

19 Balanço de energia, vapor d'água e CO₂ em áreas de floresta tropical na Amazônia Central

RESUMO

Este relatório apresenta o **Projeto Balanço de Energia, Vapor D'Água e CO₂ em áreas de floresta tropical na Amazônia Central** (Projeto 0966/95) realizado pelo INPE e INPA, durante o período de 1996 à 1999. São apresentados os objetivos deste projeto e discutidos os principais resultados científicos alcançados.

1. INTRODUÇÃO

Na última década, a Amazônia tem sido foco de atenção mundial devido à sua riqueza mineral, a sua grande biodiversidade de espécies florestais e também pelos efeitos que o desmatamento em grande escala pode provocar no clima, na hidrologia e nos ciclos biogeoquímicos em escalas regional e global.

Com relação a associação floresta-clima, o avanço da informática facilitou o desenvolvimento e a utilização de Modelos Numéricos de Circulação Geral da Atmosfera, analisando o efeito dos processos de troca de momentum, energia e vapor d'água entre a superfície e a atmosfera. Como exercício da problemática do desmatamento, vários estudos de simulação numérica do clima em situações de floresta e desmatamento (troca de superfícies vegetadas de floresta tropical por áreas de pastagens) já foram realizados, entre os quais pode-se citar o trabalho de Nobre et al. (1991). De modo geral, os resultados obtidos por vários autores convergem de que ocorrerá um aumento da temperatura do ar próximo à superfície (variando de 0,6 à 2,0 °C), uma redução nos totais de precipitação e evaporação (de 20 a 30% do valor do cenário de floresta) e uma estação seca mais prolongada. Estas modificações, se confirmadas pela realidade, certamente acarretarão implicações ecológicas importantes.

Outro aspecto importante nesta problemática de mudanças climáticas globais é o papel que o gás dióxido de carbono (CO₂) desempenha no balanço de energia do sistema biosfera-atmosfera. Devido a sua grande extensão, as florestas tropicais úmidas são importantes no ciclo global do carbono, por conterem aproximadamente 40% do C estocado na biomassa terrestre. (Phillips et al., 1998). Medidas recentes (Grace et al., 1996, Malhi et al., 1998, Phillips et al., 1998) sugerem que a floresta Amazônica seja um sorvedouro de CO₂ da atmosfera e que o desmatamento que está ocorrendo libera uma quantidade grande de carbono para a atmosfera, da ordem de 1,6 tonC.ha⁻¹.ano⁻¹ (IPCC, 1996). Ainda não

se conhece bem os limites de estocagem de biomassa em florestas tropicais úmidas, a partir do qual se estabelece um equilíbrio dinâmico, onde os ganhos igualam-se as perdas. Portanto, para conhecermos a associação entre a dinâmica do crescimento deste ecossistema e os limites de estocagem, há a necessidade de monitoramento contínuo de longo prazo das trocas de carbono entre o ecossistema e o meio. A atmosfera representa a maior fronteira destas trocas.

Um outro processo fundamental nos estudos sobre os intercâmbios de energia é o estabelecimento do regime de radiação dentro do interior do dossel. O comportamento do perfil de radiação desde a superfície até o topo do dossel interage com a atmosfera e configura os padrões dos perfis de temperatura, umidade específica, ventos e também da concentração de CO₂. Estes, por sua vez, modificam e caracterizam os fluxos entre a vegetação e a atmosfera.

Este Projeto foi idealizado para coletar dados que permitam obter um conhecimento detalhado dos processos físicos da interação biosfera-atmosfera. Neste sentido, os objetivos foram divididos em: a) medidas de longo prazo de fluxos de energia, vapor d'água e CO₂ em áreas de floresta tropical; b) medidas de concentração de CO₂ na camada limite e c) medidas de penetração de luz solar no interior da floresta tropical. Este trabalho abordará os principais resultados científicos encontrados pelos segmentos acima mencionado.

2. SÍLIO EXPERIMENTAL, DADOS E MÉTODOS

As medidas experimentais ocorreram em duas reservas florestais do INPA, a saber: Reserva Floresta Adolfo Ducke (medidas de penetração de luz solar) e Reserva Biológica do Rio Cueiras (medidas de fluxos de energia, vapor d'água e CO₂ e estrutura da camada limite noturna), sendo também conhecida como Reserva ZF-2. Estas duas áreas possuem vegetação tropical não perturbada, com árvores de aproximadamente 35 m de altura e cujas espécimes mais emergentes chegam a atingir 40 m, biomassa seca entre 300-350 t.ha⁻¹ e índice de área foliar entre 5 e 6. A Reserva Ducke dista aproximadamente 25 km de Manaus e a Reserva ZF-2 dista aproximadamente 70 km. O clima é caracterizado por temperaturas e umidades elevadas: a temperatura média anual é de 26,7 °C, sendo os meses de setembro e outubro os mais quentes (temperatura máximas ao redor de 33 °C). A umidade relativa apresenta índices médios mensais acima dos 80%. A normal climatológica (1965/1994) apresenta duas estações anuais, sendo um período seco (junho à novembro) com precipitação mínima de 93 mm (julho) e um período chuvoso (dezembro à maio), sendo que o total mensal máximo é de 300 mm (fevereiro).

