

Emissões de Material Particulado de Queimadas na Floresta Amazônica e no Cerrado

Paulo Artaxo

Instituto de Física, Universidade de São Paulo,
Caixa Postal 20516, CEP 01498, São Paulo, SP. FAX (011) 814 05 03.

Alberto Setzer,

Departamento de Meteorologia, INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais,
Caixa Postal 515, CEP 12201, São José dos Campos, SP. FAX (0123) 21 87 43.

Resumo

As queimadas realizadas regularmente na Amazônia e no cerrado brasileiro tem efeitos sobre a composição da atmosfera e sobre os ciclos naturais de diversos elementos que são ainda muito pouco compreendidos. Em termos de matéria particulada, grandes emissões de elementos traços e nutrientes essenciais ocorrem para a atmosfera. Para sabermos o impacto de queimadas na atmosfera global do planeta, é necessário identificar e quantificar os processos físicos e químicos que governam a geração, transformação e deposição de partículas de aerossóis em queimadas em regiões tropicais. As emissões de gases e partículas para a atmosfera em regiões tropicais tem um papel fundamental na química atmosférica global do planeta, e são cruciais para o estudos das mudanças atmosféricas globais, além de afetarem a atmosfera a nível regional.

Em Setembro de 1991 o INPE e o GEPA (Grupo de Estudos de Poluição do Ar) do IFUSP realizaram um experimento de coleta de partículas de aerossóis utilizando a aeronave Bandeirante do INPE. Foram coletadas partículas emitidas em queimadas nas regiões de Brasília, Alta Floresta, Belém, Santarem, Manaus, Rondonia, e Mato Grosso do Sul. As concentrações elementares foram medidas com o sistema PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) instalado no Instituto de Física da USP.

Concentrações extremamente elevadas de material particulado foram observadas mesmo longe de plumas de queimadas, refletindo a poluição do ar regional na Amazônia em épocas de queimadas. Altas concentrações de diversos elementos tais como K, S, Si, Fe, P, Ca e Zn foram observados. As partículas finas ($dp < 2 \mu\text{m}$) são predominantes em relação às partículas maiores que $2 \mu\text{m}$. Carbono grafitico responde por cerca de 20 % da massa das partículas. Através de sensoriamento remoto foi feito um levantamento das áreas queimadas na época do experimento e em todo o ano de 1991. Através do cruzamento das concentrações medidas com os dados de sensoriamento remoto, obteve-se valores para as emissões quantitativas de partículas de aerossóis para a estação de queimadas em 1991. Emissões de grande porte de elementos como potássio, fósforo, enxofre e zinco tem o potencial de alterar os ciclos geoquímicos naturais destes elementos, alterando também os fluxos de nutrientes essenciais para a manutenção do ecossistema. As emissões gasosas de nitrogênio são também significativas, com uma pequena contribuição na fase de particulado. Uma fração significativa das partículas emitidas em queimadas podem atuar como núcleo de condensação de núvens.

Introdução

As queimadas são uma grande fonte de material particulado e gases para a atmosfera [Crutzen et al., 1985, Crutzen e Andreae, 1990]. Mais do que 70% das emissões de todas as fontes de queimadas se localizam nos trópicos, em regiões da África, Ásia e América Latina. O Brasil contribui significativamente para as emissões globais derivadas de queima de florestas tropicais [Setzer e Pereira, 1991]. Estimativas da biomassa total consumida em uma base global variam de 2 a 10 Pg (1 Petagrama = 10^{15} g) por ano [Crutzen e Andreae, 1990]. Em termos de matéria particulada, as emissões são ao redor de 104 Tg (1 Teragrama = 10^{12} g) por ano [Levine, 1990]. Para matéria particulada na moda fina, as emissões são estimadas como sendo ao redor de 49 Tg por ano, que correspondem a cerca de 7 % da emissão global do planeta. Para carbono elementar, a emissão de 19 Tg por ano corresponde a uma fração de 86% do carbono elementar emitido mundialmente [Levine, 1990]. Setzer e Pereira [1991] estimaram que as emissões de material particulado de 350.000 incêndios individuais na Amazônia em 1987 equivaleram a uma grande erupção vulcânica. Em 1991 eles observaram 418.620 incêndios individuais na Bacia Amazônica e no Cerrado brasileiro, utilizando técnicas de sensoriamento remoto do instrumento "Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)".

