 48 µmol m^{-2}s^{-1}, ou seja, uma contribuição ao aumento do α_{RFA} de 47% por parte do RFA$_i$, que diminuiu, contra o comportamento contrário de RFA$_r$ ao aumento de α_{RFA}, que também diminuiu aproximadamente 17% no período seco (Figura 10).

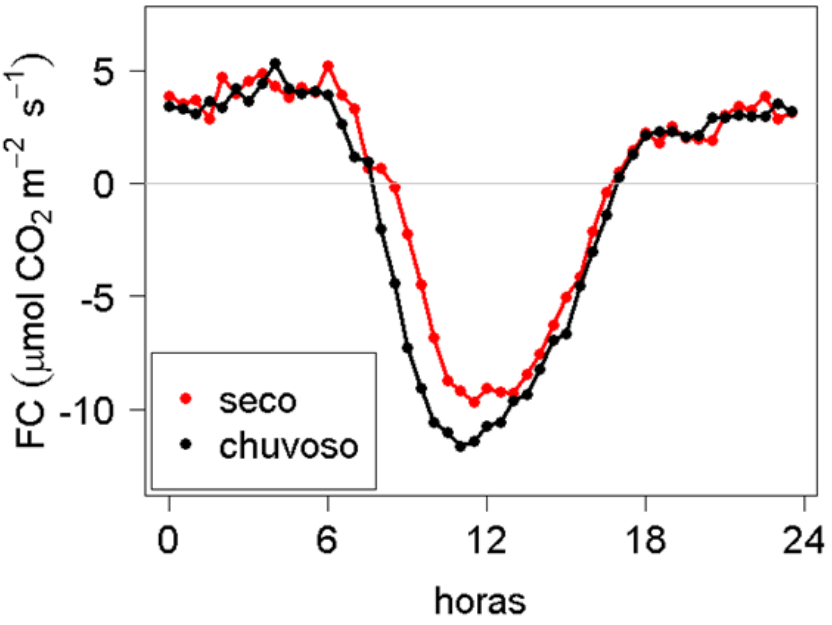

Figura 11 - Ciclo médio diário de FC para os períodos seco e chuvoso

Como consequência às variações sazonais das forçantes descritas, a resposta ecofisiológica da floresta pode ser mostrada por meio dos ciclos médios diários de FC para as estações seca e chuvosa na Figura 11. As diferenças entre o período seco e chuvoso revelam-

se durante o dia. O momento de compensação (quando a fixação iguala-se à fonte e FC é nulo) ocorre próximo das 7h30min no período chuvoso, uma hora antes do mesmo processo no período seco. O mínimo de FC (-11.6 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$) ocorre meia hora antes (11 horas) no período chuvoso e começa a diminuir até inverter seu sinal novamente às 17 horas, em ambos os casos. A discreta diferença entre os máximos absolutos de FC nos dois períodos, segundo seus padrões médios diários, ocorreu durante o dia e foi de 2 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, quando a assimilação no período seco foi de -9.6 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$.

3.3 O armazenamento vertical de [CO_2] - St

A camada limite superficial atmosférica separa a superfície do solo da atmosfera superior e pode experimentar diferentes estados durante um ciclo diário. Em condições de estabilidade ou neutralidade (fraca ou nenhuma turbulência), St passa a ter extrema importância no balanço de massa (Equação 8), pois contabiliza o [CO_2] noturno que foi lançado à atmosfera pela respiração do solo e das plantas, quando existentes, e não atingiu o sistema de medidas de vórtices turbulentos (EC). Ao entardecer, com o início da primeira parte da noite, o seu valor fica positivo e tende a aumentar, pois RE, apesar de depender da temperatura, presume-se não cessar. Os transportes lentos discutidos adiante podem explicar a redução do St na segunda parte da noite, o que biologicamente não faz sentido. Ao amanhecer, torna-se abruptamente negativo com o empobrecimento da camada subdossel disparado pela turbulência térmica devido ao aquecimento da superfície com o surgimento do Sol. Este foi o padrão do ciclo médio diário do armazenamento observado, St_o e ajustado, St_m em ambos os períodos, seco e chuvoso.

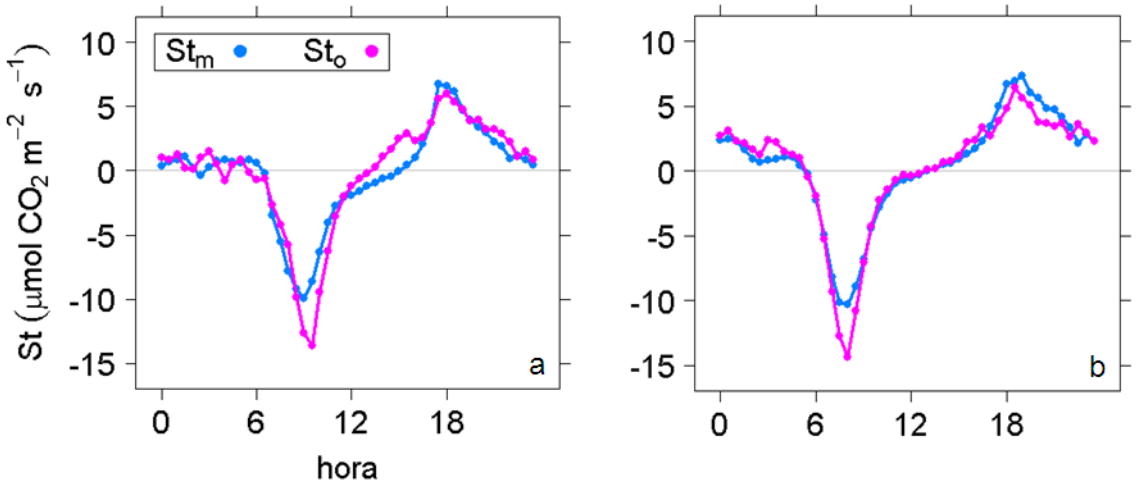

Figura 12 - Ciclo médio diário dos armazenamentos ajustados (St_m) e observados (St_o) para os períodos seco (a) e chuvoso (b). St_m resultou de medidas de 2008 a 2010 com período seco de junho a agosto e período chuvoso com os demais meses; St_o foi observado durante o ano de 2010. Período seco: de 19 de junho a 07 de julho; período chuvoso não inclui meses de janeiro, fevereiro e maio de 2010 (períodos faltantes por falha de energia)

A Figura 12 apresenta os ciclos médios diários dos armazenamentos St_o, em 2010, e St_m, para todo o período. Ambos os padrões e magnitudes são comparáveis aos encontrados na literatura para a floresta amazônica (MALHI et al., 1998; HUTYRA et al., 2008; DE ARAÚJO et al., 2010). Apesar da aparente subestimativa dos picos negativos ao amanhecer entre St_o e St_m (diferença absoluta de 4 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$), este resultado permitiu a utilização de St_m para as estimativas do balanço anual de carbono no contexto deste estudo.

3.4 *A* composição do FLE por meio do FC e St

De acordo com a literatura, a estimativa do FLE deve ser realizada com a soma de FC e St (Equação 8, termos 1 e 2), pois a atmosfera em condições reais não permanece horizontalmente homogênea em um ciclo diário e o FLE passa a depender em grande parte de St, principalmente durante a noite. Neste trabalho, St mostrou-se importante também durante o dia ao ser comparado com o FC.

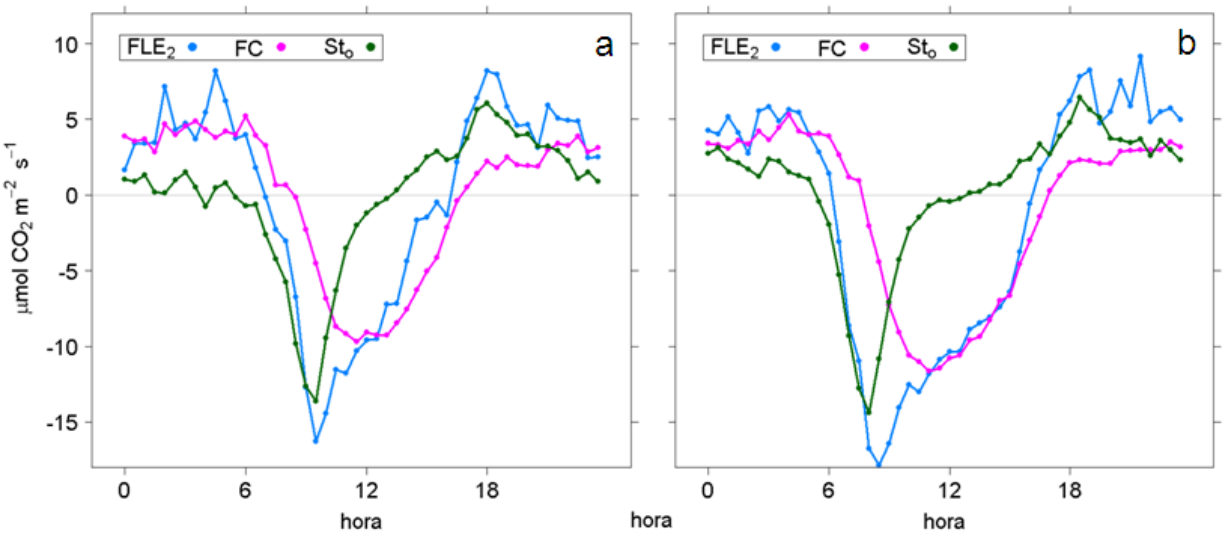

Figura 13 - Ciclos médios diários para os períodos seco (a) e chuvoso (b) com dados observados de 2010 do fluxo líquido do ecossistema (FLE_2), fluxo turbulento (FC) e armazenamento (Sto)

A Figura 13 mostra St_o e FC compondo FLE_2, e duas diferenças são observadas ao comparar-se ao apresentado por de Araújo et al. (2010). A primeira delas refere-se ao pulso de compensação característico de St_o, que não é notado pelo EC ao amanhecer. Uma provável explicação seria a altura do EC, instalado a 63 m sobre um dossel de 20 m o que implicaria medir ar mais homogêneo por ter ascendido o dobro da altura do dossel até atingir o EC. Na floresta amazônica, estas medidas são realizadas aproximadamente até 60 m acima do solo sobre florestas de dossel de 30 a 40 m (HUTYRA et al., 2008; DE ARAÚJO et al., 2010), entretanto a ausência deste pulso de compensação também foi notada em Hutyra et al. (2008). A segunda diferença está relacionada com a inversão do sinal de St_o, que, neste caso, ocorreu antes das 14 horas e na floresta amazônica, a partir das 14 horas. Esta diferença possivelmente se explica pela diferença de estrutura e maior dimensão da camada fotossinteticamente ativa na Amazônia onde a respiração e a assimilação podem ocorrer de maneira mais heterogênea e lenta, simultaneamente, em diferentes extratos em função do alcance e disponibilidade do RFA_i (GOULDEN et al., 2004). O estrato fotossintético desta floresta de mata atlântica tem cerca da metade da dimensão daquela estudada por Goulden et al. (2004), Hutyra et al. (2008) e de Araújo et al. (2010) e do ponto de vista aerodinâmico, pode oferecer menos resistência ao movimento das massas de ar quando ascendem ou descendem. O valor de St_o maior no início da primeira parte comparado à segunda parte da noite também foi observado nos dois últimos trabalhos citados, cujas possíveis causas serão discutidas adiante.

O período diurno de fixação do FLE mostrou ser maior durante o período chuvoso e também com maior amplitude em função do St_o. O período seco do FLE, apesar de ter sido

obtido com 15 dias, entre junho e julho de 2010, mostrou ser diferente do chuvoso, corroborando a sazonalidade esperada de acordo com a Figura 15.

Como as medidas de St_o ocorreram apenas em determinados períodos de 2010, St_m foi utilizado por coerência na estimativa das séries preenchidas de FLE para os três anos. FLE_1, obtido com FC e St_m, e o FLE_2, calculado com medidas diretas (de FC e St_o) para o ano de 2010, são comparados na Figura 14 por meio dos seus ciclos médios diários mensais que apresentaram boa concordância, com ressalva para os meses de abril e setembro, em função dos valores observados mais dispersos, porém, com amplitudes médias coerentes. Os valores noturnos foram notavelmente maiores na segunda parte da noite em março, novembro e dezembro. Nos meses secos (junho e julho), esses valores foram mais próximos durante toda a noite. A subestimativa do pico de fixação de FLE_1 ao amanhecer em março, abril e setembro está relacionada com a estimativa do St_m (item 3.3).