Para monitorar as trocas dos fluxos de energia, vapor d'água e CO₂ entre um ecossistema e a atmosfera, é necessário medir-se os principais fluxos de entrada e saída dos gases no sistema. Devido a enorme heterogeneidade e complexidade espacial, tanto nos sumidouros (folhas) quanto nas fontes de CO₂ (demais tecidos e organismos), generalizações baseada em medidas diretas dos componentes de fluxo apresentam grandes desafios. Como todos compartimentos emitem e retiram CO₂ da atmosfera, e como o ar próximo destas fontes e

sumidouros está em movimento turbulento, a componente vertical deste ar leva de e para a atmosfera acima concentrações de CO₂ que refletem sua origem e o somatório de trocas a que foi exposto. Assim, as trocas de ar entre o dossel da floresta e a atmosfera livre acima totalizam as trocas na sua área de influência. Nos últimos dez anos foi desenvolvido um sistema de equipamentos micrometeorológicos para mensurar as trocas totais de CO₂ na interface do ecossistema com a atmosfera livre, utilizando sensores tridimensionais de vento e analisadores de CO₂ de resposta rápida, instalados vários metros acima do dossel superior da floresta. Esta técnica (correlação de vórtices turbulentos ou “eddyflux correlation”) viabilizou medições contínuas e representativas de grandes superfícies. As medidas de fluxos foram realizadas no topo de uma torre micrometeorológica de 46 m de altura (ZF-2 Km 14), durante o período de setembro de 1995 até julho de 1998. As medidas de superfície (acima e dentro do dossel da vegetação) foram realizadas nesta torre e consistiu de medidas de fluxos de calor sensível, latente, momentum e CO₂. Os equipamentos utilizados para as medidas de fluxos de CO₂ foram um anemômetro sônico 3D Solent Gill (Lymington, Reino Unido) e um analisador de gás infra-vermelho Li-Cor 6262 (Lincoln, US), sendo que os fluxos foram calculados pela técnica de correlação de vórtices. O software utilizado para amostrar o ar e calcular os fluxos foram desenvolvidos pela Universidade de Edinburg. Uma descrição detalhada do software e do controle de qualidade dos dados encontra-se em Malhi et al. (1998). Dentro do dossel, foram realizadas medidas de perfis de temperatura, umidade específica e de concentração de CO₂ nas alturas de 1,0, 9,0, 17,4, 25,3, 33,3 m. A partir de julho de 1999, foi instalada uma nova torre micrometeorológica na Reserva ZF-2 (Km 32), aumentando a representatividade espacial das medidas. A Figura 1 mostra uma representação esquemática das medidas e uma imagem da torre micrometeorológica (ZF-2 Km 14).

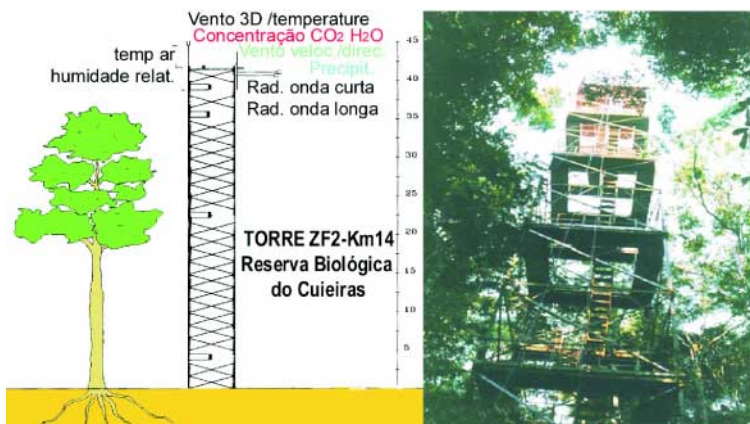


Figura 1: Representação esquemática das medidas realizadas na Reserva Biológica do Rio Cuieiras.

As medidas realizadas com o balão cativo (zeppelin com volume de 5,25 m³) foram efetuadas durante o período de 16 a 26 de novembro de 1995. Os dados compreenderam um conjunto de perfis da concentração de CO₂ obtidas com o levantamento de um tubo especial de plástico. O ar em alturas pré-determinadas (a cada 50 m desde a superfície até 300 m –máxima extensão do tubo plástico) era trazido para a superfície por uma bomba de sucção e medido a concentração de CO₂ com um analisador de gás infra-vermelho CIRAS 1 (Hitchin, Reino Unido). Estas medidas foram realizadas desde o por-do-sol (aproximadamente às 18 Hora Local – HL) e durante toda à noite, em intervalos de içamentos a cada 1,5 horas. Simultaneamente à estas medidas de CO₂, medidas de temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade específica e ventos foram realizadas com a sonda meteorológica A.I.R. (Boulder, EUA). Estes dados foram transmitidos por telemetria (frequência de 403,5 MHz) e recebido por um receptor ADAS- A.I.R. (Boulder, EUA). As medidas do balão cativo ficaram a cargo da cooperação INPE e Institute of Hydrology (Projeto MACOE- Manaus Atmospheric CO₂ Experiment - Culf et al., 1998) e as medidas de fluxos e de concentração de temperatura, umidade e CO₂ dentro do dossel foram realizadas conjuntamente entre o INPA e a University of Edimburgh (Projeto JACAREX - Joint Amazonian Carbon Experiment-JACAREX - Malhi et al., 1998).

