

## QUANTIFICAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM PERFIS DENTRO DE UMA ÁREA DE FLORESTA NA AMAZÔNIA CENTRAL.

Rafael FERREIRA DA COSTA<sup>1</sup>, Gilberto FISCH<sup>2</sup>, Antonio Roberto PEREIRA<sup>3</sup>, Alistair CULF<sup>4</sup>, Yadvinder MALHI<sup>5</sup>, Carlos Afonso NOBRE<sup>6</sup> e Antonio Donato NOBRE<sup>7</sup>.

### RESUMO

Os dados de CO<sub>2</sub> foram coletados no período de 21-28 de outubro de 1995, em área de floresta preservada pertencente ao Instituto de Pesquisas da Amazônia (INPA), localizada a cerca de 70 km ao norte de Manaus (AM). Em torre metálica montada na floresta, foram realizadas medidas em seis níveis distintos: 1m; 9m; 17,4m; 25,25m; 34,25m e 46,5m. Na média do período, a concentração de CO<sub>2</sub>, 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). Esta diferença representa cerca de +5,5% de CO<sub>2</sub> no nível inferior. No ciclo diário, a concentração média mostrou valores máximos entre 6 e 7 horas da manhã (477 ppm a 9m, e 473 ppm a 1m); os mínimos ocorreram às 12 horas, com cerca de 365 ppm (1m), 362 ppm (9m; 17,4m; 25,25m; e 46,5m) e 361 ppm (34,25m). A média diária da concentração de CO<sub>2</sub> caracterizou um período, entre os dias 23 e 25, em que o ambiente esteve mais homogêneo, com variação de apenas 13 ppm (dia 23), 12 ppm (dia 25) e somente 6 ppm (dia 24) entre todos os níveis.

### INTRODUÇÃO

Com o advento da indústria, a participação do CO<sub>2</sub> na atmosfera global aumentou, sendo que a concentração média cresceu de 280 ppm para aproximadamente 360 ppm (KEELING & WHORF, 1994). Cerca de 50% do total das emissões antropogênicas ainda permanecem na atmosfera (TANS et al., 1990; CONWAY et al., 1994). As fontes de CO<sub>2</sub> são bem conhecidas, entretanto os sumidouros ainda estão sendo pesquisados. Recentes estudos mostram que as florestas atuam como grandes sumidouros (WOSFY et al., 1988; GRACE et al., 1995; GRECO & BALDOCCHI, 1996; FERREIRA DA COSTA et al., 1998b e MALHI et al., 1998).

---

<sup>1</sup> Mestrando em Agrometeorologia. DCE/ESALQ/USP, Caixa Postal 09, CEP 13.418-970, Piracicaba, SP.  
E-mail: rfcosta@carpa.ciagri.usp.br

<sup>2</sup> Dr., Pesquisador Titular. ACA/IAE/CTA, CEP 12228-904, S. J. dos Campos, SP.  
E-mail: gfisch@aca.iae.cta.br

<sup>3</sup> PhD., Professor Associado. DCE/ESALQ/USP, Caixa Postal 09, CEP 13.418-970, Piracicaba, SP.  
E-mail: arpereir@carpa.ciagri.usp.br

<sup>4</sup> PhD., Pesquisador Titular. Institute of Hydrology, Wallingford, OX10 8BB, UK.

<sup>5</sup> PhD., Pesquisador Visitante. University of Edinburgh, Edinburgh, EH9 3JU, UK

<sup>6</sup> PhD., Pesquisador. CPTEC/INPE, CEP 12.630-000, Cachoeira Paulista, SP.

<sup>7</sup> PhD., Pesquisador. INPA, Caixa Postal 478, CEP 69.083-000, Manaus, AM.

Estimativas indicam que as florestas tropicais são responsáveis por metade da absorção de CO<sub>2</sub> realizada pela vegetação (NOBRE & GASH, 1997). A Amazônia, maior área florestal na região equatorial, tem participação fundamental neste mecanismo. Nos estudos em florestas tropicais, WOSFY et al. (1988) alcançaram resultados com a técnica de cromatografia gasosa, durante o experimento ABLE (Amazon Boundary Layer Experiment) na Amazônia, sendo o fluxo mínimo de  $-5,7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  da atmosfera para a vegetação. FERREIRA DA COSTA et al. (1998b), realizando análises na mesma área do presente estudo, qualificaram a floresta amazônica como um sumidouro de carbono (C) da ordem de  $-4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Este trabalho tem o objetivo de analisar as variações e quantificar as concentrações de CO<sub>2</sub> em diferentes níveis dentro de uma área de floresta na Amazônia.