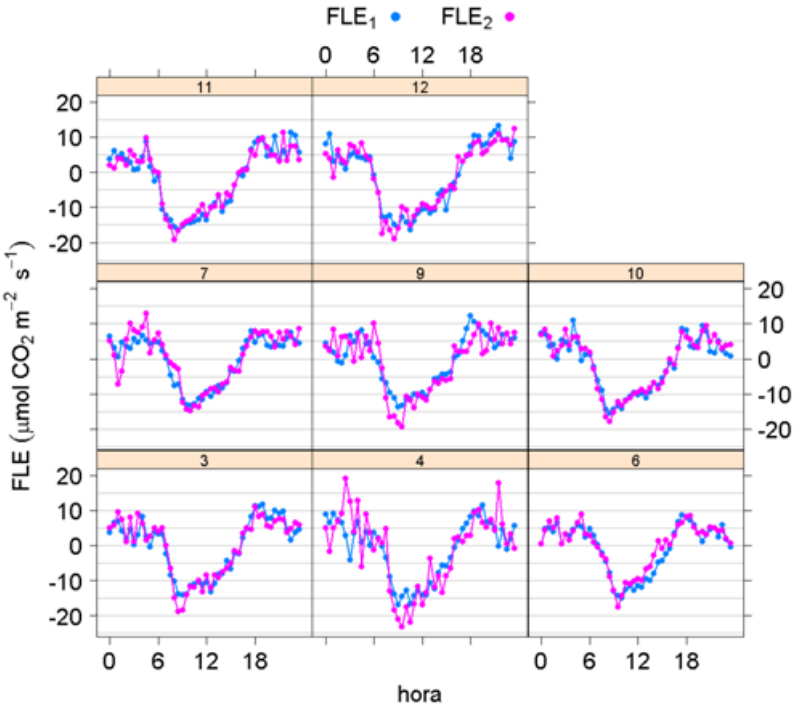

Figura 14 - Ciclo médio diário mensal do FLE_1 (com St_m) e FLE_2 (com St_o) para os meses 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, e 12 de 2010

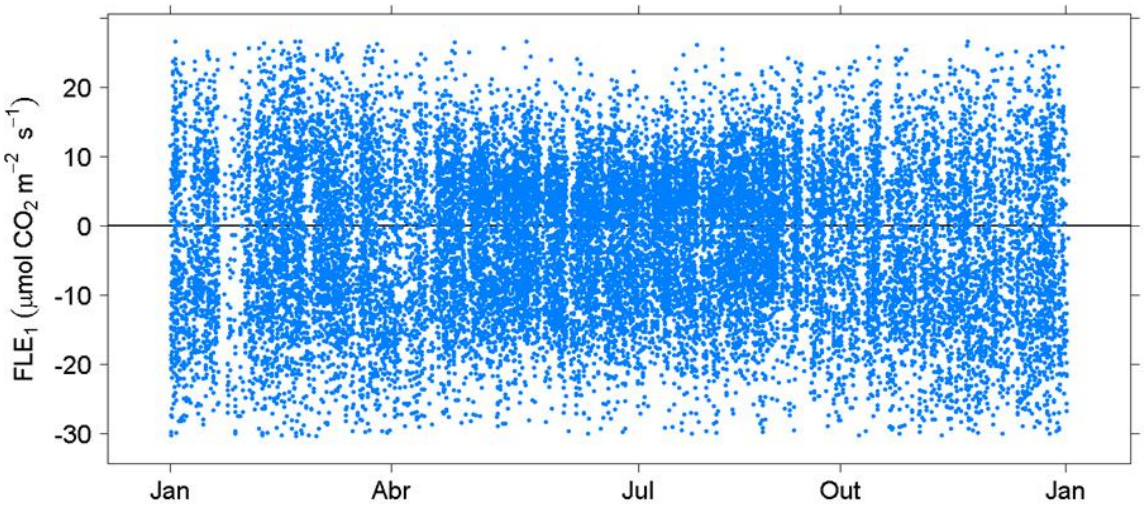

Figura 15 - Sazonalidade do FLE_1 em médias de 30 minutos com dados de 2008 a 2010

Assim como no FC, a mesma sazonalidade com maior amplitude foi observada no FLE_1 (Figura 15), o que permitiu ajustes de curvas de FLE_1 em resposta à luz e de FLE_1 como RE noturno em função da temperatura do ar para o preenchimento de falhas. FLE_1 adiante será referenciado apenas por FLE.

3.5 Curvas de dependência luminosa

Ajustadas para intervalos vespertinos e matutinos durante os períodos seco e chuvoso, as curvas de resposta luminosa mostraram-se distintas, bem definidas, apesar da notável dispersão, e o seu padrão foi similar ao observado em outras florestas (GOULDEN et al., 1996, 2004; MALHI et al., 1998). Goulden et al. (1996) argumentaram que processos fisiológicos determinantes da fotossíntese, a variabilidade de RE e a heterogeneidade espacial podem explicar a grande variância de FLE em relação à RFA_i. Com maior absorção desta floresta durante as manhãs ($RFA_i \geq 10$ até 11h30m), foi no período chuvoso que o FLE atingiu seus valores máximos. O deslocamento da curva para valores mais positivos à tarde foi capaz de diminuir o FLE (valores absolutos) em, aproximadamente, 5 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (menor absorção), além de RE, que também aumenta notavelmente (Figura 16, Tabela 4).

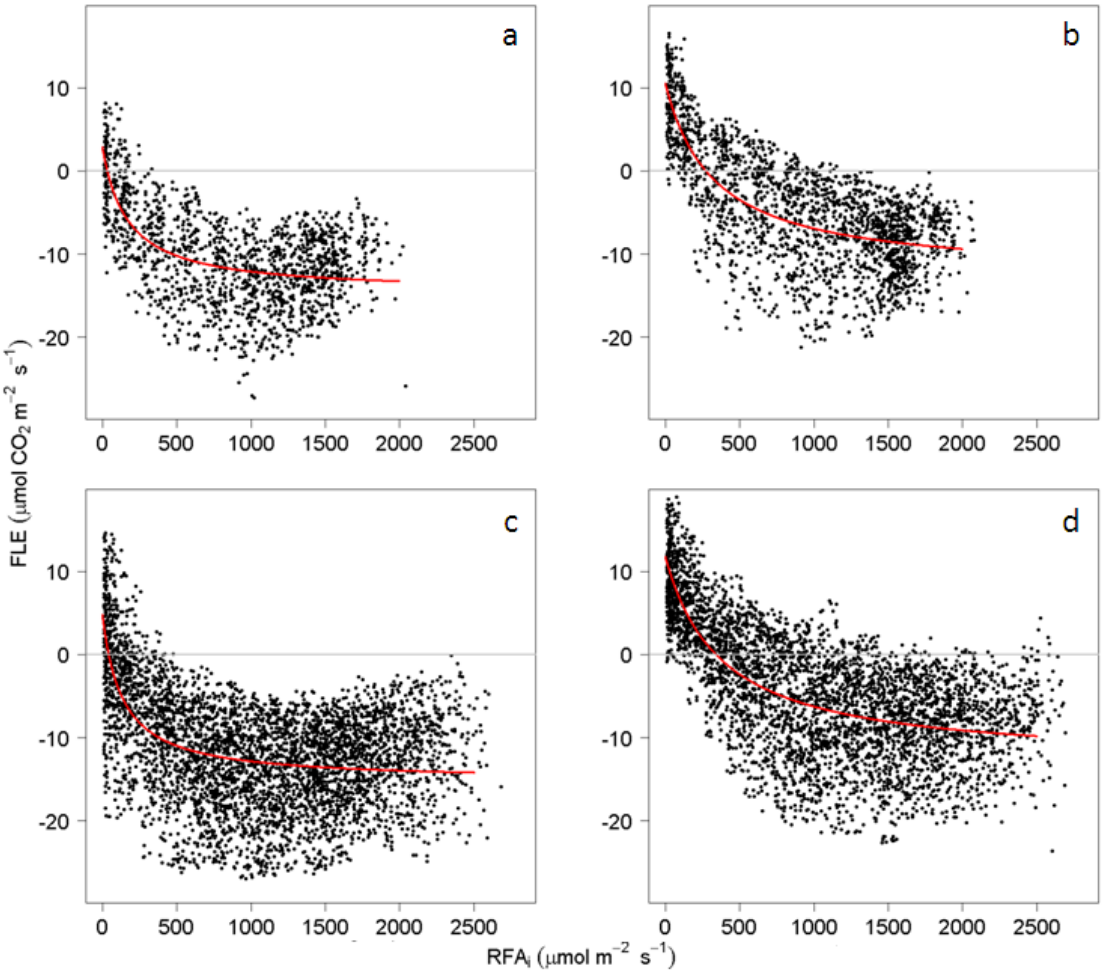

Figura 16 - Médias de 30 minutos de FLE em função de RFA_i para períodos seco (a e b) e chuvoso (c e d), matutino (a e c) e vespertino (b e d). $RFA_i \geq 10$ µmol m^{-2} s^{-1} e intervalo matutino até 11h30min. A linha vermelha refere-se à hipérbole ajustada em cada caso

O ponto de compensação matutino ocorreu quando RFA_i atingiu valores próximos de 33 e 43 µmol $m^{-2}s^{-1}$ (saturação ~500 µmol $m^{-2}s^{-1}$ em ambos), com RE correspondentes a 2.9 e 4.9 µmol $m^{-2}s^{-1}$ nos períodos seco e chuvoso, respectivamente (Figura 16a e c, Tabela 4). Para as tardes, o FLE passou de fonte para sumidouro, quando RFA_i alcançou, no período seco, 270, e no chuvoso, 340 µmol $m^{-2}s^{-1}$ (saturação ~1000 µmol $m^{-2}s^{-1}$ em ambos). RE também foi maior: 10.6 e 11.8 µmol $m^{-2}s^{-1}$ para os períodos seco e chuvoso, da mesma forma (Figura 16b e d, Tabela 4). Para a floresta amazônica, Goulden et al. (2004) também encontraram comportamentos distintos de dependência luminosa para o período anterior e posterior às 11h30min, com RE 8% maior à tarde. Para este caso da mata atlântica, os aumentos em RE foram de 365 e 240% nos períodos seco e chuvoso, respectivamente, o que não se explica através da grande dispersão de FLE. A Tabela 4 compara a mudança dos comportamentos das curvas segundo seus coeficientes.

Tabela 4 - Tabela com os coeficientes das curvas de resposta à luz do FLE para os períodos seco e chuvoso, manhã e tarde. Valores em μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Significância estatística com P(>|t|) < 0.001

	Seco		**Chuvoso**	
	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
γ	-0.1041	-0.0706	-0.1486	-0.0658
$\mathbf{A_{max}}$	-17.5754	-23.2389	-20.0812	-24.9110
$\overline{RE}$	2.9308	10.5876	4.8577	11.8436

Em síntese, as curvas sugerem um forte controle da RFA_i no FLE, indicando maior atividade metabólica da floresta no período chuvoso, com maior absorção na parte da manhã e maior respiração na parte da tarde. A saturação à tarde mostrou ocorrer com RFA_i duas vezes maior que a observada na mesma condição durante a manhã, tanto no período seco como no chuvoso. Comportamentos semelhantes já foram observados em diferentes sítios experimentais da floresta amazônica (MALHI et al., 1998; GOULDEN et al., 2004).

3.6 RE, FLE noturno e implicações do u_*

Encontram-se diferentes valores de u_{*c} na literatura, pois dependem massivamente das características de cada sítio experimental.

Os valores de FLE noturnos utilizados para o teste de determinação de u_{*c} foram todos os observados na Figura 15, quando RFA_i foi inferior a 10 μmol $m^{-2}s^{-1}$, sem restrição quanto ao sinal ou magnitude. Souza Neto et al. (2011) mediram a respiração do solo nesta mesma área de estudo em 2007, cujos valores em março e julho foram de 4.5 e 2.4, respectivamente, e média anual de 3.4 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$. Considerando que 60% de RE tem o solo como origem (LUYSSAERT et al., 2009), os valores de FLE noturnos poderiam ser restringidos entre 2 e 11.25 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, ou seja, 50% acima do máximo e abaixo do mínimo de RE assumido como possível ($7{,}5 \leq RE \leq 4{,}0$ μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$). Esta escolha eliminaria qualquer fator alheio à fisiologia, porém, real, que atue nos processos de trocas noturnas e forçaria a substituição de valores de FLE noturno fora destes limites.

A metodologia para a determinação de u_{*c} foi a mesma utilizada por Saleska et al. (2003), que o definiu como a mediana do u_* associada ao valor médio de FLE,

estatisticamente diferente do anterior e estatisticamente igual aos posteriores, desde que apresentassem comportamento crescente.

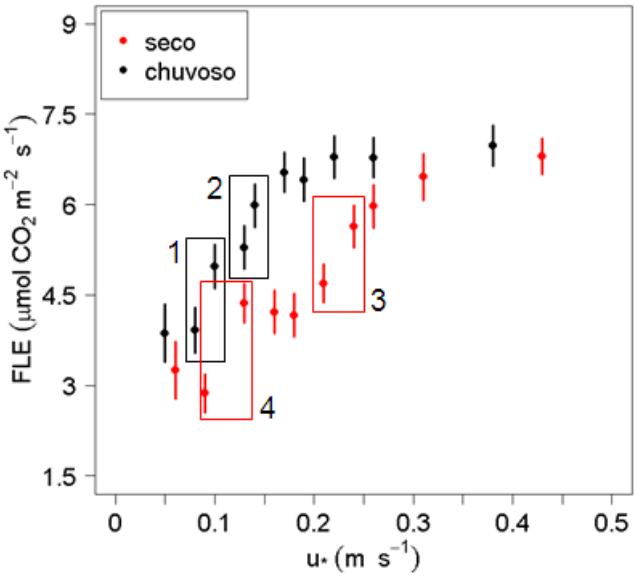

Figura 17 - Valores médios de FLE noturno associados à respectiva mediana dos quantis de 10% de u_*. Retângulos indicam u_* associados às respectivas médias de FLE estatisticamente diferentes segundo teste-*t* (1 e 3: $P < 0.05$; 2: $P < 0.17$; 4: $P < 0.001$). Barras indicam erro padrão

A Figura 17 mostra o u_{*c} para os períodos seco e chuvoso como sendo 0.24 e 0.14 m s^{-1}, respectivamente. Embora haja notória diferença entre eles, ambos estão relacionados a valores médios iguais de FLE, considerando os erros padrão associados (5.6 ± 0.4 e 6.0 ± 0.4 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$), o que elege u_{*c} = 0.14 m s^{-1} para o período chuvoso, uma vez que o teste estatístico também foi satisfeito com u_* = 0.1 m s^{-1} (retângulo 1, Figura 17). O FLE médio para u_* = 0.13 m s^{-1} no período seco (retângulo 4, Figura 17) não é sucedido por valores crescentes, o que penaliza sua escolha. Entretanto, também se iguala ao FLE médio de período chuvoso quando u_* = 0.10 m s^{-1}, mas adotá-los como u_{*c} seria menos realista e equivalente a assumir RE da mesma magnitude, lembrando que apenas a respiração do solo pode emitir 4.5 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$.

A Figura 14 mostrou que o FLE noturno tende a ser maior na primeira (quando RFA_i < 10 μmol $m^{-2}s^{-1}$ até 23h30min) e menor (a partir da 0 hora, enquanto RFA_i < 10 μmol $m^{-2}s^{-1}$) na segunda parte da noite, o que se explica primeiramente pelo fato de a temperatura do ar continuar diminuindo até o amanhecer do dia seguinte. Coincidentemente, em cada período, mudanças na circulação também podem ocorrer, atuando paralelamente na alteração do [CO_2] com implicações diretas no FLE. Supondo que o empobrecimento de [CO_2] tenha ocorrido em condições mais quentes em função da circulação e o efeito prevaleça sobre as emissões em

função da temperatura, a temperatura assumiria agora uma relação empírica com o FLE e não mais fisiológica. Além da baixa correlação entre ambos, a Figura 18 mostra que em 59% dos 392 casos (30% do total de 785 casos), o FLE obtido com vento entre sudeste e sudoeste (135 a 225º) está associado predominantemente a temperaturas entre 15 e 20º C, evidência de que o RE não está necessariamente diminuindo por causa da temperatura.