Para as medidas de penetração de luz solar (espectro de 0,3 a 3,0 mm) dentro do dossel, foram utilizados 8 tubos solarímetros (Delta-T device,

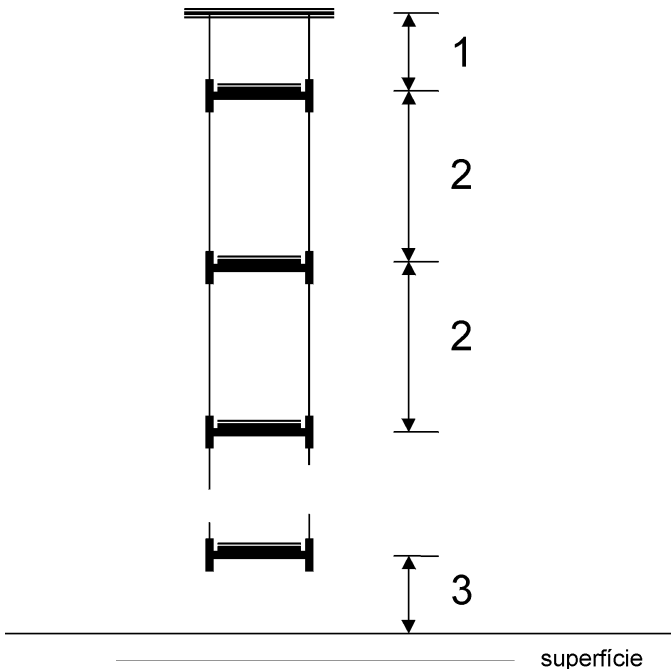


Figura 2: Representação esquemática do reticulado utilizado para as medidas de radiação solar.

Cambridge, Reino Unido) colocados em uma vertical, sendo que os sensores mais próximos à superfície (alturas de 2 e 5 m) eram fixos e os restantes (6 sensores) em alturas variáveis em função do tamanho das árvores em que o reticulado foi suspenso (Figura 2). Acima da vegetação, no topo de uma torre micrometeorológica instalada na Reserva Ducke, mediu-se o fluxo de radiação solar incidente através de piranômetro (CM-5 Kipp & Zonen, Delft, Netherlands). As medidas foram integradas por períodos de 20 min, sendo os dados coletados e armazenados por um sistema de aquisição de dados (21 X Campbell Scientific Inc, Inglaterra) com taxa de amostragem de 1 observação por minuto. O período de medidas de radiação solar estendeu-se de 29 de outubro à 11 de dezembro de 1998, no período de transição do final da estação seca e início do período chuvoso. Durante este período foram realizadas 3 verticais, o que implica em uma amostragem horizontal de 3 pontos.

3. RESULTADOS

a) medidas de longo prazo (**líder: Antonio Donato Nobre**)

As medidas realizadas na torre da ZF-2 Km 14 em Manaus formam a série temporal de dados de fluxo de CO₂ mais longa existente para floresta tropical e representam uma enorme contribuição científica do Projeto JACAREX. O primeiro ano de resultados indica um sumidouro de carbono de 5,9 t C ha⁻¹ (Figura 3), significativamente maior que o medido para áreas de floresta tropical em Rondônia (Grace et al., 1996) e para a Reserva Ducke (Fan et al., 1990). Ressalta-se que estas medidas de Grace et al. (1996) e de Fan et al. (1990) foram obtidas em um pequeno intervalo de tempo (da ordem de 50-60 dias) e extrapolado para o ano inteiro, diferentemente dos dados obtidos por este estudo: medidas contínuas durante um ciclo sazonal completo. Mesmo assim, esta assimilação de carbono é alto e controverso pois se for contínuo significaria dobrar a biomassa da floresta a cada 100 anos, algo difícil de se imaginar para um sistema com estoque de biomassa já tão alto. Um artigo recente compilando resultados de variados estudos de blocos florestais em toda a Amazônia (Phillips et al., 1998) demonstrou que há considerável variabilidade no balanço líquido de carbono para estas florestas, dependendo da história de perturbação silvigenética. Nesta linha, é reconhecido o fenômeno de mortalidade de árvores decorrente de seca prolongada em anos de "El Niño", assim como a destruição catastrófica localizada de árvores por tormentas de vento ("blow downs"). No longo prazo a floresta poderia então estar "recuperando" biomassa, não necessariamente ganhando-a. Contudo, ainda existe a possibilidade real de haver uma resposta deste ecossistema a mudanças globais, como a fertilização por CO₂ e outros nutrientes associados a poluição antropogênica, assim como uma modificação pelo regime de chuvas. Com relação às novas medidas efetuadas na nova torre (ZF-2 Km 32), os primeiros meses de resultados indica um sumidouro de carbono de quase 9 ton C ha⁻¹ ano⁻¹. Este valor é quase o dobro do medido para o primeiro ano da torre ZF2-Km14, sendo o que mais surpreende, é ocorrer duran-