## MATERIAL E MÉTODOS

As medidas de concentrações de CO<sub>2</sub> foram feitas na Bacia Experimental do Rio Tarumã-açu (02° 36'S, 60° 07'W, 52m altitude) próxima à Manaus (AM), durante um período característico da estação seca (21 a 28 de outubro de 1995). O sítio experimental foi o de floresta tropical, com árvores de altura média de 30 m e densidade de biomassa acima do solo de aproximadamente 400-500 t ha<sup>-1</sup> (CULF et al., 1998). Em uma torre metálica (Figura 1) mediu-se a concentração de CO<sub>2</sub>, no topo (46,5m) com a técnica de *eddy covariance*, utilizando-se um analisador infravermelho de gás LI-6262 (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA) em uma frequência efetiva de 5 Hz. Para os perfis verticais de CO<sub>2</sub> utilizou-se um analisador infravermelho de gás CIRAS-1 (PP Systems, Hitchim, U.K.), foram montados seis diferentes níveis de coleta de amostras de ar: 1m; 9m; 17,4m; 25,25m; 34,25m e 46,5m. O nível mais alto, serviu para avaliar a consistência entre os dois instrumentos. Para cada altura, uma amostra foi realizada durante cinco minutos, tempo suficiente para retirar do tubo resíduos de ar dos níveis anteriores. Um ciclo completo de amostra foi realizado à cada meia hora (MALHI et al., 1998). Informações meteorológicas foram coletadas com uma estação automática instalada no topo da torre, visando caracterizar as condições atmosféricas no período de coletas.



**Figura 1** – Vista da torre de 45 m de altura pertencente ao Instituto de Pesquisas da Amazônia INPA (02° 36'S, 60° 07'W, 52m), instalada na área experimental da Bacia do Rio Tarumã-açu, próxima à Manaus (AM). Foram montados seis diferentes níveis de coleta de amostras de ar: 1m; 9m; 17,4m; 25,25m; 34,25m e 46,5m.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os habitantes da região amazônica distinguem as estações do ano pelas épocas chuvosa e seca (FERREIRA DA COSTA et al., 1998a). A chuva é elemento fundamental na classificação climática de uma região. O período selecionado para esta análise, de 21 a 28 de outubro de 1995, possuiu característica de época seca, quando registrou-se um total de apenas 12,6 mm de chuva, dos quais 81% ocorreram entre as 13 e as 14 horas local (hl). Dos oito dias estudados, apenas quatro registraram ocorrência de chuva, sendo que os dias 24 (6,4 mm) e 27 (4,6 mm) acumularam mais de 87% do total precipitado no período. A velocidade média diária do vento registrou o menor valor ( $1,1 \text{ m s}^{-1}$ ) no dia 23, quando houve a maior concentração média diária de  $\text{CO}_2$  (409,6 ppm) pela redução do transporte turbulento nessas condições. Nos dias com ocorrência de chuvas mais acentuadas (24 e 27), o ambiente intradossel tornou-se mais homogêneo, com concentrações oscilando próximas da média geral do período (Tabela 1). A precipitação e a velocidade do vento foram medidas no topo da torre, logo acima do dossel.

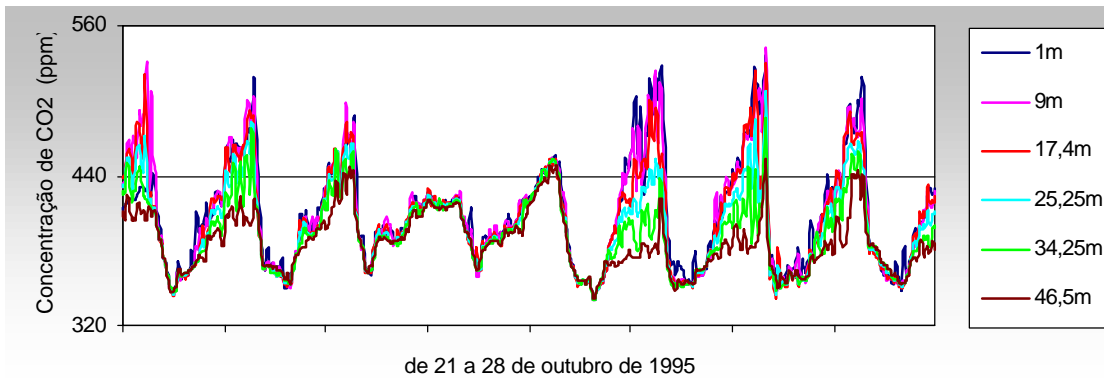
**Tabela 1** – Valores de (PRP) Precipitação total diária (mm), (Vv) Velocidade média diária do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), [ $\text{CO}_2$ ] Concentração média diária de  $\text{CO}_2$  (ppm), (S) Radiação solar incidente, integrada para o dia ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), (Tar) Temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), durante o período de 21 a 28 de outubro de 1995, na área experimental da Bacia do Rio Tarumã-açu, próxima à Manaus (AM).