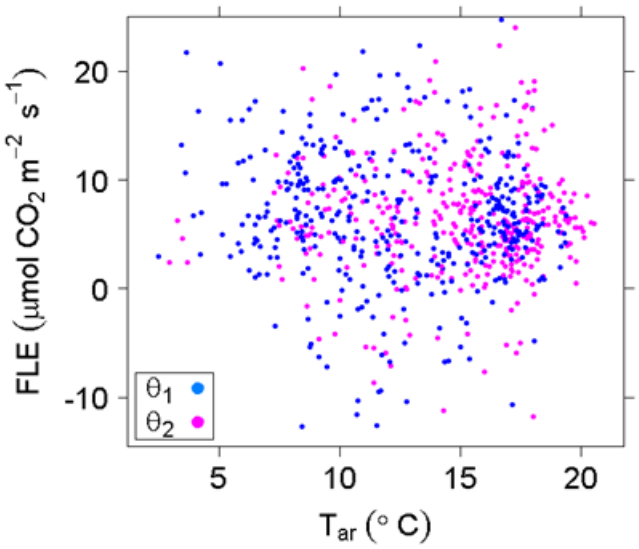

Figura 18 - Médias de 30 minutos do FLE em função da temperatura do ar para a segunda parte da noite durante o período seco. θ_1 corresponde ao FLE com vento entre 135 e 225 º e θ_2, com vento das demais direções

Por meio das médias noturnas, considerando u_{*c} para todas as regressões, este comportamento resultou na curva decrescente de FLE noturno, em função da temperatura, para a segunda parte da noite durante o período seco (Figura 19a, Nd2$_*$). Para o período chuvoso, as exponenciais comportaram-se de modo crescente com a temperatura (Figura 19b, Nw1$_*$ e Nw2$_*$), assim como Nd1$_*$. Comparada à primeira parte da noite (Nw1$_*$), a curva Nw2$_*$ foi reduzida em aproximadamente 2 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, sugerindo, mais uma vez, efeitos externos aos processos bióticos no controle de FLE noturno.

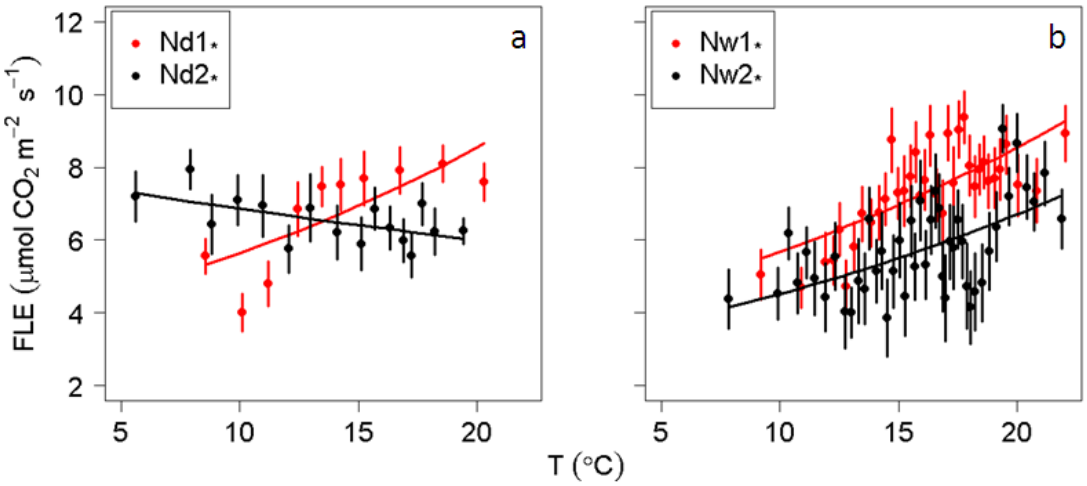

Figura 19 - FLE noturno em função da temperatura do ar para os casos seco(a) e chuvoso (b). "Nd" e "Nw" referem-se a seco e chuvoso, respectivamente. "1" e "2" denotam 1ª e 2ª partes das noites ."*" para FLE aceitos segundo u_{*c}. Barras indicam erro padrão

Com todos os valores noturnos de FLE, as curvas obtidas foram semelhantes àquelas da Figura 19 (Figura 20, Tabela 5). A resposta do FLE - quase insensível à temperatura na segunda parte da noite do período seco, porém, levemente crescente (Nd2) - mostrou a alteração do comportamento de RE quando aceitos valores de FLE noturnos anteriormente excluídos, o que torna este resultado aceitável, ao considerar os argumentos acerca dos processos capazes de controlar FLE noturno sem atribuir-lhe o caráter de estrita equivalência à RE (Figura 14). Por esta razão, os fluxos estimados por estas curvas nos preenchimentos de falhas serão referenciados como respiração do ecossistema aparente (RE_A) para diferenciá-la, quando necessário, do FLE noturno medido.

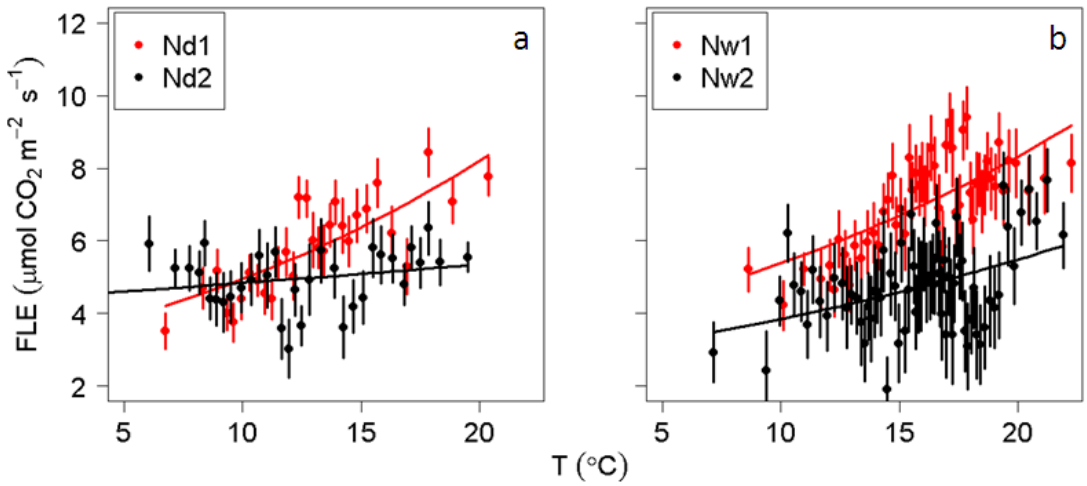

Figura 20 - FLE noturno em função da temperatura do ar para os casos seco (a) e chuvoso (b). "Nd" e "Nw" referem-se a seco e chuvoso, respectivamente. "1" e "2" denotam 1ª e 2ª partes das noites. Barras indicam erro padrão

Segundo os ajustes, ao calcular qual seria o valor de RE_A para um aumento de 10º C na temperatura do ar, nota-se que as curvas ajustadas com dados filtrados por u_{*c} produziram valores maiores (Tabela 5) em todos os casos (excluindo Nd2$_*$). Este resultado corrobora o efeito proposto do filtro u_* de reduzir a subestimativa do FLE noturno.

Tabela 5 - Relações exponenciais ($RE_A = ae^{bT}$) para períodos seco e chuvoso durante as 1ª e 2ª partes das noites. "***" indica sem significância estatística e T, a temperatura do ar. Demais coeficientes com P(>|t|) < 0.05

RE_A	a	b	RE_A(T=5º C)	RE_A(T=15º C)	$Q_{10}=e^{b10}$
Nd1$_*$	3.7219	0.0416	4.58	6.95	1.52
Nd1	2.9844	0.0506	3.84	6.38	1.66
Nd2$_*$	7.8708	-0.0137	7.35	6.41	0.87
Nd2	4.3882	0.0099 ***	4.61	5.09	1.10
Nw1$_*$	3.7754	0.0409	4.63	6.97	1.50
Nw1	3.4866	0.0435	4.33	6.70	1.54
Nw2$_*$	3.0465	0.0394	3.71	5.50	1.47
Nw2	2.6979	0.0355	3.22	4.60	1.43

3.7 Transportes advectivos

3.7.1 Advecção vertical

Com os dados obtidos no período de 18 de setembro a 10 de novembro de 2010, a Figura 21 mostra as médias de A_v noturnas (RFAi < 10 μmol $m^{-2}s^{-1}$) relacionadas com suas respectivas medianas de u_*, calculadas com base em percentis de 10% de u_*, assim como foi feito para determinar o u_{*c}. A_v foi mais negativa para u_* entre 0.1 e 0.2 m s^{-1} e tendeu a positiva ou neutra a partir daí, considerando o erro padrão associado, quando supostamente A_v deveria ser menos importante (acima de u_{*c}), estando de acordo com o esperado. Entretanto, valores positivos ou neutros também ocorreram com u_* próximo de zero, o que pode ser explicado pela grande dispersão dos elementos que participam do seu cálculo e o tamanho das amostras de cada média (mínimo de 53 e máximo de 106 valores).

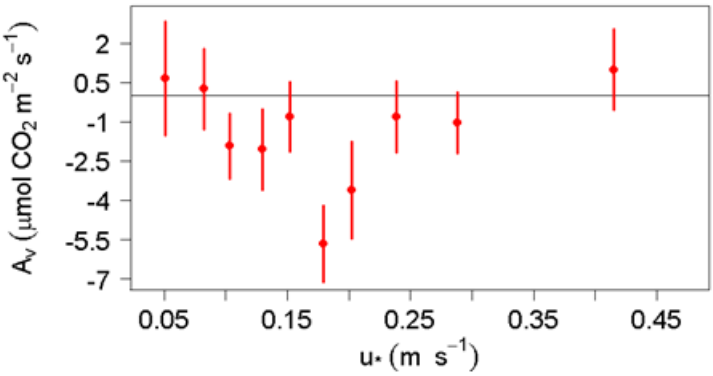

Figura 21 - Médias de A_v noturna em função das medianas de u_*. Barras representam o erro padrão

Quando um movimento vertical descendente, transporta uma massa de ar com menos [CO_2] para baixo, onde sua concentração é mais elevada. Ocorre o empobrecimento da coluna vertical e caracteriza A_v positiva, pois este empobrecimento não foi causado por absorção da floresta e deve ser somado no balanço total como forma de compensação. Este processo pôde ser observado entre 7 e 8 horas da manhã nas Figura 22a, b e c. O oposto ocorreu entre 4h30 e 5h30min, quando as médias indicaram ascensão de ar mais rico (pois [$c_r - c_m$] < 0), o que resulta em um enriquecimento de [CO_2] na camada. Neste caso, A_v deve ser subtraída do balanço, pois este fluxo não pode ser interpretado como fonte e, da mesma forma, deve ser compensado. Assim como FC e $St_{(o,m)}$ com padrões já descritos, A_v também apresentou um ciclo médio diário para o período com participação inexpressiva durante o dia e contribuição negativa, e da mesma ordem de grandeza que FC, durante a noite (-15 µmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$), indicando ser maior na primeira parte dela.

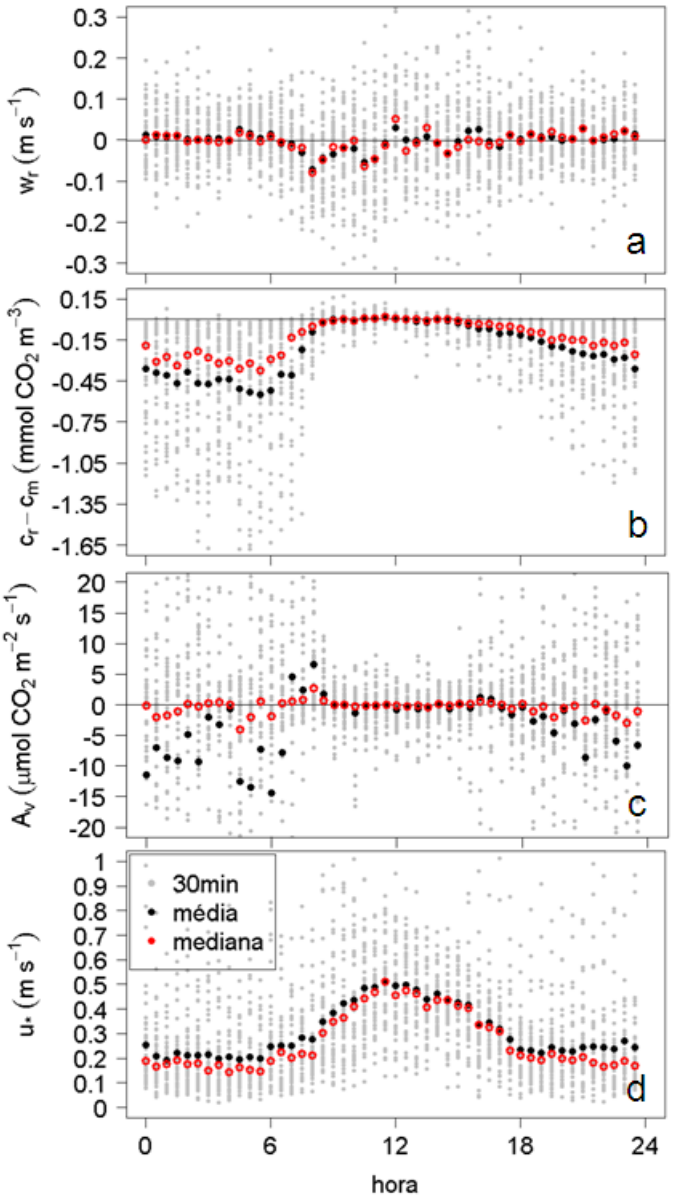

Figura 22 - Ciclo médio diário de A_v (c) e seus componentes: (a) vento residual; (b) diferença entre [CO_2] no topo e médio na coluna vertical; (d) velocidade de atrito

Ao observar as medianas, é notável o efeito da dispersão assimétrica de A_v no período noturno, quando seus valores se distanciam das médias, que sofrem grande influência de valores mais elevados ainda que em pequenas quantidades. u_* foi menor durante as duas partes da noite quando A_v mostrou-se mais significativa. Durante o dia, este padrão se inverteu, o que era esperado (Figura 22c e d).