te a estação seca. Medições na torre da ZF-2 Km 14 (Malhi et al., 1998), corroboradas em exercícios de modelagem (Williams et al., 1998), indicaram uma proeminente maior fixação líquida de C no ecossistema ZF2-Km14 durante a estação úmida do que durante a estação seca. Aparentemente a abundância de radiação disponível para fotossíntese na estação seca não pode ser aproveitada na fixação extra de carbono, devido a déficit de água no sistema solo-planta-atmosfera (fechamento de estômatos). Reside neste fato, talvez, a explicação para o imenso sumidouro que estamos medindo nestes meses. O ano de 1999 é um ano típico de evento "La Nina", com acentuada anomalia de precipitação em Manaus. Esta estação seca continua com radiação abundante nas manhãs e princípios de tarde mas, diferentemente dos anos normais, apresenta chuvas frequentes nos finais de tarde. Assim, parece que o sistema estaria fixando carbono em condições ótimas (abundância de água e radiação). Um valor tão alto de fixação, entretanto, suscita dúvidas sobre possíveis erros de medição. Devido a efeitos topográficos, pode estar havendo uma fuga noturna de CO₂ com uma possível drenagem de ar frio para os vales, o que estaria inflando o sumidouro (entradas bem medidas durante o dia, com perdas mal medidas durante a noite). Para verificar o armazenamento de carbono durante à noite, o sistema monitora as concentrações de CO₂ em seis alturas na torre, que permitem representar o perfil vertical com os gradientes de concentração. Através do armazenamento é possível calcular quanto CO₂ deixou o sistema, e corrigir os fluxos medidos. (Malhi et al., 1998).

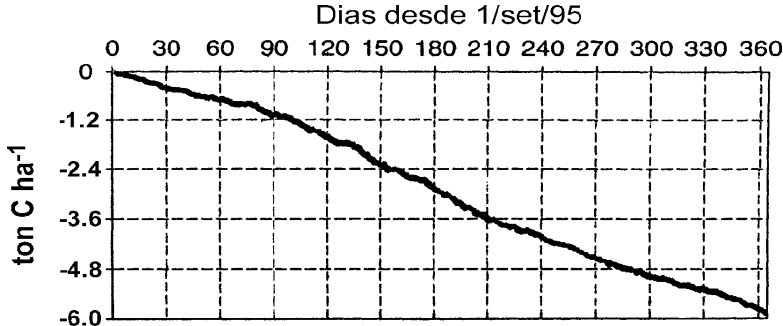


Figura 3: Assimilação de carbono pela floresta tropical (Projeto JACAREX/PPD-G7)

O CO₂ produzido nos solos de florestas tropicais úmidas pela respiração de raízes, microrganismos, fauna do solo e pela oxidação química dos compostos de carbono pode representar mais de 80% de todo CO₂ emitido pelo ecossistema (Meir et al., 1996). A taxa de transferência do CO₂ é controlada a) pela sua taxa de produção no solo; b) pelos gradientes de temperatura; c) por sua concentração na interface solo-atmosfera; d) pelas propriedades físicas do solo; e e) pelas flutuações da pressão atmosférica do ambiente (Sotta, 1998). Utilizando câmaras dinâmicas de fluxo aberto para a atmosfera e um analisador de infravermelho para CO₂ foram feitas medidas em 20 pontos amostrais distribuídos aleatoriamente dentro de um bloco, com uma replicata para cada ponto

(para a descrição detalhada do local de estudo e a metodologia empregada ver Sotta, 1998). As medidas de efluxo para avaliação da variação temporal foram conduzidas na estação seca (período de junho-julho de 1997), em três fases, cada uma com cinco dias de duração. O maior valor de efluxo foi de 12,95 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e o menor foi 4,04 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e a média de todas as medidas espaciais foi $6,86 \pm 1,78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Embora a temperatura e a umidade do solo sejam frequentemente fatores dominantes no controle do efluxo de CO₂ do solo, estas são variáveis mais temporais que espaciais em ecossistemas relativamente uniformes. Portanto, a variação espacial do efluxo de CO₂ do solo deve seguir os padrões de distribuição das raízes e dos microorganismos na liteira, nas camadas orgânicas e no solo mineral. A caracterização da distribuição espacial da biomassa na vegetação pode conseqüentemente ser uma forma indireta de estimar a variação espacial do efluxo de CO₂ do solo (Sotta, 1998). Para todas as medidas, os resultados indicaram que quando não há chuva os picos de emissão de CO₂ ocorrem entre 13 e 14 HL. A variação do efluxo em 24 horas foi, em média, 1,1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mas com o solo seco a variação caiu para 0,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

b) dinâmica e estrutura da camada limite estável (noturna) (**líder: Gilberto Fisch**)