Dia	21	22	23	24	25	26	27	28	média
PRP	0	0	1,4	6,4	0,2	0	4,6	0	1,6
Vv	1,7	1,4	1,1	1,4	1,2	1,7	1,5	1,3	1,4
[ $\text{CO}_2$ ]	399,1	402,3	409,6	401,8	395,6	396,7	400,0	400,1	400,6
(S)	19,2	15,3	7,3	8,1	17,8	21,7	12,2	18,9	15,1
(Tar)	25,4	26,0	23,7	22,2	24,6	27,7	25,5	26,2	25,2

A variação da concentração de  $\text{CO}_2$ , analisada em médias de 10 em 10 minutos (figura 2), oscilou entre os mínimos de 340 ppm (a 25,25m e 34,25m) e 341 ppm nos demais níveis (1m; 9m; 17,4m; e 46,5m), até os máximos de 543 ppm (a 9m), 536 ppm (a 1m), 530 ppm (a 17,4m), 508 ppm (a 25,25m), 486 ppm (a 34,25m), e 453 ppm (a 46,5m). As medições realizadas por GRACE et al. (1995) indicaram concentrações de  $\text{CO}_2$  variando entre 350 e 500 ppm, sendo que estes dados foram coletados entre os meses de maio e junho de 1993 (transitório entre o período chuvoso e o seco), no Estado de Rondônia, sudoeste da Amazônia.

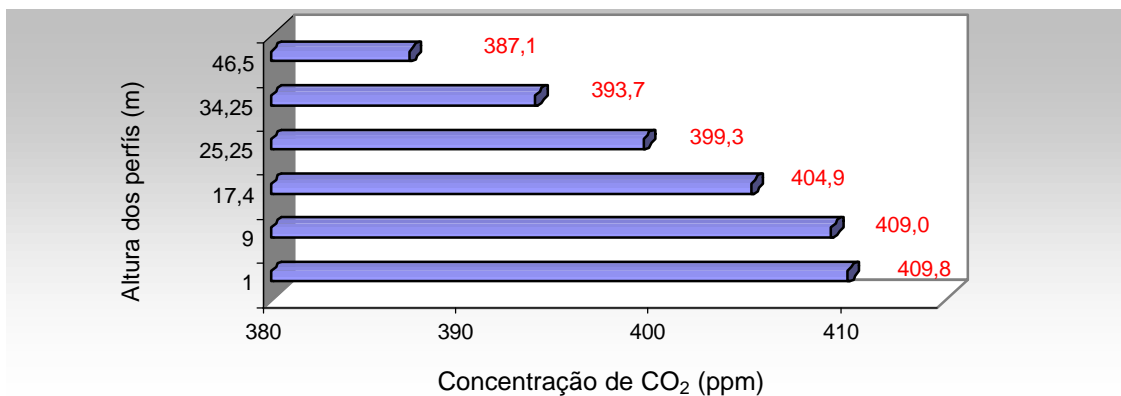
A amplitude da concentração de  $\text{CO}_2$  (diferença entre a máxima e a mínima) foi de 57% a 1m (195 ppm), 60% no nível de 9m (202 ppm), 56% (189 ppm) a 17,4m, 49% (167 ppm) a 25,25m, 43% (146 ppm) a 34,25m, diminuindo para 33% a 46,5 m (112 ppm). Esta menor amplitude a 1m com relação ao nível adjacente (9m), indica uma participação mais intensa do solo, ou da vegetação rasteira, no processo de absorção do  $\text{CO}_2$  presente no ar. Durante um período compreendido das 6 horas do dia 23 até as 18 horas do dia 25, a atmosfera intradossel tornou-se bastante misturada. A concentração de  $\text{CO}_2$  variou pouco, registrando aproximadamente 400 ppm, em todos os níveis de

medida, inclusive no topo da torre (acima do dossel). Este equilíbrio entre os valores medidos deveu-se a um maior turbilhonamento atmosférico, proporcionado por um pequeno aumento na velocidade do vento, assim como os eventos de chuva ocorridos nos dias 23, 24 e 25. Com uma presença maior de água no ambiente, as atividades fisiológicas da vegetação sofrem um incremento, permitindo que as plantas possam acelerar o processo de absorção do CO<sub>2</sub> existente na atmosfera adjacente, reduzindo desta forma sua concentração.