Após serem removidos 5% da cauda superior e 5% da inferior, A_v ainda apresentou médias de 30 minutos de -150 µmol m^{-2}s^{-1}, factível para w_r igual a 0.2 m s^{-1}, com uma diferença média de -0.75 mmol CO_2 m^{-3} na coluna vertical. Esta densidade de CO_2 corresponde a 18,6 ppm, considerando uma temperatura de 15º C à pressão atmosférica de 90

kPa, condições reais encontradas neste sítio experimental. Em relação ao w_r, se estiver superestimado em 400% (supondo que seu valor correto fosse 0.05 m s^{-1}), ainda assim, A_v seria -37.5 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, o equivalente ao FC (absoluto) observado em diversas florestas segundo a literatura (GOULDEN et al., 1996; DA ROCHA et al., 2002; MILLER et al., 2004; CABRAL et al., 2011). Desta forma, a estimativa do w_r mostra ser uma fonte de erro com expressivo potencial. Características de inclinação do terreno e estrutura do dossel são fatores dos quais w_r depende e que nele provocam grande dispersão. Talvez a técnica de "planar-fit" utilizada não tenha sido capaz de remover tais efeitos de w_r, gerando implicações diretas na A_v. Estes resultados colocam em questão a inclusão de A_v em uma somatória horária do FLE, a menos que outro termo de igual magnitude atue de modo compensatório (FEIGENWINTER et al., 2008). Para este período, o valor médio e desvio padrão de A_v foram respectivamente -3.2 e 18.7 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$.

3.7.2 Advecção horizontal

Os dois elementos de A_h, as velocidades e os gradientes horizontais de [CO_2], são apresentados para os quatro níveis (de N1 a N4) em campos de médias de 6 horas, compondo o ciclo médio diário para o mesmo período de A_v (de 18 de setembro a 10 de novembro de 2010). A respeito do [CO_2], a Figura 23 mostra que houve um ciclo diário, com gradientes mais intensos na segunda parte da noite (entre 0 e 6 horas) em N2, N3 e N4 (Figura 23 topo, 3ª coluna), quando os campos do vento horizontal, apesar das baixas velocidades, indicarem transporte de ar mais pobre em direção à parte mais baixa do declive (de TA para TEC), de maneira mais perpendicular ao gradiente topográfico (Figura 3) em N2 e N3.

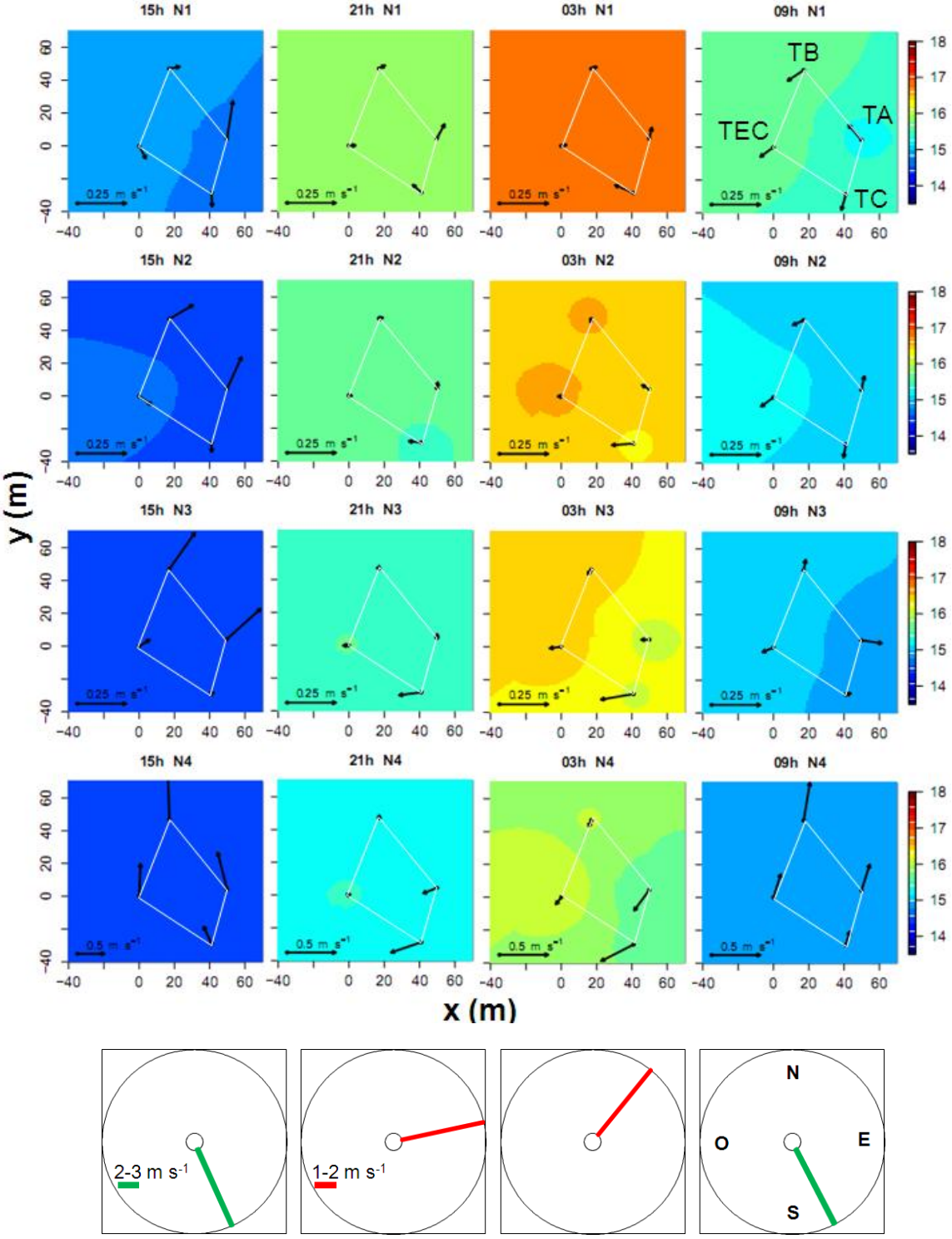

Figura 23 - continua na próxima página

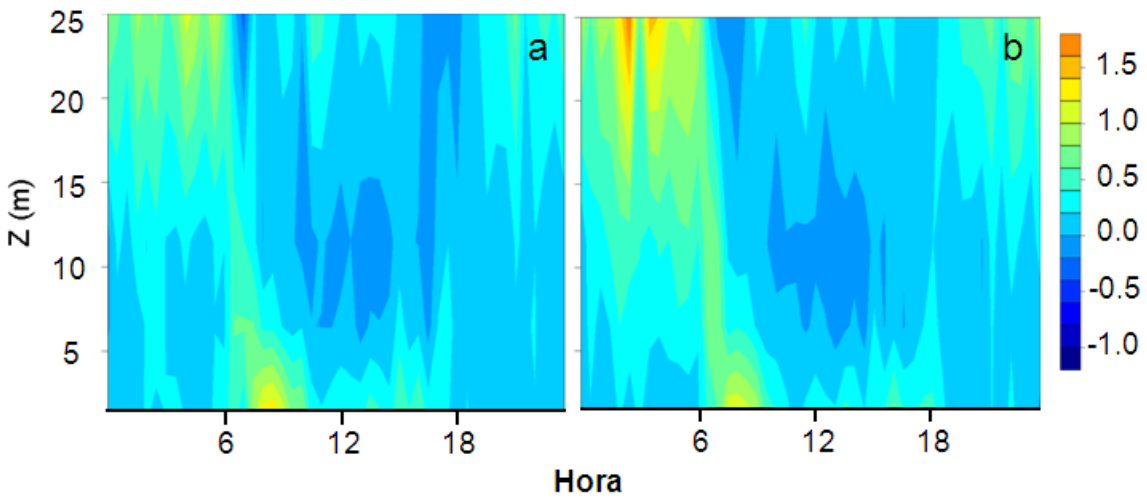

Figura 23 - Topo: ciclo médio diário para período de 18-09 a 10-11-2010 do perfil vertical dos campos médios horizontais (6 horas) do vento horizontal (em m s^{-1}) e densidade de CO_2 (escala à direita. Valores em mmol m^{-3}). N1 a N4 denotam os níveis. O horário está centrado no intervalo da média (ex.: 03h indica média das 0 às 06 horas); centro: vento horizontal a 63 m acima do solo calculado de forma análoga ao dos campos horizontais do vento horizontal. A figura geométrica formada pela linha branca delimita a área interna às quatro torres; base: perfil vertical de A_{hP} (a) e A_{hE} (b) (com camadas de espessuras iguais a 1 m) em µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, cuja escala é apresentada na vertical (lado direito)

No mesmo intervalo, a velocidade média a 63 m do solo, calculada da mesma forma, permaneceu da direção nordeste e mais alinhada com o vento em N4 (já acima do dossel), porém, com intensidade de 50 a 100% superior. Este padrão de diferentes direções do vento no perfil vertical sugere desacoplamento entre N3 e N4, o que ocorreu com atmosfera estável (Figura 24). Situações semelhantes observadas em outros estudos associaram o escoamento subdossel à drenagem de ar frio em direção à parte mais baixa do relevo (MARCOLLA et al., 2005; ZERI, 2008; FEIGENWINTER et al., 2008).

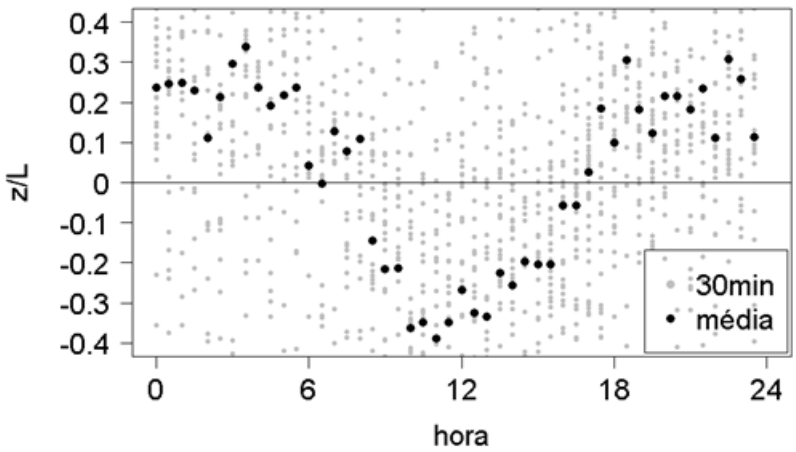

Figura 24 - Ciclo médio diário do parâmetro de estabilidade (z/L) para o período de 18-09 a 10-11-2010. Instável: < -0.0625; estável: > 0.0625 (ZERI, 2008)

Após a segunda parte da noite, a primeira parte do dia mostrou a diminuição dos valores e o enfraquecimento dos gradientes de [CO_2], que se estendeu até a segunda parte do dia. O campo do vento em N1, agora relevo abaixo, sugeriu um atraso em relação ao nível superior quanto ao escoamento. N4 assemelhou-se com o vento a 63 m acima do solo, do ponto de vista da direção predominante de sul e de forma mais organizada que em N1, o que não ocorreu nos demais níveis, cujas velocidades não apresentaram coerência na direção. Na segunda parte do dia, N4 intensificou seu alinhamento com o vento no topo; nos níveis N2 e N3, o campo do vento tendeu deslocar-se relevo acima. Completando o ciclo, a primeira parte da noite mostrou a elevação dos valores de [CO_2] com gradientes inexpressivos e baixas intensidades do vento horizontal. Além disso, este campo de vento horizontal sugeriu, novamente, o giro para escoamento relevo abaixo, assim como ocorreu na segunda parte da noite.

Como A_h é um produto entre a velocidade e o gradiente de [CO_2], os campos médios para alguns intervalos da Figura 23 (topo) apresentaram valor nulo como resultado por não haver gradiente horizontal. Isso significa que, para este dado período, houve possivelmente uma compensação entre os fluxos, excluindo-se a hipótese de que A_h não tenha existido. Trabalhos relacionados mostraram escoamentos mais organizados, alinhados e com mais persistência em superfícies inclinadas, porém, mais planas, extensas e regulares do que neste estudo (AUBINET; HEINESCH; YERNAUX, 2003; STAEBLER; FITZJARRALD, 2004; MARCOLLA et al., 2005; FEIGENWINTER et al., 2008; ZERI, 2008), o que pode explicar a fraca coerência do vento horizontal nos campos espaciais durante os períodos noturnos.

A Figura 25 mostra a evolução de A_{hP} (estimativa dos gradientes horizontais pela equação do plano) e A_{hE} (estimativa dos gradientes horizontais aproximando os segmentos TEC - TA e TC-TB como os eixos x e y de um sistema cartesiano, respectivamente) em um ciclo médio diário com base em médias de 30 minutos. Foram atribuídas as espessuras de 4.0, 5.0, 9.25 e 44.75 m para os níveis de N1 a N4, representados nas Figura 25a e b, respectivamente. No cálculo de ambas, é possível notar que a espessura das camadas amplifica a advecção horizontal ao comparar-se com a condição hipotética de camadas com espessuras iguais a 1 m (Figura 25c e d). A Figura 23 (base) mostra o ciclo diário médio interpolado, para o perfil vertical de A_{hP} e A_{hE}, com camadas de 1 m para todos os níveis, tornando-se possível avaliar o papel dos gradientes associados aos respectivos campos horizontais de vento. Nota-se em A_{hP} e A_{hE} que, próximo à superfície, elas foram sempre nulas ou positivas; entre 6 e 15 m, trocaram de sinal entre o dia e noite, sendo mais positiva

durante a segunda parte da noite em A_{hE} (Figura 23b - base) e negativa durante um período diurno maior em A_{hP} (Figura 23a – base). No extrato superior, foram predominantemente positivas e tornaram-se negativas ao amanhecer, de modo não persistente, antes do nível inferior (aproximadamente duas horas). De modo geral, os transportes horizontais positivos que atuaram no empobrecimento das camadas ocorreram durante a segunda parte da noite a partir de N2, corroborando a Figura 23 (topo).