Na realização do MACOE, foram coletados dados durante 10 noites seguidas (de 16 a 25/11/1995) que, após testes de consistência e controle de qualidade, produziram 49 perfis. Embora a altura máxima atingível pelo balão cativo fosse de 300 m (devido a limitação do tubo flexível), somente em algumas poucas situações (aproximadamente 15 casos) é que esta altura foi atingida. Um dos motivos foi a ocorrência de ventos fortes (acima de 7,0 m.s⁻¹), o que impedia as atividades com o balão cativo. Ventos acima deste valor provocam uma forte tensão no cabo do balão, com risco de rompê-lo. Os dados dos perfis foram interpolados linearmente na vertical em intervalos de 25 m. A medida da concentração de CO₂ na altura de 350 m (356,8 ppm) foi calculada como sendo a concentração da atmosfera livre, uma vez que esta altura representa o máximo desenvolvimento vertical da camada limite noturna em regiões de floresta tropical (Fisch & Nobre, 1997). Um perfil composto de todos os içamentos é apresentado na Figura 5 e mostra claramente a evolução temporal da concentração de CO₂: às 18:00 HL o perfil está bem misturado devido as condições convectivas do período da tarde, com um valor aproximadamente constante com a altura de 360 ppm. Com o decorrer da noite, ocorre um aumento da concentração de CO₂, especialmente nas camadas mais baixas e próximas ao solo. Às 21 HL, o perfil de CO₂ é de 375 ppm em 50 m, aumentando este valor para 389 ppm às 24 HL, 409 ppm às 3:00 HL e 420 ppm às 5:30 HL. Esta evolução temporal durante à noite mostra uma variação de 60 ppm em 50 m, decrescendo este valor para 36 ppm em 100 m e apenas 28 ppm em 150 m. Esta pequena variação, principalmente entre 100 e 150 m, é provavelmente associada com o aumento da velocidade do vento durante à noite. O conjunto de dados de fluxo e concentração de CO₂ mostra um aumento da concentração de CO₂ após o nascer-do-sol, devido a

quebra da estabilidade térmica no nível do dossel e também pelo início da turbulência gerada pela insolação solar. O ar rico em CO₂ preso no interior da floresta é liberado para a atmosfera, pela ação da turbulência. Na média deste período, a concentração de CO₂ dentro do dossel atingiu valores máximos no nível mais baixo (1m) com 409,8 ppm, decrescendo progressivamente até atingir a mais baixa concentração no nível de 46,5m (387,1 ppm). O ciclo diário médio da concentração de CO₂ para cada nível é mostrado na Figura 4, apresentando um máximo característico no início da manhã oscilando entre 6 e 8 HL de acordo com os níveis onde, em geral, observa-se maior taxa de turbulência dinâmica associada. Entretanto, na média a floresta age como um sorvedouro de CO₂ atmosférico entre 8 e 18 HL em todos os níveis e atua como emissor no restante do dia. (Ferreira da Costa et al., 1999).