**Figura 2** – Perfis da concentração de CO<sub>2</sub> em seis diferentes alturas: 1m; 9m; 17,4m; 25,25m; 34,25m e 46,5m. Os valores são amostras médias armazenadas a cada dez minutos, no período de 21 a 28 de outubro de 1995, na área experimental da Bacia do Rio Tarumã-açu, próxima à Manaus (AM). O mínimo foi de 340-341 ppm (todos os níveis) e o máximo 543 ppm a 9m.

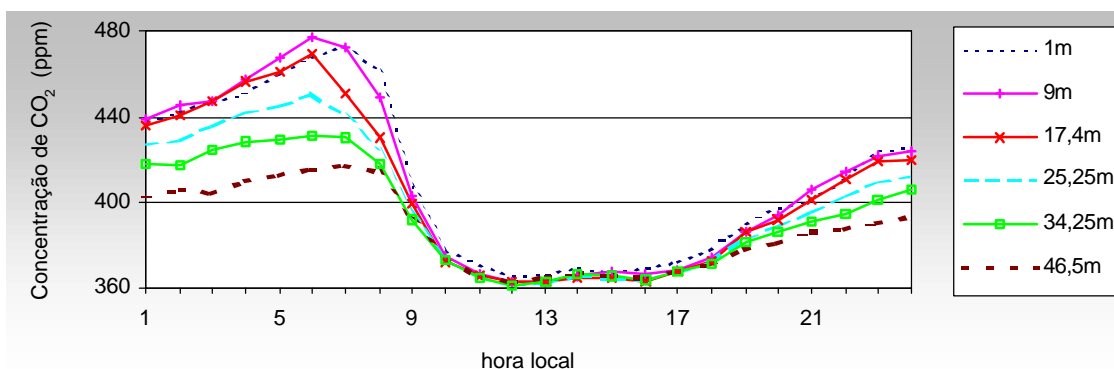
A concentração média de CO<sub>2</sub>, no período, esteve maior nos níveis mais baixos (figura 3), sendo de 409,8 ppm a 1m, e 409,0 ppm a 9m, diminuindo inversamente com a altura do perfil, atingindo 404,9 ppm a 17,4m, 399,3 ppm a 25,25m, 393,7 ppm a 34,25m, até 387,1 ppm no nível mais alto de 46,5m (logo acima do dossel). Dentro da vegetação, a concentração de CO<sub>2</sub> foi aproximadamente 5,5% maior nos níveis inferiores em relação ao topo da floresta.



**Figura 3** – Concentração média de CO<sub>2</sub> em seis diferentes alturas: 1m; 9m; 17,4m; 25,25m; 34,25m e 46,5m. Os valores são médias do período de 21 a 28 de outubro de 1995, na área experimental da Bacia do Rio Tarumã-açu, próxima à Manaus (AM). O nível mais baixo (1m) concentra cerca de +5,5% CO<sub>2</sub> que o nível estabelecido logo acima do dossel (46,5m).