No caso dos transportes horizontais, os gradientes de [CO_2] são menores que os verticais, mas as velocidades médias horizontais podem ser comumente uma ordem de grandeza maior que w_r, favorecendo a dispersão, o que indica que esta característica não depende do método nem das espessuras das camadas, visto que ocorreu em todos os casos (Figura 25).

Segundo a Equação 8, a integração de A_h deve estender-se até a altura do EC, o que resultou nas Figura 25a e b com elevados valores. Há duas hipóteses assumidas para este cálculo: 1. os mesmos gradientes horizontais de [CO_2] observados a 25 m acima do solo se estendem até o EC; 2. o campo do vento horizontal médio também permanece o mesmo, o que certamente não é sempre verdade. No entanto, os padrões se repetem nos quatro casos com ciclos diários bem definidos, o que sugere também ser independente das espessuras das camadas e do método de determinação dos gradientes de [CO_2]. Notavelmente mais positivos durante a segunda parte da noite, A_h seguiu com menores valores, embora ainda positivos durante a fase solar, e tornou a se intensificar na primeira parte da noite. Este comportamento evoluiu de forma oposta a A_v, que se mostrou negativa durante o período noturno, sugerindo um provável acoplamento entre transportes acima e abaixo do dossel.

As medianas mais próximas dos valores médios durante o dia, quando a atmosfera experimenta um regime de maior homogeneidade, apontam para o forte efeito dos eventos transientes noturnos, os quais as distanciam das suas respectivas médias.

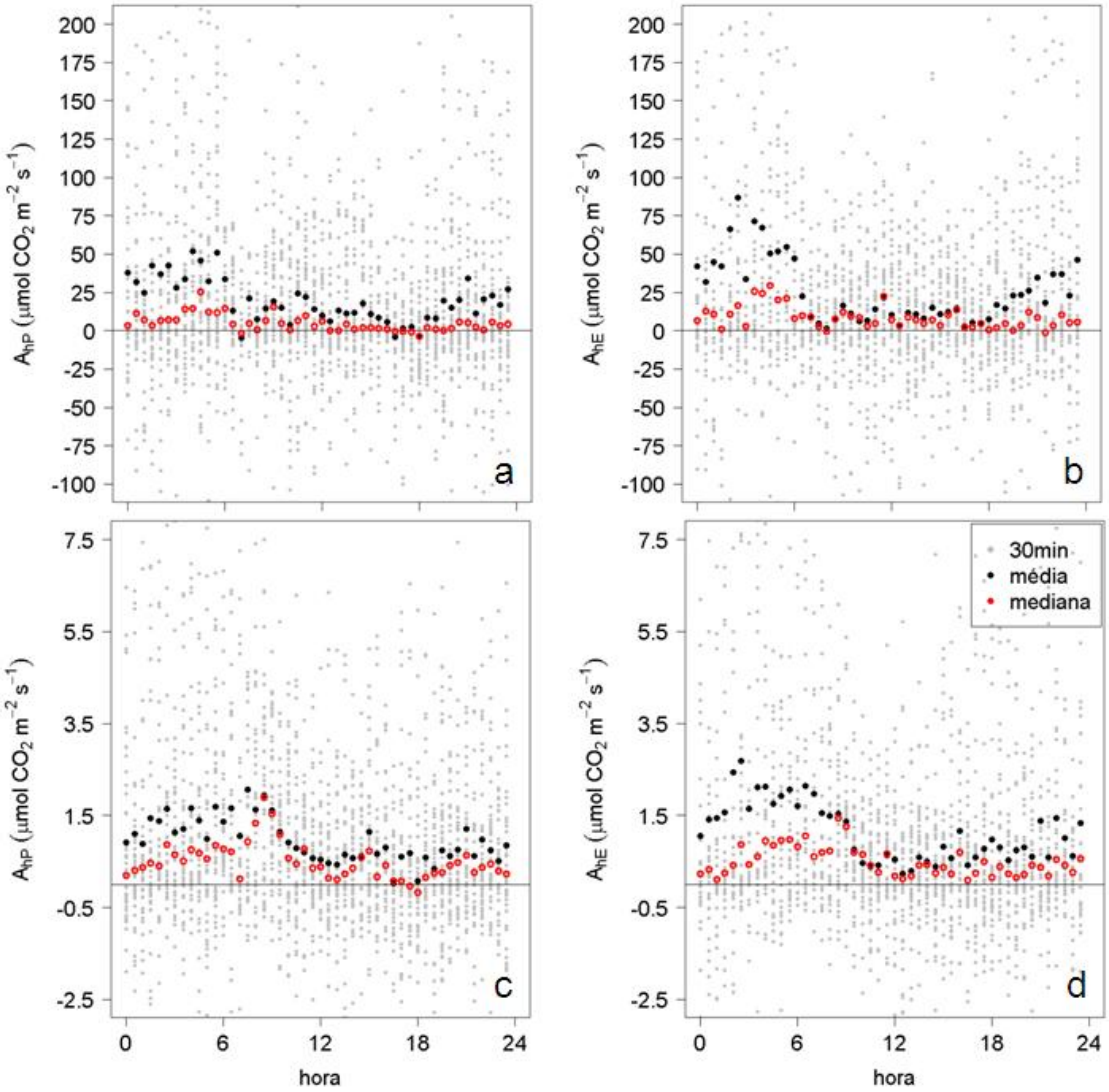

Figura 25 - Ciclo médio diário de A_{hP} calculada com espessuras representativas de cada nível (a) e unitária para todos eles (c). Análogo para A_{hE}, com espessuras representativas (b) e unitária (d)

De acordo com as Figura 25a e b, os valores médios de A_{hP} e A_{hE} foram, respectivamente, 620 e 770% maiores que o mesmo valor médio de A_v, apesar da sugerida atuação contrária destes transportes indicar que seus valores absolutos deveriam ser compatíveis, o que não ocorreu.

Marcolla et al. (2005) calcularam A_h para uma floresta com dossel a 31 m do solo, integrando desde a superfície até 16 m de altura, pois verificaram a ausência de gradientes horizontais de [CO_2] acima deste nível, em função do baixo índice de área foliar e boa turbulência. Para uma condição semelhante de homogeneidade acima do dossel, o ciclo médio diário de A_{hP} foi integrado até a altura de 20 m nos seguintes dias do ano de 2010: 261, 276, 282, 292 e 298 (261 em setembro e os demais em outubro), cujo ciclo médio diário é apresentado na Figura 26a. Na Figura 26b encontram-se os valores do [CO_2] ao longo do dia

226 de 2010, que apresentou fortes gradientes na vertical. Nesta condição média durante as 24 horas, observou-se que os gradientes horizontais de [CO_2] acima de 20 m não influenciaram A_h, possibilitando a integração desta até a altura de 20 m apenas, ao invés de estendê-la até a altura do EC, o que seria necessário para todos os outros dias semelhantes ao dia 226.

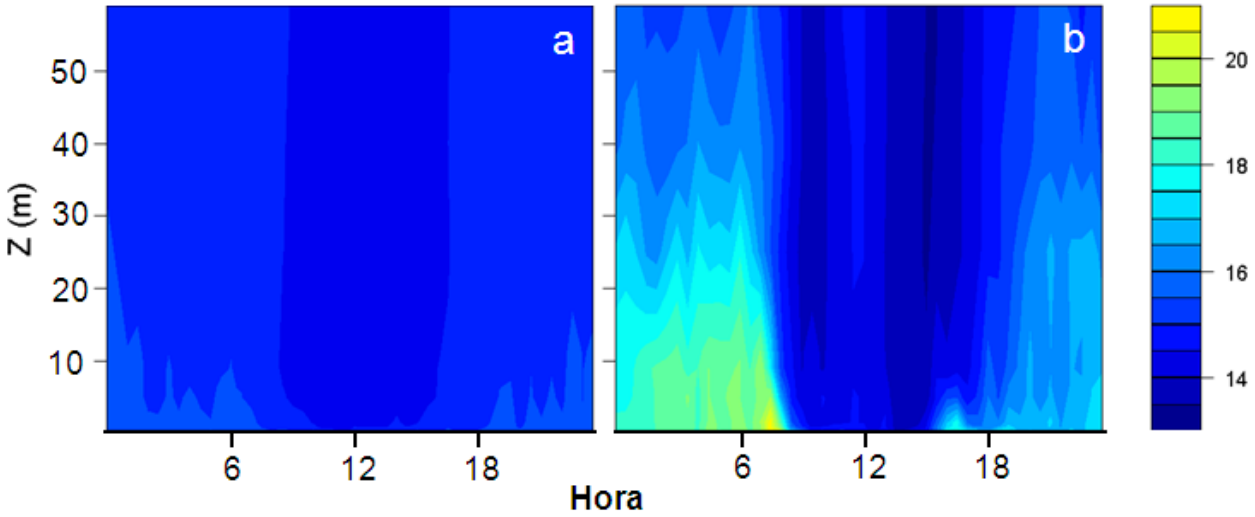

Figura 26 - a) Ciclo médio diário das densidades de CO_2 dos dias 261, 276, 282, 292 e 298 de 2010, com boa homogeneidade vertical; b) ciclo diário (266 de 2010) com fortes gradientes temporal e vertical da densidade de CO_2. As cores nas figuras referem-se à escala vertical (lado direito) em mmol CO_2 m^{-3}

Recordando que transportes advectivos têm o sinal positivo quando empobrecem o volume e negativo quando enriquecem o volume, a Figura 27 mostra um importante resultado ao associar A_v, A_{hP} e St_m. Cada ponto nas curvas representa intervalos de 30 minutos. Entre 0h30 e 2h30min, A_v e A_{hP} são positivos, indicando que ambos atuaram no empobrecimento do volume de controle. St_m, que não depende da origem e/ou processos que alteram o [CO_2] e reflete a sua variação temporal no perfil vertical deste volume, indica que a camada realmente sofreu empobrecimento. Entre 06 e 12 horas, ocorre o pulso característico de empobrecimento do St_m e o enriquecimento do perfil até a troca de sinal após as 12 horas. Durante este mesmo período, A_v e A_{hP} têm seus sinais trocados entre 7 e 8 horas, o que indica que contribuíram de formas diferentes, mas prevaleceu A_{hP} (positivo; ainda empobrecendo). Adiante, com o mesmo sinal, passaram ambas as advecções a indicar um transporte de empobrecimento, mas perdendo vigor durante o período turbulento do dia, o que concorda com o enriquecimento vertical, segundo St_m, cada vez menos negativo. A partir das 15 horas, St_m se estabelece positivo com o início do processo de empilhamento de [CO_2] promovido por A_{hP} (negativo; enriquecendo) até as 17h30, quando A_v torna-se mais expressiva, persistente e, também,

negativa. A partir das 19h30min, A_{hP} e A_v se contrapõem: A_{hP} empobrecendo (positiva) e A_v enriquecendo (negativa) o volume, o que resulta em um comportamento oscilatório de St_m e, finalmente, positivo, pois A_v mostra-se maior, prevalecendo seu efeito.

Os elementos envolvidos nos cálculos dos termos advectivos são extremamente suscetíveis aos erros inerentes 1. ao método (sensores e sua instalação; obstáculos perturbadores e estrutura da floresta; heterogeneidade do dossel; estimativa do vento residual; diferença entre alturas dos topos do volume de controle e o dossel; representatividade das camadas horizontais quanto aos seus gradientes e vento médio); 2. ao relevo (a sua escala e diferentes gradientes topográficos em função da direção; posicionamento das torres; representatividade adequada dos processos em escala espacial e temporal). Estes fatores dificultam a eliminação ou aceitação de medidas, fisicamente possíveis, para a quantificação destes transportes.

Desta forma, a Figura 27, apesar de mostrar os termos de transportes lentos do balanço de massa com magnitudes muito semelhantes, deve ser interpretada, do ponto de vista das relações entre os processos, sem a expectativa de uma acurada somatória no ciclo diário resultante, cujas médias e acumulados destes termos são apresentados na Tabela 6. Nota-se também que as médias de A_{hP} e A_v foram positiva e negativa, respectivamente, assim como nos padrões descritos para o período de 18 de setembro a 10 de novembro de 2010, mesmo tendo sido obtidas com base em dias atípicos e contribuindo da mesma maneira em alguns períodos do dia. Isso mostra também que a complexidade destes transportes não permite considerá-los opostos a qualquer tempo, apesar do que sugerem seus padrões médios anteriormente observados (Figura 25; Figura 22).