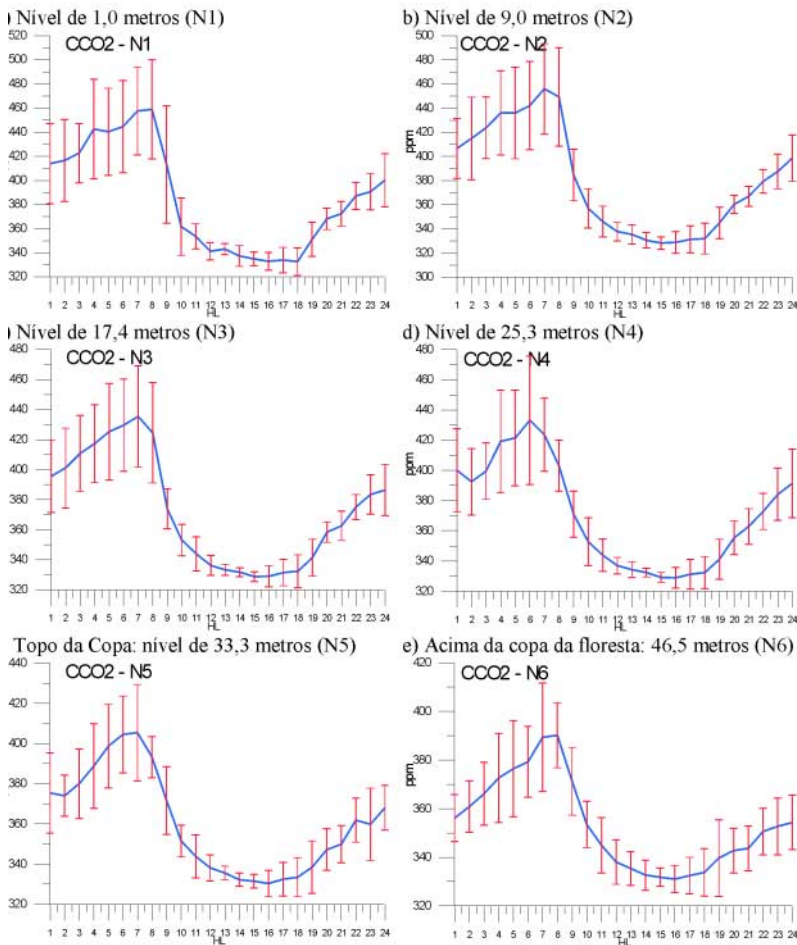


Figura 4 – Ciclo Diário da Concentração de CO nos níveis a) 1,0 (N1); b) 9,0 (N2); c) 17,4 (N3); d) 25,3 metros (N4); e) 33,3 (N5) e f) 46,5 (N6) metros.

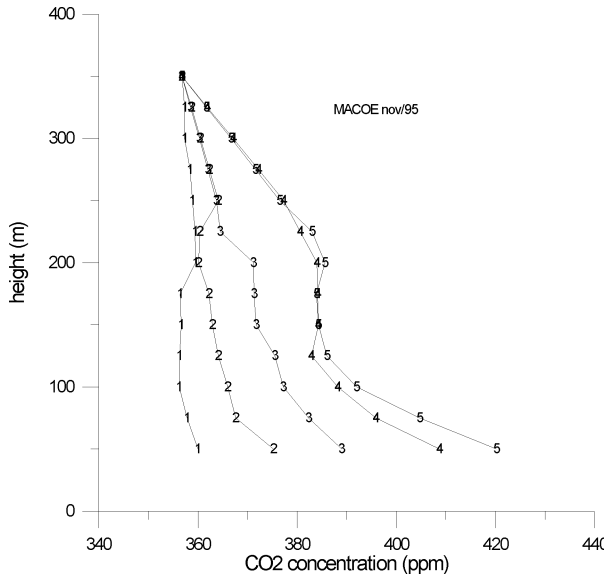


Figura 5: Perfil composto da variação temporal da concentração de CO₂ dentro da camada limite (Projeto MACOE/PPD-G7).

b-1) Balanço de CO₂ dentro da camada limite

O balanço de CO₂ foi realizado com dados oriundos dos perfis de concentração de CO₂ medidos pelo balão cativo e com as medidas realizadas no topo da torre. A idéia básica deste cálculo é o de que ocorre um forte acoplamento entre a vegetação e a atmosfera e que se não houver perdas laterais (advecção) deste CO₂, a variação temporal (armazenamento) deve ser a resposta das modificações dos fluxos de superfície. O armazenamento (S_{co_2}) da concentração de CO₂ na camada limite foi calculada como:

$$S_{co_2} = \int_0^h \frac{\partial CO_2}{\partial t} dz \quad (\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$$

onde a altura (h) foi escolhida como 350 m. A variação temporal de CO₂ ($\partial CO_2 / \partial t$) foi calculada com os perfis das 18 e 5:30 HL e integrada na vertical (z). A Tabela 1 apresenta o balanço entre este armazenamento e os fluxos turbulentos integrados durante todo o período noturno. Existe um bom ajuste em 3 noites (17, 18 e 23/11) e uma forte discrepância em 3 outras noites (16, 19 e 22/11). Para classificar as noites bem e mal correlacionadas em função da estabilidade atmosférica, o comprimento de Monin-Obhukov (L) foi calculado e para pequenos valores de $1/L$ (que representa estabilidade fraca), ocorre uma boa correlação entre o fluxo de CO₂ que saem do dossel e o armazenamento na camada limite.

Nestas noites (17, 18 e 23/11) ocorre ventos fortes, os quais misturam em toda camada limite noturna o ar rico em CO₂ proveniente da vegetação. Ainda nestas noites o fluxo de calor sensível é mais alto do que o normal, indicando um resfriamento da superfície menor. Ocorre também nebulosidade. Nas noites em que não há o balanceamento do CO₂ (16, 19 e 22/11), a estabilidade é muito forte (tipicamente entre 0,5 – 1,0 m⁻¹), desacoplando o ar do interior do dossel e acima dele.

Tabela 1: Balço de CO₂ durante o MACOE. Unidades em mmol.m⁻².s⁻¹.