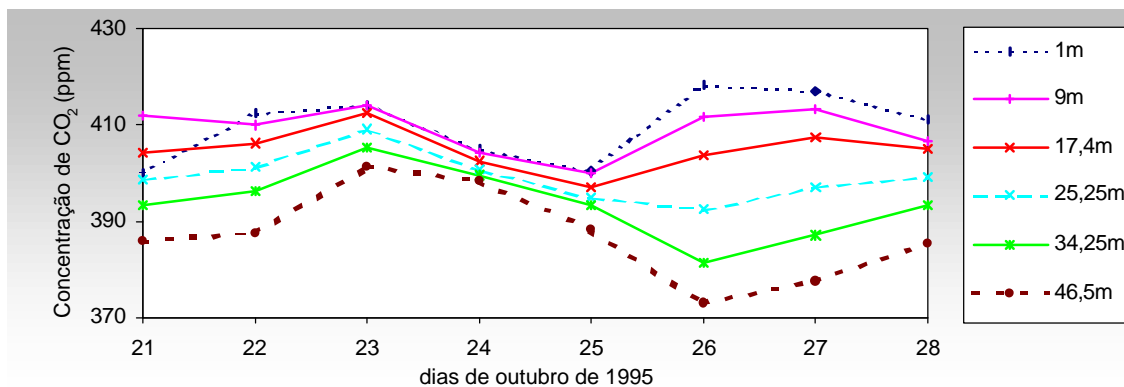
A variabilidade diária da concentração de CO<sub>2</sub> (figura 4), em média horária mostra que houve uma flutuação máxima em torno das 6 horas da manhã (477 ppm a 9m), enquanto que a mínima foi às 12 horas (361 ppm a 34,25m). Nos níveis de 1m e 17,4m a amplitude da concentração média foi de 30%, enquanto que a 9m foi de 32%. A 25,25m (25%), a 34,25m (19%), enquanto a 46,5m foi de apenas 15%. A floresta funciona como um sumidouro de CO<sub>2</sub> no período das 8 às 18h e como fonte nas demais horas do dia. Com o aquecimento pela radiação solar, o CO<sub>2</sub> liberado pelo sistema solo-vegetação, provoca um aumento no fluxo para a atmosfera, o fluxo se inverte com o aumento da fotossíntese, passando a floresta a absorver o CO<sub>2</sub> existente na atmosfera. GRACE et al. (1995) detectaram fluxos de CO<sub>2</sub>, da vegetação para a atmosfera de +8,2 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> no início da manhã. O balanço médio diário indica a retirada de CO<sub>2</sub> da atmosfera pela floresta. FERREIRA DA COSTA et al. (1998b), sugerem que a floresta retira cerca de 7% a mais CO<sub>2</sub> da atmosfera durante os períodos de chuva que nos secos, pois com maior disponibilidade de água haverá evapotranspiração mais acentuada, proporcionada pela intensificação na abertura dos estômatos, otimizando o processo absorptivo de CO<sub>2</sub>.

A floresta possui enorme potencial de absorver o carbono presente na atmosfera, durante qualquer época do ano. No mesmo estudo, FERREIRA DA COSTA et al. (1998b) quantificaram que a floresta absorveria até -4 ton C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Um modelo aplicado por GRACE et al. (1996), utilizando dados da Amazônia de 1993, sugere que há um balanço líquido de carbono em favor da floresta. A vegetação retiraria da atmosfera até -1 ton C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Informações como estas, indicam que é necessário se pensar minuciosamente sobre a questão da utilização das áreas de floresta, pois manejos inadequados podem resultar em situações irreversíveis. Para as latitudes médias, nas florestas temperadas do Hemisfério Norte, GRECO & BALDOCCHI (1996) analisaram as variações sazonais existentes nos fluxos de CO<sub>2</sub> para uma floresta em crescimento próximo a Oak Ridge (Tennessee, EUA), e calcularam um balanço líquido de carbono da ordem de -5 ton C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> sendo retirados da atmosfera pela vegetação.



**Figura 4** – Variabilidade média diária da concentração de CO<sub>2</sub> no período de 21 a 28 de outubro de 1995 na área experimental da Bacia do Rio Tarumã-açu, próxima à Manaus (AM). Ao amanhecer, as concentrações médias são 32% maiores que ao meio-dia em 9m, 30% em 1m e 17,4m; 25% na altura de 25,25m; 19% em 34,25m e 15% no topo da floresta.

Os valores diários da concentração de CO<sub>2</sub>, obtidos do cálculo das médias diárias para cada nível distintamente, revelaram que as maiores concentrações estavam nos níveis inferiores (figura 5). No dia 21, baixos valores de concentração de CO<sub>2</sub> registrados entre 12 e 14 horas, quando a absorção pela floresta é mais intensa, reduziram a média no nível de 1m, atingindo a marca de 400 ppm, valor próximo da média do nível de 25,25m que alcançou 398,8 ppm. As médias sofreram alterações durante os dias 23, 24 e 25, quando ocorreu uma maior mistura no ar dentro do dossel, causando uma aproximação dos valores médios em todos os níveis, neste período houve precipitação, com maior intensidade no dia 24, quanto foram registrados 6,4mm de chuva. A velocidade do vento atingiu valores um pouco mais elevados do que no restante do período, proporcionando um ambiente mais homogêneo. Uma pequena variação foi registrada nas médias da concentração de CO<sub>2</sub> entre os níveis. No dia 23 foram 13 ppm, enquanto que no dia 25 alcançou 12 ppm e para o dia 24 somente 6 ppm, mostrando que as camadas estavam bastante equivalentes quanto ao teor de CO<sub>2</sub>.