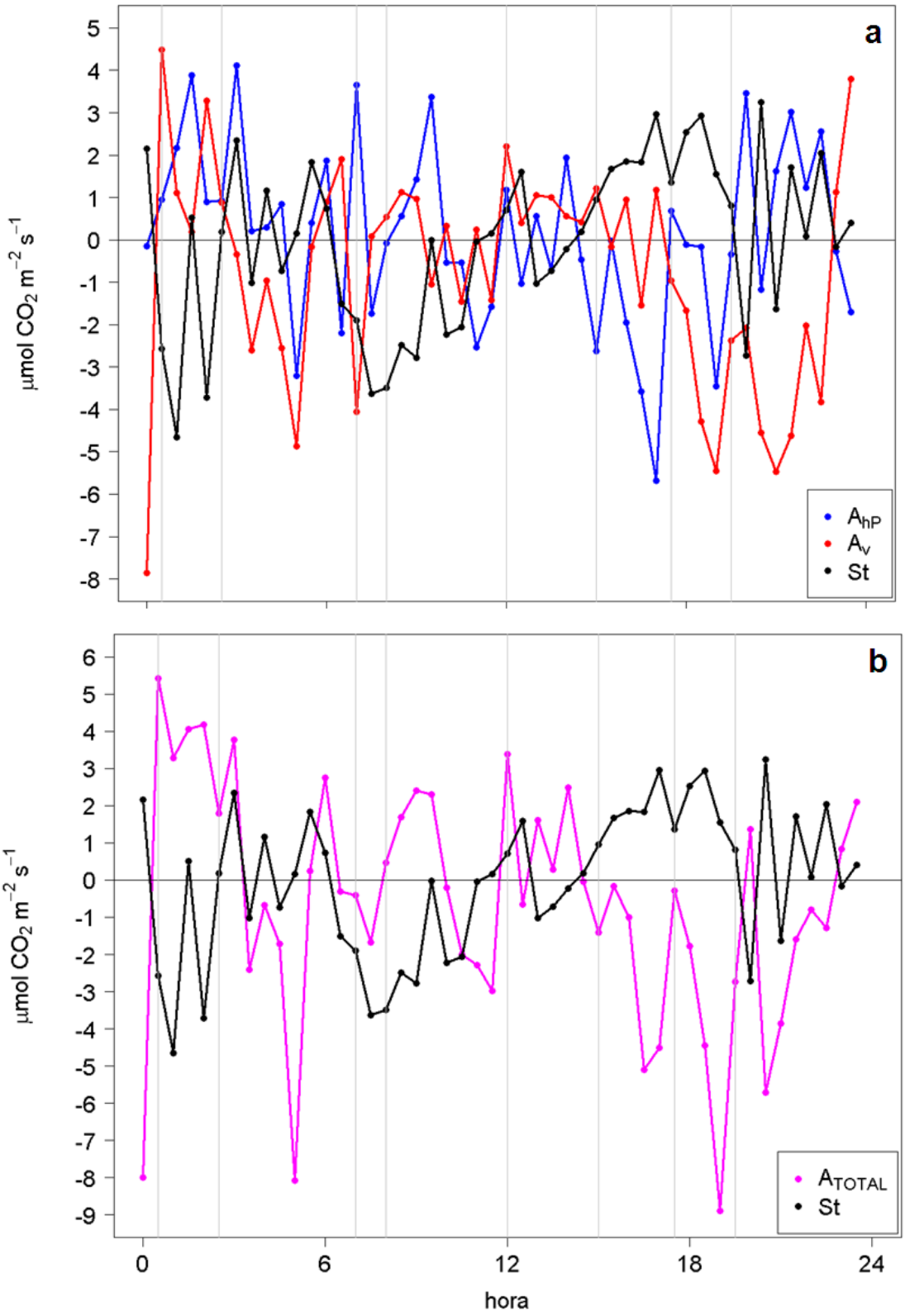

Figura 27 - (a) Ciclo médio diário de A_{hP}, A_v e A_h para os dias 261, 276, 282, 292 e 298 de 2010; (b) análogo à anterior, com A_{TOTAL} e St_m. As linhas verticais indicam horários: 0h, 0h30min , 2h30min , 7h, 8h, 12,15h, 17h30min e 19h30min

Tabela 6 - Valores médios e acumulados do ciclo médio diário (dias 261, 276, 282, 292 e 298 de 2010) para A_{hP}, A_v e St_m em μmol m^{-2} s^{-1}

	Média	**Desvio Padrão**	**Soma diária**
A_{hP}	0.12	2.11	5.94
A_v	-0.76	2.59	-36.44
St	-0.03	1.98	-1.59
Total	-0.63	3.24	-30.49

Com base na soma de A_{hP} e A_v (A_{TOTAL}), a Figura 27b ainda sugere, que uma estimativa precisa, acurada e com adequada representatividade espacial de St_m, pode ser suficiente para o balanço de massa do FLE, sobretudo por tender a zero em medidas de longo prazo (AUBINET et al., 2000). Os padrões mostraram claramente um comportamento espelhado entre eles, ou seja, St_m aumentou quando A_{TOTAL} diminuiu e vice versa, evidenciando que o acúmulo ou depleção de [CO_2] na altura de um volume de controle esteve bem correlacionado com os transportes verticais e horizontais deste escalar para este estudo de caso de mata atlântica.

3.8 O fluxo líquido do ecossistema entre 2008 e 2010

Os resultados obtidos com A_h e A_v para o período analisado indicaram que as relações entre os transportes advectivos podem ser tanto colaborativas como compensatórias, mas não permitiram a estimativa de valores médios para sua inclusão no balanço de massa do FLE. Os fortes indícios de que St_m responde aos dois termos advectivos de forma integrada reforça a importância de St_m no balanço de massa, mas os números na Tabela 6 representam um estudo de caso com dias atípicos cuja soma de A_{TOTAL} e St_m não se anula, o que não permite invalidar a relevância das advecções.

Diante do observado nesta área de mata atlântica, a inclusão de valores de A_h e A_v na estimativa do FLE provocaria mais incertezas, pois A_h e A_v mostraram valores médios absolutos discrepantes, mas aceitáveis e comparáveis do ponto de vista físico, se forem considerados seus desvios padrão. Se fosse assumido A_v médio e A_{hP} calculado para os dias com homogeneidade vertical acima de 20 m, o resultado só faria sentido caso o balanço fosse feito apenas para aqueles dias, sendo que o valor médio diário destes dois termos, juntamente

com St_m, foi de -0.63 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$. Isso significa que o resultado para o período foi de fixação, não fazendo sentido extrapolar para um ciclo anual quando se busca soluções para a subestimativa do FLE por meio da inclusão da advecção na soma. Sendo assim, as séries temporais de FLE preenchidas foram estimadas para os anos de 2008, 2009 e 2010 a partir de FLE_1 (FC + St_m).

Para este trabalho, foram produzidas quatro séries preenchidas com o FLE_1 utilizando as curvas de dependência luminosa durante o dia. Destas quatro séries, duas foram preenchidas durante a noite com as curvas de RE_A, sendo: P1 com filtro de u_* (com $Nd1_*$, $Nd2_*$, $Nw1_*$ e $Nw2_*$ - Tabela 5); e P3 sem filtro de u_* (com Nd1, Nd2, Nw1 e Nw2 - Tabela 5). Nas outras duas séries, foi utilizado o método proposto por Hutyra et al. (2008), também com dados noturnos filtrados em P2 e não filtrados em P4. Na Figura 28a, são comparadas as séries filtradas preenchidas, P1 e P2, com os valores observados também filtrados (FLE_{oc}). A Figura 28b compara as duas curvas não filtradas, P3 e P4, com os valores observados não filtrados (FLE_o). Nota-se em ambas as condições (com e sem filtro) que a sazonalidade das séries preenchidas foi representada com ciclos médios diários mensais de menor amplitude no período seco, quando comparado ao chuvoso. Os valores diurnos mais negativos foram subestimados em relação às medidas, o que se explica pelo St_m (cuja diferença em relação a St_o já foi abordada no item 3.3), participante na composição de FLE_1, usado no ajuste das curvas para preenchimento. Entretanto, as curvas obtiveram ótima concordância nos momentos de troca de sinal do $FLE_{(o;\ oc)}$ no amanhecer e entardecer. Os valores noturnos - maiores na primeira parte da noite e menores na segunda - foram bem representados, considerando a dispersão dos poucos valores médios resultantes das observações. Concluindo a apresentação do processo de preenchimento de falhas em relação às medidas, a Figura 29a mostra o comportamento das séries preenchidas pelo primeiro método (P1, com filtro, e P3, sem filtro) comparadas à série FLE_1 não filtrada, de onde foram originadas. O mesmo pode ser visto para o segundo método na Figura 29b, cujas curvas (P2, com filtro, e P4, sem filtro) também são comparadas a FLE_1 sem filtro. Nota-se o efeito do filtro em P1 e P3 durante a noite, quando são mais positivos que FLE_1 não filtrato.

As séries P1 e P3 apresentaram padrões e sazonalidades bem caracterizados ao serem comparadas com os ciclos médios diários mensais de FLE_1 isento de filtragem, como pode ser observado na Figura 29a. P2 e P4 (Figura 29b) produziram resultados muito semelhantes a P1 e P3, respectivamente, durante a noite, quando os métodos utilizados foram diferentes. Durante o dia, a sensível subestimativa em relação a P1 e P3 pode ser explicada pela reduzida

quantidade de dados (médias dispostas a cada sessenta minutos em P2 e P4, e trinta minutos em P1 e P3) usada na determinação dos ciclos médios diários mensais, uma vez que as curvas de resposta à luz foram as mesmas.

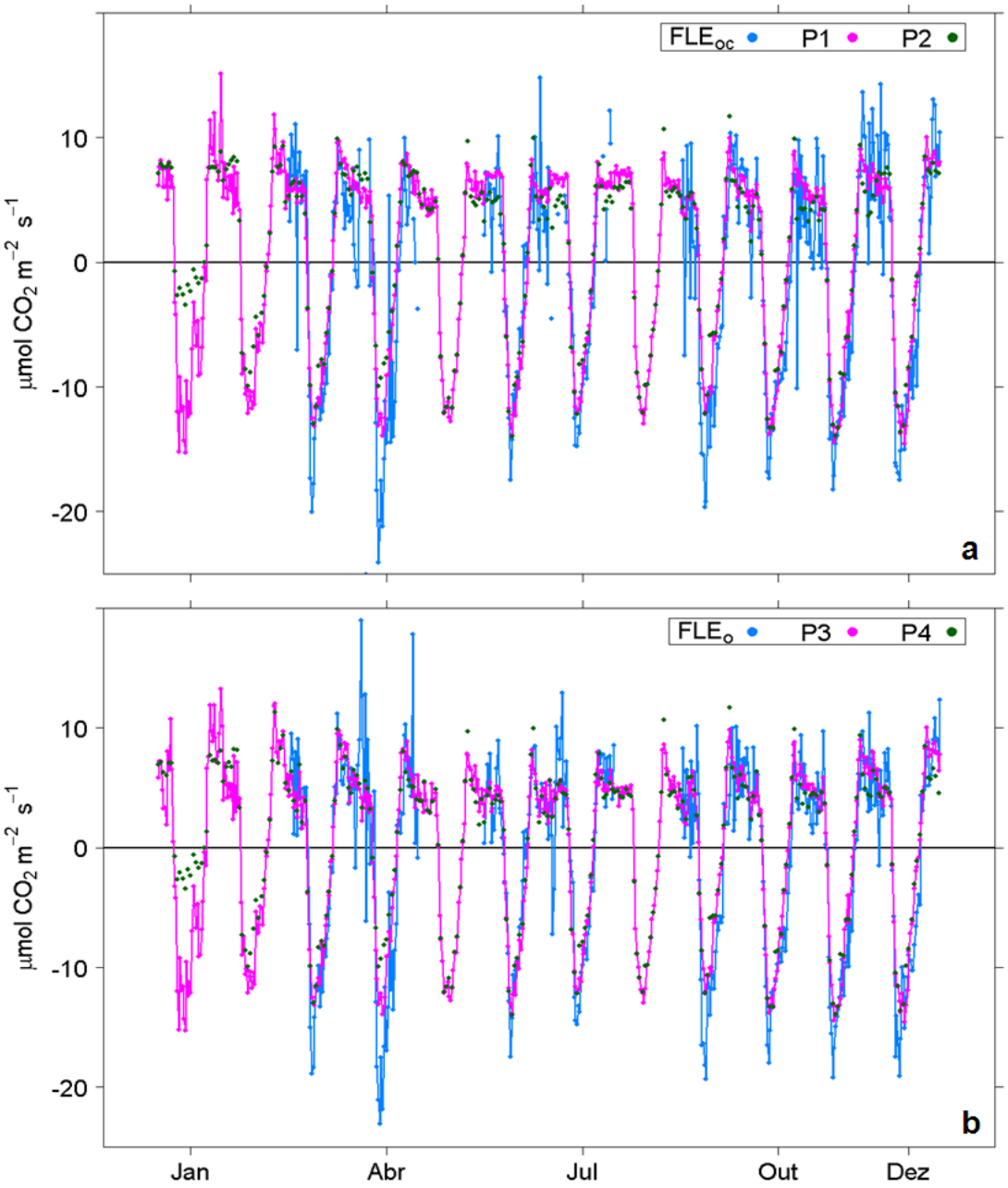

Figura 28 - (a) Ciclos médios diários mensais da série de FLE_{oc} em 2010 (observada filtrada por u_{*c}) juntamente com as séries preenchidas com dados filtrados: P1, usando curvas ajustadas com FLE_1 (FC + St_m de 2008 a 2010), e P2, segundo Hutyra et al. (2008) ; (b), análogo a (a), porém preenchidas com dados não filtrados usando as curvas (P3) e o método proposto por Hutyra et al. (2008) (P4). As indicações dos meses de janeiro a dezembro estão posicionadas às 12 horas nos seus respectivos ciclos médios diários mensais