Noites	Fluxo de CO ₂	Armazenamento CO ₂
16*	0,48	11,53
17*	4,84	5,79
18	3,80	2,95
19	0,08	2,83
20	2,60	7,96
21	4,43	7,97
22	0,45	10,69
23	5,98	6,71
24	2,86	6,37
25**	3,85	8,18

* integrado das 21 até as 5:30 HL. ** integrado das 18 até as 3 HL

c) Penetração de luz solar (**líder: Ari de Oliveira Marques Filho**)

Os dados coletados de radiação dentro do dossel foram inicialmente separados em 4 classes de radiação externa (acima da copa), em função da cobertura de nuvens. Esta classificação baseou-se em situações em que predominou radiação difusa (céu encoberto, classes I e II) ou radiação direta (classes III e IV). A Figura 6 mostra claramente estas classes, através das médias do fluxo de radiação solar para cada hora. A partir dos dados de penetração de luz solar e utilizando-se da lei de extinção da radiação (Lei de Lambert-Beer) dentro do dossel, é possível estimar-se a quantidade de vegetação para cada nível de altura e, conseqüentemente, do índice de área foliar (IAF). Este valor é importante se conhecer pois é através da superfície das folhas que ocorre as trocas gasosas: perda de água pelas folhas e absorção de CO₂. Este parâmetro IAF é uma importante variável de entrada nos modelos de Circulação Geral da Atmosfera.

A partir dos dados coletados nas 3 verticais, foi possível calcular a densidade de área foliar por altura e observou-se que existem 2 zonas distintas de concentração de folhas: uma principal situada na parte alta da vegetação com concentração máxima de área foliar de aproximadamente 0,3 m²/m³ localizada acima dos 20 m de altura; e um pico secundário na parte baixa da vegetação (entre 3 e 10 m) com uma densidade de área foliar praticamente constante com a altura (da ordem de 0,16). Estes 2 extratos são intercalados por uma zona de transição com baixa densidade de área foliar, cujo valor mínimo é de 0,10 m²/m³ (localizado na altura de 15 m). Na Tabela 2 é apresentado o valor médio (3 verticais) de IAF.

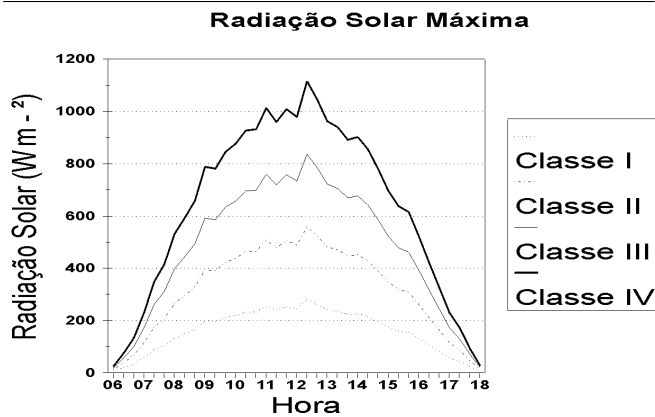


Figura 6: Classes de Radiação Solar obtidas na Reserva Ducke.

	0,5	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
IAF	6,2	5,6	4,9	4,2	3,4	2,3

Tabela 2: Valores de IAF (m²/m³) em função da altura.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Este projeto coletou uma série de dados que determinam as trocas de energia, vapor d' água e CO₂ entre a floresta tropical e a atmosfera. Nos próximos 2 anos, uma análise detalhada destes dados serão conduzidas por pesquisadores envolvidos neste Projeto, bem como dos jovens cientistas engajados nos mesmo. Uma parte deste conjunto de dados já foi analisada e os principais resultados podem ser condensado como:

- Os esforços das medidas de longo prazo para o monitoramento das trocas de CO₂ entre a biosfera e a atmosfera produziram resultados pioneiros e surpreendentes para as florestas tropicais úmidas consideradas em clímax. Para a confirmação e verificação dos resultados de nossa pesquisa é necessária maior abrangência espacial e temporal. Os valores altos de fixação de carbono atmosférico na biomassa, se confirmados em medições independentes e contínuas de muitos anos (por exemplo pela continuação deste projeto e/ou Projeto LBA), podem indicar que as florestas funcionariam como filtros planetários para o excesso de CO₂ emitido pela queima antrópica de combustíveis fósseis. No futuro, seja por crescimento natural, seja por um mecanismo de resposta a mudanças globais, o aumento progressivo do estoque de carbono nestas florestas terá enorme impacto ecológico e econômico. Esta possível função metabólica no organismo planetário pode vir a juntar argumentos muito fortes para a preservação da floresta dos usos predatórios.

- Os fluxos calculados pelos perfis na camada limite são estimativas regionais das trocas gasosas entre a vegetação e a atmosfera e não se deve esperar que eles sejam exatamente iguais as medidas efetuadas em um único ponto (como é o caso da torre). Uma explicação para isto é que as partes baixas devido aos vales dos rios e/ou bordas da floresta possuem um fluxo maior de CO₂ do que o plato (aonde está instalada a torre) e as medidas efetuadas com o balão cativo captam esta informação.