**Figura 5** – Média diária da concentração de CO<sub>2</sub> no período de 21 a 28 de outubro de 1995 na área experimental da Bacia do Rio Tarumã-açu, próxima à Manaus (AM).

## CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra que a floresta concentra maiores quantidades de CO<sub>2</sub> nos níveis mais baixos do dossel, próximos à superfície do solo. Cerca de 410 ppm a 1 metro de altura, reduzindo o conteúdo para aproximadamente 400 ppm a 25 m, até atingir cerca de 387 ppm a 46,5 m (logo acima da vegetação). O nível mais baixo (1m) concentrou cerca de 5,5% a mais CO<sub>2</sub> que o mais alto (46,5m). Durante a ocorrência de chuvas, o ambiente tornou-se mais homogêneo, proporcionando redução na concentração de CO<sub>2</sub>. A concentração atinge os valores máximos entre 6 e 7 horas da manhã, e os mínimos entre 12 e 13 horas, sendo a diferença média de 30-32% nos níveis mais baixos e menores que 20% nas camadas superiores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil (PPD-G7), pelo Projeto “Balanço de Energia e Vapor d’água e CO<sub>2</sub> em áreas de floresta tropical na Amazônia (95/0966).

## BIBLIOGRAFIA

- CONWAY, T. J., TANS, P. P., WATERMAN, L. S., THONING, K. W., KITZIS, D. R., MASARIE, K. and ZHANG, N. 1994. Evidence for interannual variability of the carbon cycle from NOAA/CMDL global sampling network. *Journal of Geophysical Research*, 99, 22831 - 22855.
- CULF, A. D., FISCH, G., MALHI, Y., FERREIRA DA COSTA, R., NOBRE, A. D., MARQUES FILHO, A. O., GASH, J., GRACE, J. 1998 Carbon dioxide measurements in the nocturnal boundary layer over Amazonian forest. *Earth and Hydrology Process (Issue special)*.
- FERREIRA DA COSTA, R., FEITOSA, J. R. P., FISCH, G., SOUZA, S. S., e NOBRE, C. A. 1998a. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e pastagem na Amazônia. *Acta Amazônica*, 28 (4), 395 – 408.
- FERREIRA DA COSTA, R., FISCH, G., PEREIRA, A. R., CULF, A. D., MALHI, Y., NOBRE, C. A., SOUZA, S. S., FARIAS, S.E.M. e NOBRE, A. D. 1998b. Variações sazonais de fluxo e concentração de dióxido de carbono sobre uma área de floresta na região central da Amazônia. *Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, (CD-ROM), SBMET. Brasília, DF.*
- GRACE, J., LLOYD, J., McINTIRE, J., MIRANDA, A., MEIR, P., MIRANDA, H., MONCRIEFF, J., MASSHEDER, J. WRIGHT, I. and GASH, J. H. C. 1995. Fluxes of carbon dioxide and water vapor over na undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. *Global Change Biology*, 1 (1), 1-12.
- GRACE, J., MALHI, Y., LLOYD, J., McINTIRE, J., MIRANDA, A., MEIR, P., and MIRANDA, H. 1996. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. *Global Change Biology*, 2, 209 - 217.
- GRECO, S. and BALDOCCHI, D. D. 1996. Seasonal variations of CO<sub>2</sub> and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 2, 183 – 197.
- KEELING, C.D., and WHORF, T.P. 1994. Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network. In “Trends ‘93: a compendium of data on global change”. 16– 26.
- MALHI, Y., NOBRE, A., GRACE, J., KRUIJT, B., PEREIRA, M. and CULF, A. D. 1998. Carbon dioxide transfer over a central amazonian rain forest *Journal of Geophysical Research*, 103 (D24), 31593.
- NOBRE C.A. & GASH J.H.C. 1997. Desmatamento e clima: o maior estudo já feito na Amazônia. *Ciência Hoje*, 22 (128), 32-41.
- TANS, P. P., FUNG, Y. I., TAKAHASI, T. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science*, 247, 1431 – 1438.
- WOFSY, S. C., HARRISS, R.C. AND KAPLAN, W. A. 1988. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, 93 (D2), 1377-1387.