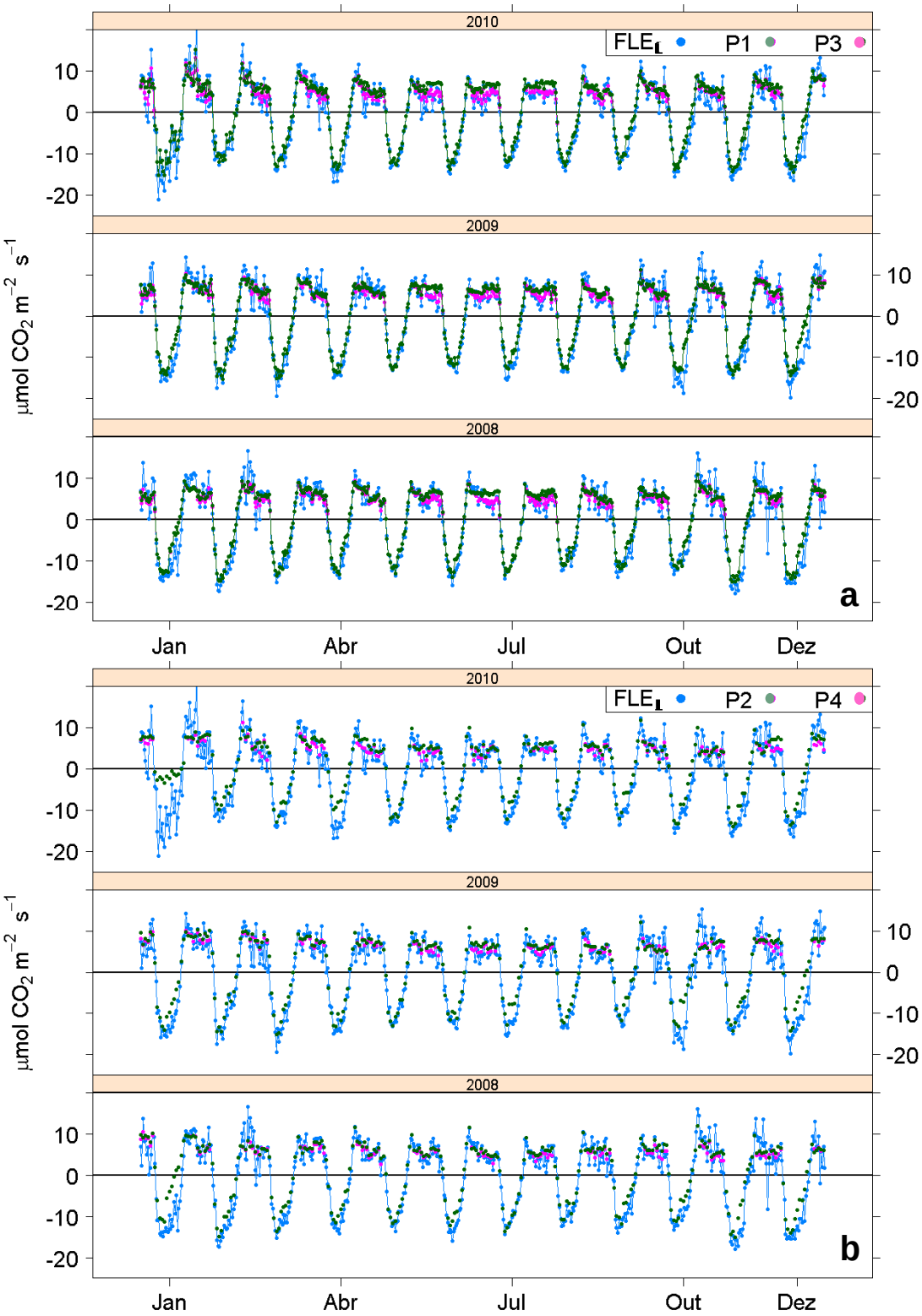

Figura 29 - (a) Ciclos médios diários mensais da série de FLE_1 sem filtro por u_{*c} juntamente com as séries P1(com filtro) e P3 (sem filtro) preenchida pelas curvas de resposta à luz e RE_A; (b), análogo a (a) com as séries P2(com filtro) e P4 (sem filtro) preenchida pelo método utilizado em Hutyra et al. (2008)

A Tabela 7 compara o volume de dados preenchidos em relação aos medidos e mostra que o preenchimento foi aplicado em, pelo menos, 75% dos dados noturnos quando filtrados e, no mínimo, em 43 % dos dados diurnos. Os respectivos valores acumulados para cada método também são apresentados (Figura 30). Tanto P1 (com filtro, com RE_A) quanto P3 (sem filtro e RE_A) resultaram em assimilação no início dos anos, oscilando em torno do zero apenas P3, que se caracterizou como ciclo assimilador em 2010 (lembrar que não houve medidas entre janeiro e fevereiro de 2010). Todas as demais séries mostraram caráter emissor em todos os anos. Os dois métodos de preenchimento produziram resultados mais próximos quando o filtro de u_{*c} foi aplicado, mas todas as séries limitaram seus acumulados entre -13 e +179 g C m^{-2} ano^{-1}, considerando-se que aproximadamente 57 e 66% dos dados foram preenchidos (para dia e noite) nos casos com e sem filtro, respectivamente. Se fosse somada a diferença de aproximadamente -5 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} (durante uma hora) observada entre os picos negativos de St_m e St_o nos ciclos médios diários seco e chuvoso (Figura 12) em todos os ciclos diários durante um ano, seria equivalente a contabilizar uma contribuição de assimilação de -83 g C m^{-2} ano^{-1}, o que poderia tornar os acumulados de P1 e P2 mais próximos de zero e de P3 sempre negativo.

Além destes, o erro relacionado com processos aleatórios inerentes às medidas foram estimados em 42 g C m^{-2} ano^{-1} (MORGENSTER et al., 2004; CABRAL et al., 2011) para um FLE com magnitude de -15 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} ao meio dia. A média dos acumulados para todos os casos foi de +107 com erro de 80 g C m^{-2} ano^{-1} que considerou o desvio padrão dos acumulados e o erro aleatório. Miller et al. (2004) estimaram emissão de 40 g C m^{-2} ano^{-1} em um sítio experimental de floresta amazônica. Para o mesmo bioma, Hutyra et al. (2008) estimaram emissão de 29 g C m^{-2} ano^{-1} com uma RE média de 8.6 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Já Saleska et al. (2003) estimaram uma perda de 130 g C m^{-2} ano^{-1} também para uma área de floresta amazônica.

Tabela 7 - Tabela com os dados preenchidos divididos em dia e noite, com e sem aplicação de filtro u_{*c} nos dados noturnos e respectivos acumulados resultantes de cada preenchimento. Um ano completo contém 17.520 médias de 30 minutos

	Noturnos		**Diurnos**	**Acumulados (g C m^{-2} ano^{-1})**			
	Preenchidos sem filtro	Preenchidos com filtro	Preenchidos sem filtro	P1	P2	P3	P4
2008	5788	7090	4279	179	171	30	123
2009	5779	6813	4565	131	175	2	132
2010	4524	6115	3431	158	131	-13	68

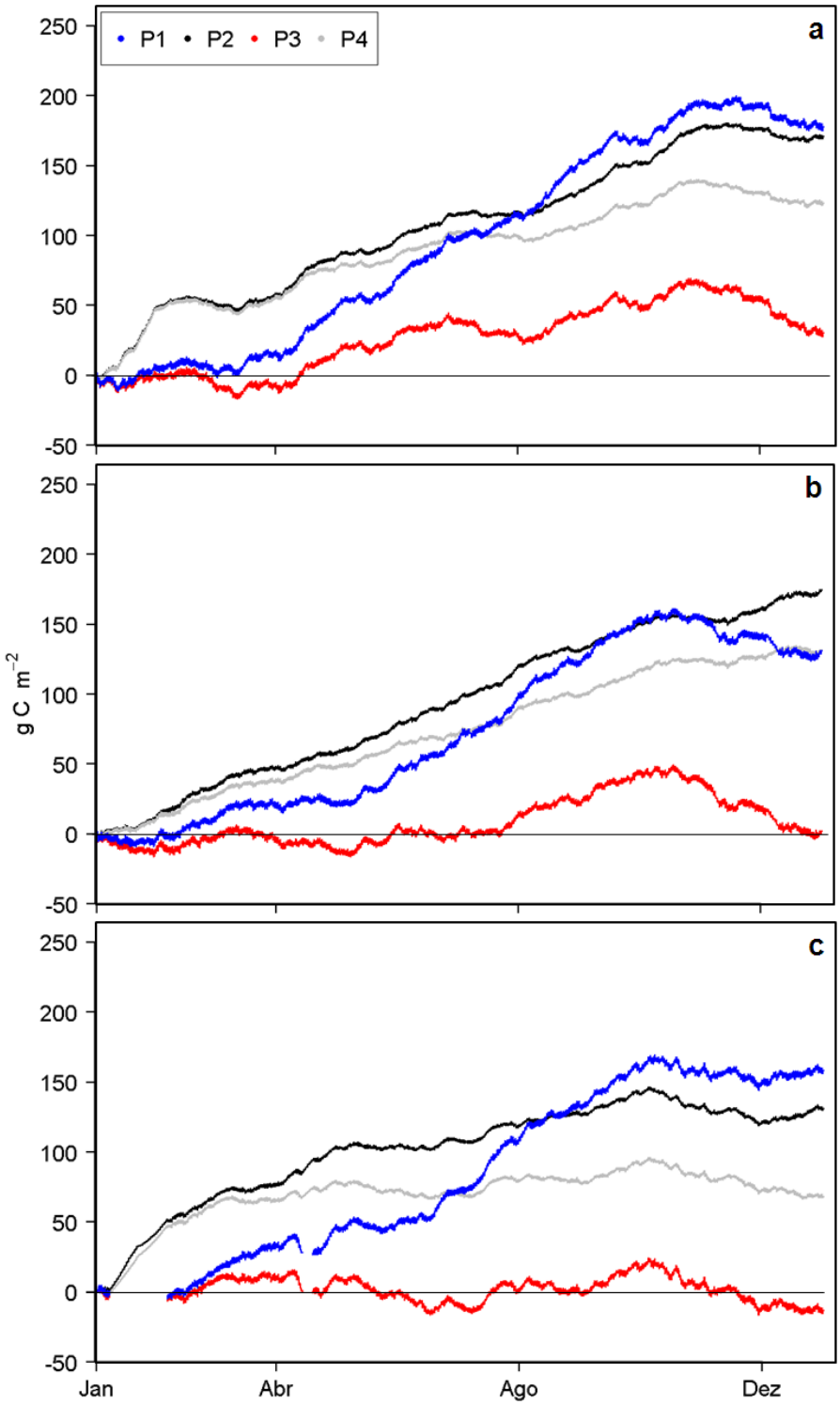

Figura 30 - Acumulados anuais de carbono (g m^{-2}) para 2008 (a), 2009 (b) e 2010 (c) pelas curvas preenchidas P1, P2, P3 e P4

Por meio de estudos para esta área de mata atlântica, entre o período de 2006 a 2008, Alves et al. (2010) estimaram uma PPL de 1040 g C m^{-2} ano^{-1} que, pela definição, inclui RA, resultando no FLE anual acumulado se de PPL for subtraída a respiração heterotrófica. Considerando a respiração do solo (RS) média anual de +3.4 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} (~ 1290 g C m^{-}

^{2} ano^{-1}) (SOUSA NETO et al., 2011), o acumulado resultante seria de +247 g C m^{-2} ano^{-1}. A RS é composta pelas emissões de CO_2 resultantes da decomposição da matéria orgânica presente no solo, da manutenção da vida da microfauna que nele habita e da respiração das raízes, que também faz parte da RA. Ocorre que a respiração das raízes já foi considerada na estimativa do PPL e caso fosse descontada, RS diminuiria e poderia inverter o sinal deste balanço obtido de modo independente. Contudo, não se conhece o valor da respiração das raízes nesta região. Desta forma, é razoável entender que esta floresta de mata atlântica monitorada com técnicas micrometeorológicas demonstrou comportar-se como uma discreta fonte de [CO_2], com chance de estar em equilíbrio de um ano para outro.

4 CONCLUSÕES

Ao investigar este sítio experimental de mata atlântica, diversos resultados importantes foram observados, desde os ciclos anuais das variáveis climáticas até a sua relação com a evolução sazonal do funcionamento da floresta e as implicações destes nos balanços anuais de carbono no contexto analisado. A seguir, são apresentadas considerações acerca dos principais resultados alcançados.

As médias mensais das variáveis climáticas entre 2008 e 2010 mostraram que as medidas de balanço de carbono foram realizadas em um período representativo do clima descrito para a região. O efeito da sazonalidade da energia pôde ser observado no FLE e mostrou ser o seu elemento de maior controle. Ao final do período seco, α_K atingiu o seu mínimo defasado do máximo de $\alpha_{RFA,}$ que ocorreu no meio do período seco. A relação entre α_K e α_{RFA} pode estar relacionada com o ciclo fisiológico anual da floresta (quantidade de nitrogênio nas folhas, por exemplo) além das características físicas, como o índice de área foliar, que precisa ser investigado em futuros trabalhos. A floresta mostrou que RFA_r diminui durante a fase seca e seria bastante pertinente investigar se esta redução ocorre simplesmente pela sazonalidade da geometria de incidência de K_i e RFA_i ou se há questões fisiológicas envolvidas que tentam aumentar a eficiência fotossintética da floresta no período seco. A floresta revelou-se mais ativa durante o período chuvoso (maior FLE e RE) e também mostrou peculiaridades que caracterizaram diferenças notadas nos ciclos diários médios representativos de cada fase, como o horário de máxima fixação (mais tarde durante o dia no período seco), o tamanho do período de fixação (maior no período chuvoso) e a RE menor na segunda parte da noite no período chuvoso.

Em ambos os casos (seco e chuvoso), o pulso matinal negativo de St não foi notado pelo EC, diferentemente do relatado por de Araújo et al. (2010), mas igualmente ao observado em outros dois trabalhos (MALHI et al., 1998; HUTYRA et al., 2008), o que possivelmente se explica, neste estudo de caso, por uma questão de escala, considerando-se que o EC está a 43 m acima da floresta (com dossel a 20m do solo) e provavelmente tenha amostrado a atmosfera em condições mais homogêneas. O St_m, obtido por meio de ajustes, representou com qualidade St_o e mostrou importância na composição de todas as séries do FLE. Além disso, foi comparável também em magnitude com outros St observados na floresta amazônica.

As curvas de reposta à luz foram fundamentais para o preenchimento de falhas do FLE e, apesar da notável dispersão deste em relação à RFA_i, demonstraram diferentes

comportamentos da floresta durante manhã e tarde, com maior assimilação e menor respiração durante a manhã (analogamente inverso à tarde) e menos intensos durante o período seco. Para a floresta amazônica, semelhantes comportamentos também foram observados (MALHI et al., 1998; GOULDEN et al., 2004).

O u_{*c} foi diferente para cada uma das duas fases do ano, mas os valores de FLE noturnos, referentes aos seus respectivos $u_{*c,}$ concordaram com as RE_A correspondentes, determinadas pelas curvas de respiração noturna, sobretudo ao considerar a proporcionalidade entre RE_A e respiração do solo medida na área de abrangência da torre. As curvas de RE_A, ajustadas com a temperatura do ar, sugeriram integrar processos bióticos e dinâmico-meteorológicos, uma vez que valores noturnos de FLE diferiram entre a primeira e segunda parte da noite, tanto para o período seco quanto para o chuvoso.

Os transportes advectivos imprimiram de forma notável seu efeito na alteração do [CO_2] e mostraram ser extremamente dependentes do local estudado, porém, não permitiram sua inclusão no balanço de massa horário do FLE. Estes resultados são comumente discutidos na literatura (FEIGENWINTER; BERNHOFERR; VOGT, 2004; MARCOLLA et al., 2005; FEIGENWINTER et al., 2008; AUBINET et al., 2010). Ambos, A_v e $A_{h,}$ mostraram ciclos médios diários bem definidos por meio do período analisado em 2010, o que não pôde ser generalizado para todo ciclo anual. Entretanto, foi possível mostrar que A_v e A_h tenderam à compensação durante a noite e contribuíram para o FLE de modo menos expressivo durante o dia. Por outro lado, com o estudo de caso envolvendo dias bem homogêneos com relação ao [CO_2] sobre o dossel, A_v e A_h nem sempre atuaram de forma compensatória e, surpreendentemente, mostraram o seu controle sobre St.