- A caracterização do regime de radiação solar em meio vegetal combinada com a inversão de modelos físicos (Lei de Lambert-Beer) que representem a interceptação da radiação solar pela vegetação produzem estimativas do índice de área foliar (IAF). O índice calculado para a Reserva Ducke foi de 6,4, valor este consistente com o determinado em outros estudos para a área de floresta tropical (McWilliam et al., 1993), através da metodologia destrutiva de medida direta de toda área foliar existente em uma área amostral escolhida.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus sinceros agradecimentos a todos os participantes envolvidos neste projeto, quer seja na árdua tarefa de coleta de dados de campo, quer seja nas análises dos dados coletados. Referências especiais aos colaboradores P. Stefani (UNITUS), A. Araújo (INPA), E. D. Sotta (INPA), M. G. P. Pereira (UFV), P. Kabat (SC-DLO), A. D. Culf (IH), Y. Malhi (UoE), Ricardo Dallarosa (INPA), R. Ferreira da Costa (ESALQ-USP) e A. R. Pereira (ESALQ-USP). Os resultados aqui apresentados foram obtidos através das cooperações técnico-científicas JACAREX (1995-1998), MACOE (1995-1996), EUSTACH (1999) e LBA (1999). Agradecimento especial à Funcate, na pessoa do Sr. José Elias Baruel, por viabilizar a parte administrativa do projeto

5. REFERÊNCIAS

- Culf, A.D.; Fisch, G.; Malhi, Y.; Ferreira da Costa, R.; Nobre, A.D.; Marques Filho, A. de O.; Gash, J.H.C.; Grace, J. Carbon dioxide measurements in the nocturnal boundary layer over Amazonian Forest. **Hydrology and Earth System Sciences**, 3(1): 39 – 53, 1999;
- Fan, S.-M., Wofsy, S., Bakwin, P., Jacob, D., Atmospheric-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon forest, **Journal of Geophysical Research**, 95(D10), 16,851-16,864, 1990;
- Ferreira da Costa, R.; Fisch, G.; Pereira, A.R.; Culf, A.D.; Malhi, Y.; Nobre, C.A.; Nobre, A.D. Quantificação da concentração de dióxido de carbono em perfis dentro de uma área de floresta na Amazônia Central. **Anais do X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Florianópolis-SC, julho 19-23, p. 230-237, 1999;
- Fisch, G.; Nobre, C.A. The atmospheric boundary layer in the Amazon region. Special Symposium on Boundary Layer and Turbulence. **Proceedings of the 77th AMS Annual Meeting**, Long Beach-CA, February 2-7, p. 72-75, 1997;

- Grace, J.; Malhi, Y.; Lloyd, J.; McIntire, J.; Miranda, A.C., Meir, P.; Miranda, H. S. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. **Global Change Biology**, 2(3): 209 – 218, 1996;
- Malhi, Y.; Nobre, A.D.; Grace, J.; Kruijt, B.; Pereira, M.G.P.; Culf, A.D.; Scott, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, 103(D24): 31593 – 31612, 1998;
- Marques Filho, A. de O.; Dallarosa, R.L.G. Intercepção de radiação solar e distribuição espacial de área foliar em floresta. **Acta Amazônica** (submetido), 20 p., 1999;
- McWilliam, A.L.C.; Roberts, J.M.; Cabral, O.M.R.; Leitão, M.V.B.R.; Costa, A.C.C.L.; Maitelli, G.; Zamparoni, C.A.G.P. Leaf area index and above ground biomass of terra firme rain forest and adjacent clearings in Amazônia. **Funcional Ecology**, 7: 210 – 217, 1993;
- Meir, P.; Grace, J.; Miranda, A.C.; Lloyd, J. Soil respiration measurements in the Brazil forest and cerrado vegetation during the wet season. In: **Amazonian Deforestation and Climate**. Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.; Victoria, R.L. (eds.). John Wiley, New York, 319 – 330, 1996;
- Nobre, C.A.; Sellers, P.J.; Shukla, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, 4(10): 957 – 987, 1991;
- Phillips, O.L.; Malhi, Y.; Higuchi, N.; Laurance, W.F.; Nunez, P.V.; Vásquez, R.M.; Laurance, S.G.; Ferreira, L.V.; Stern, M.; Brown, S.; Grace, J. Changes in the carbon balance of the tropical forests: evidence from long-term plots. **Science**, **282**: 439-442, 1998;
- Sotta, E.D., Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia central, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), dissertação de mestrado, 150 p., 1998
- Williams, M.; Malhi, Y.; Nobre, A.D.; Rastetter, E.B.; Grace, J.; Pereira, M.G.P. Seasonal variation in net carbon exchange and evapotranspiration in a Brazilian rain forest: A modelling analysis, **Plant Cell Environment**, X:XX-XX, 1998;

EQUIPE

Carlos A. Nobre - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/CPTEC), Gilberto Fisch - Centro Técnico Aeroespacial (CTA/IAE), Antonio Donato Nobre, Ari de Oliveira Marques Filho - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)