Este resultado indica que é mais vantajoso e assertivo ter St bem resolvido para a determinação do FLE como a soma de FC e St. Estudos feitos sobre área de topografia complexa na floresta amazônica (DE ARAÚJO et. al. 2010) mostraram que os resultados de FLE noturnos apresentaram forte concordância com a RE, determinada por método independente, ao incluir mais de uma estimativa de St (medidos sobre três relevos distintos) no balanço de massa.

Mais notavelmente durante a noite, os valores médios de 30 minutos de A_v e A_h foram muito dispersos, o que requer mais investigação para, talvez, até propor uma nova forma de execução das medidas (caso seja um problema de escala espacial e/ou temporal) ou método de determinação (AUBINET et al., 2010). Trata-se de uma tarefa ambiciosa determinar uma forma genérica de estimativa da advecção, pois, como já é consenso, são transportes de

extrema dependência do local onde são medidos. Do modo como são obtidos atualmente, são incluídos no balanço de massa apenas em curtos períodos (dias, semanas) e sempre com base em seus ciclos médios diários, o que não resolve os problemas de subestimativa do FLE noturno em balanços anuais (AUBINET et al., 2010).

Após os preenchimentos de falhas do FLE, as quatro séries temporais geradas neste estudo mostraram coerência e concordância com as medidas observadas, reproduzindo seus padrões médios, sazonais e subestimativas esperadas do FLE noturno não filtrado. Este resultado foi observado tanto para os preenchimentos, utilizando puramente as curvas de luz e RE_A, quanto pelo método de preenchimento por médias de blocos. Considerados os erros, estas séries foram capazes de mostrar com base em suas somas anuais que esta floresta comportou-se como modesta fonte de CO_2, resultado comparado a medidas de respiração do solo e biométricas realizadas em estudos independentes nesta região entre 2006 e 2008 (SOUSA NETO et al., 2011; ALVES et al., 2010). Além disso, os valores de emissões obtidos neste trabalho foram comparáveis a outros encontrados para diferentes áreas de floresta ombrófila densa amazônica nesta mesma década (SALESKA et al., 2003; MILLER et al., 2004; HUTYRA et al., 2008), reforçando os resultados obtidos para esta floresta ombrófila densa montana em foco.

Por fim, este trabalho mostrou que os fluxos advectivos ocorreram sobre topografia complexa e participaram das alterações de [CO_2] sub e sobredossel. As dificuldades em determiná-los (A_v e A_h) sugerem aumentar de modo proporcional à resolução da escala da área de estudo e dos gradientes topográficos, levando em conta as características de outros sítios experimentais descritos na literatura, pois os gradientes de [CO_2] e a dinâmica dos movimentos de ar subdossel mostraram-se pouco organizadas e coerentes a ponto de permitir somas adequadas de A_v e A_h ao FLE, sem violar o que é realista do ponto de vista biótico. Contudo, desconsiderar os transportes advectivos na soma não penalizou a estimativa do balanço anual do FLE, uma vez que seus efeitos sugeriram ter sido contabilizados por St_m e, como é comumente encontrado na literatura, St_m e FC mostram ser suficientes na estimativa do FLE para medidas de longo prazo, o que serviu também para este estudo de caso sobre relevo complexo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M.; CARNEIRO, C.D. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, Sao Paulo, v. 28, n.2, p. 135-150, 1998.

ALVES, L.F. **Forest productivity and aboveground biomass change in Brazilian Atlantic Forest plots**. Poster. In: American Geophysical Union (AGU) Meeting of the Americas, Foz do Iguaçu, Brazil, 2010.

AUBINET, M. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, London, v. 30, p. 113–175, 2000.

AUBINET, M. Eddy Covariance CO_2 flux measurements in nocturnal conditions: An analysis of the problem. **Ecological Applications**, Oxford, v. 18, n.6, p. 1368–1378, 2008.

AUBINET, M. Direct advection measurements do not help to solve the nighttime CO_2 closure problem — evidence from three inherently different forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 655–664, 2010.

AUBINET, M.; HEINESCH, B.; YERNAUX, M. Horizontal and vertical CO_2 advection in a sloping forest. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 108, n.3, p. 397-417, 2003.

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

BALDOCCHI, D.D.On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 96,n.1/2, p. 257–291, 2000.

BALDOCCHI, D.D.; HICKS, B.B.; MEYERS, T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, Dordrecht, v. 69, n.5, p. 1331–1340, 1988.

CABRAL, O.M.R. Fluxes of CO_2 above a plantation of eucalyptus in southeast of brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, p. 49-59, 2011.

CAVALCANTI, I.F.A. Frentes frias sobre o Brasil. In: _____ **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 9, p. 317.

CHAPIN, F.S. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods,. **Ecossystems** , New York, v. 9, n.7, p. 1041-1050, 2006.

DA ROCHA, H.R. Measurements of CO_2 exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. **Biota Neotropica**, Campinas, SP, v. 2, n.1, p.23-32,, 2002.

DE ARAÚJO, A. C. et al. The spatial variability of CO_2 storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**,Dordrecht, v. 150, p. 226-237, 2010.

FEIGENWINTER, C.; BERNHOFERR, C.; VOGT, R. The influence of advection on the short term CO_2 budget in and above a forest canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 113, p. 201-224, 2004.

FEIGENWINTER, C. Comparison of horizontal and vertical advective CO_2 fluxes at three forest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, Dordrecht, v. 148, p. 12-24, 2008.

FINNIGAN, J.J. A comment on the paper by Lee (1998). Onmicrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agricultural Forest Meteorology**, Dordrecht, v. 97, p. 54-64, 1999.

FINNIGAN, J.J. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 107, p. 1-48, 2003.

GASCON, C.; WILLIAMSON, B. G.; DA FONSECA, G. A. B. Receding forest edges and vanishing reserves. **Science**, v. 288, n.5470, p. 1356-1358, 2000.

GOULDEN, M.L.. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, Oxford, v. 2, p. 169–182, 1996.

GOULDEN, M.L. Diel and seasonal patterns of Tropical Forest CO_2 exchange. **Ecological Applications**, Oxford, v. 14, n.4, p. S42-S54, 2004.

GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; DA ROCHA, H.R. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, New York, v. 111, 234-267p. (D8), 2006.

GRACE, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia. **Science**, v. 270, p. 778–780, 1995.

HOUSE, J. I. et al. Reconciling Apparent Inconistencies in Estimates of Terrestrial CO_2 Sources and Sinks. **Tellus**, Campo Grande, v. 55B, p. 345-363, 2003.

HUTYRA, L.R. Resolving systematic errors in estimates of net ecosystem exchange of CO_2 and ecosystem respiration in a tropical forest biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, Dordrecht, v. 148, p. 1266-1279, 2008.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Climate change 2007: the physical science basis. **Contribution of Working Group I to the 4th assessmente report of the IPCC**, 2007a. Disponível em: http://www.ipcc.ch/.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability. **Contribution of Working Group II to the 4th assessmente report of the IPCC**, 2007b. Disponível em: http://www.ipcc.ch/.

LAPOLA, D.M. A new world natural vegetation map for global change studies. **Anais da Academia Brasileira de Ciências (Annals of the Brazilian Academy of Sciences)**, v. 80, n.2, p. 397-408, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/aabc/v80n2/a17v80n2.pdf.

LEE, X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agricultural Forest Meteorology**, Dordrecht, v. 91, p. 39–49, 1998.

LUYSSAERT, S. Toward a consistency cross-check of eddy covariance flux-based and biometric estimates of ecosystem carbon balance. **Global Biogeochemical Cycles**, London, v. 23 GB3009, 2009. ISSN 3010.1029/2008GB003377.

MALHI, Y. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres** New York, v. 103, n. 31, p. 593–612, 1998.

MARCOLLA, B. et al. Role of advective fluxes in the carbon balance of an alpine coniferous forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, New York , v. 130, p. 193–206, 2005.

MARENGO, J. **Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos modelos globais de clima do IPCC**. CPTEC/INPE. São Paulo, Brasil. 2007. 182 pp. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_1.pdf.

MEDEIROS, M.C.M. P. **Caracterização fitofisionômica e estrutural de áreas de floresta ombrófila densa montana no Parque Estadual da Serra do Mar**. 85p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) - Instituto de Botânica da Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo, São Paulo, 2009.

MILLER, S. Annual CO_2 exchange by a tropical forest. **Ecological Applications**, New York, v. 14, n.4, p. 114-126, 2004.

MORGENSTERN, K. Sensitivity and uncertainty of the carbon balance of a Pacific Northwest Douglas-fir forest during an El Niño/La Niña cycle. **Agricultural and Forest Meteorology**, Dordrecht, v. 123, p. 201-219, 2004.

MYERS, N. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, New York, v. 403, p. 853-858, 2000.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. 2nd ed. London: Routledge Kegan & Paul. Methuem, 1987. 435 p.

OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; DIAS, A.C.T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Botucatu, v. 29, n. 1, p. 9-15, 2004.

OLLINGER, S.V. Canopy nitrogen, carbon assimilation and albedo in temperate and boreal forests: functional relations and potential climate feedbacks. **PNAS**, New York, v. 105, n.49, p. 19336-19341, December 2008. Disponível: http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0810021105.

OYAMA, M.C.; NOBRE, C.A. A new climate-vegetation equilibrium state for tropical south america. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 30, n.23, p. 2199-2203, 2003.

POWELL, T.L. Carbon exchange of amature, naturally regenerated pine forest in north Florida. **Global Change Biology**, Oxford, v. 14, p. 2523–2538, 2008.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A Language and Environment for Statistical Computing.** Vienna, Austria, 2011. Disponível em: < HYPERLINK "http://www.r-project.org/" \t "_blank" http://www.R-project.org/ >. Acesso em: 04 out.2011.

RANZINI, M. Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar. **Scientia Forestalis**, São Paulo, v. 66, p. 108-119, 2004.

REBMANN, C. Treatment and assessment of the CO_2-exchange at a complex forest site in Thuringia-Germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 684–691, 2010.

SALESKA, S.R. Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, v. 302, n. 5650, p. 1554–1557, 2003.

SETZER, J. **Atlas climatológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: CESP, 1966. 235p.

SILVA DIAS, M.A.F.; VIDALE, P.L.; BLANCO, C.M. Case study and numerical simulation of the summer regional circulation in São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, Amsterdam, v. 74, n.4, p. 371-388, 1995.

SOUSA NETO, E. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide in a gradient of elevation in the coastal Brazilian Atlantic forest. **Biogeosciences**, New York**,** v. 8, p. 733–742, 2011.

STAEBLER, R.M.; FITZJARRALD, D.R. Observing subcanopy CO_2 advection. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 122, p. 139–156, 2004.

STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988. 666 p.

TÓTA, J.S. **Estudo da advecção horizontal de CO_2 em florestas na Amazônia e sua influência no balanço de carbono**. 95 p. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) - Instituto Nacional de Pesquisas Aéreas, Universidade Estadual do Amazonas, Manaus, 2009.

TRUMBORE, S.E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. **PNAS**, New York, v. 94, p. 8284–8291, Aug. 1997.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal**. [S.l.]: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991.

VON RANDOW, C. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in southwest Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, Dordrecht, v. 78, p. 5-26, 2004.

WEBB, E.K.; PEARMAN, G.I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for ensity effects due to heat and water vapor transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Amsterdan, v. 106, p. 85–100, 1980.

WEBB, T.J. . Forest cover-rainfall relationships in a biodiversity hotspot: the Atlantic forest of Brazil. **Ecological Applications**, Tempe, v. 15, n. 6, p. 1968–1983, 2005.

WILCZAK, J.M.; ONCLEY, S.P.; STAGE, S.A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-Layer Meteorology,** Dordrecht, v.99, n.1, p.127– 150, 2001.

WOFSY, S.C. Net exchange of CO_2 in amid-latitude forest. **Science**, v. 260, n. 1314–1317, 1993.

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

ZERI, M. **Investigation of high nighttime CO_2-fluxes at the Wetzstein spruce forest site in Thuringia, Germany.** 2008. 115 p. Ph.D. Thesis.(Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany, Technical Reports 13. 2008. Online at: <http:// HYPERLINK "http://www.bgc-jena.mpg.de" www.bgc-jena.mpg.de >.

ZERI, M. . Analysis of periods with strong and coherent CO_2 advection over a forested hill. **Agricultural and Forest Meteorology**, Dordrecht, v. 150, p. 674-683, 2010.

APÊNDICE

Cálculo da equação do plano para estimativa dos gradientes horizontais do [CO_2]

Cada plano P[CO_2](z) para cada ciclo de medidas foi determinado pelas coordenadas do tipo:

- em TEC: (x=0, y=0, z=$[CO_2]_{(TEC)}$(z));
- em TB: (x=17, y=47, z=$[CO_2]_{(TB)}$(z));
- em TA: (x=49.8, y=4.4, z=$[CO_2]_{(TA)}$(z)),

De posse dos três pontos, o produto vetorial dos vetores formados pela diferença entre TEC(x,y,z) e TB(x,y,z) e entre TEC(x,y,z) e TA(x,y,z) gera os coeficientes A, B e C através do determinante desta matriz, tal que:

$$\begin{array}{ccc} A & B & C \\ (17.\mathbf{0} - \mathbf{0}) & (47.0 - 0) & [CO_2]_{(TB)}(z) - [CO_2]_{(TEC)}(z) \\ (49.8 - 0) & (4.4 - 0) & [CO_2]_{(TA)}(z) - [CO_2]_{(TEC)}(z) \end{array}$$

Dada a equação do plano definida como A(x-x0) + B(y-y0) + C(z-z0) + D = 0, é determinada a constante D ao se atribuir um dos pontos como P(x0,y0,z0). Desta forma, valores de [CO_2] foram determinados para os pontos (x=50, y=0), (x=0, y=50) e (x=50, y=50) uma vez que o valor do [CO_2] no ponto (x=0, y=0) é o próprio existente em TEC, localizada na origem do plano cartesiano.