As partículas de aerossóis emitidas em queimadas de florestas tropicais podem ser ativas como núcleo de condensação de núvens, e exercem forte influência na concentração

e tamanho das gotículas constituintes de núvens [Rogers et al., 1992]. Existe a possibilidade de que um aumento do número de NCN (Núcleo de Condensação de Núvens) cause alterações na climatologia regional da Amazônia e de outras regiões. Warner e Twomey [1967] observaram concentrações elevadas de nas plumas de incêndios de canaviais na Austrália. Desalmand et al [1985] observaram significativas quantidades de NCN em queimadas na Costa do Marfim, na África. Na América do Norte, Radke et al. [1988] observaram altos níveis de NCN em incêndios na Califórnia e no Oregon. Um componente majoritário de aerossóis de queimadas é carbono elementar, que tem fortes propriedades radiativas na atmosfera. As medidas de Andreae et al., [1988], mostraram enriquecimento no aerossol emitido em queimadas de componentes solúveis em água, como SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , K^+ . Carbono elementar associado com potássio foi identificado como traçador de plumas de queimadas em regiões oceânicas remotas [Andreae, 1983]. Durante o processo da queima de madeira, diversos mecanismos de combustão ocorrem, o que leva a grandes diferenças nos fatores de emissão de material particulado para a atmosfera. Ward e Hardy [1991] dão uma descrição detalhada dos diferentes processos de geração de partículas de aerossóis nas diferentes fases da queimada. Fatores de emissão de material particulado variam de 5 a 40 g de aerossóis para cada quilograma de material queimado, com eficiências de combustão de 98% a 60%.

Medidas de emissões de material particulado em queimadas no Brasil

Diversos experimentos internacionais foram realizados na bacia Amazônica para a medida das emissões gasosas e de material particulado para a atmosfera. O Projeto "Brushfire" em 1979 e 1980 foi executado pelo "National Center for Atmospheric Research (NCAR)" dos Estados Unidos, pelo "Max-Planck Institute" da Alemanha, e pelo INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) e diversas universidades brasileiras como a USP e a UNB. Foram realizadas medidas em aviões e coletadas amostras no solo em diversas regiões da Bacia Amazônica.

Dentro do "Global Tropospheric Experiment", a NASA ("National Atmospheric and Space Administration") realizou dois grandes experimentos na Amazônia. O primeiro em Julho e Agosto de 1985, chamado ABLE-2A ("Amazon Boundary Layer Experiment") foi realizado na estação seca, e o segundo o ABLE-2B foi realizado em Abril/Maio de 1987, na estação chuvosa. Ambos os experimentos foram realizados com o suporte de um avião Electra da NASA e com diversos locais de amostragem no solo.

Em Setembro de 1989 diversos grupos de pesquisas brasileiros e americanos realizaram o experimento BASE-A ("Biomass Burning Airborne and Spaceborne Experiment in the Amazonas") [Kaufman et al., 1991]. Eles utilizaram-se do avião Bandeirante EMB-101 do INPE, e também coletaram amostras de emissões de queimadas realizadas na reserva ecológica do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), perto de Brasília. Foram medidas as concentrações de matéria particulada, CO₂, CO, Ozônio, e Metano, juntamente com observações de sensoriamento remoto e medidas de absorção ótica da atmosfera. O experimento BASE-B realizou medidas na reserva do IBGE e em Rondonia em agosto e setembro de 1990 [Ward et al 1992a, 1992b]. Foi observado que a razão de massa entre a emissão de particulado e de CO₂ foi 0.12% para o cerrado e 0.53% para a queima de floresta.

O Grupo de Estudos de Poluição do Ar (GEPA) do Instituto de Física participou ativamente dos experimentos do projeto "Brushfire" em 1979/1980, (Artaxo e Orsini 1987) e dos dois experimentos ABLE-2A e ABLE-2B, realizados pela NASA (Artaxo et al., 1988, 1990, 1990b, Artaxo e Maenhaut, 1990). O GEPA também participou de dois experimentos de medidas de emissões de queimadas na África, o DECAFE ("Dynamique et Chimique de l'atmosphere en Foret Equatorial). Houveram duas campanhas de amostragens no Congo e na Costa do Marfim, em 1988 (DECAFE/88) e em 1991 (DECAFE 91/FOS). Alguns resultados destes experimentos serão discutidos neste artigo.

Métodos Experimentais

Partículas de aerossóis foram coletadas utilizando-se diversos tipos de amostradores. O Amostrador de Particulado Fino e Grosso (AFG) separa as partículas em duas faixas de tamanho: as finas ($d_p < 2\mu\text{m}$) e as grossas ($2\mu\text{m} < d_p < 15\mu\text{m}$), coletadas em filtros Nuclepore [John et al., 1983]. O fluxo no AFG é tipicamente 14 lpm. Em coleta de partículas em aviões utilizamos um filtro total de partículas, e também impactadores em cascata que separam a matéria particulada em 6 faixas de tamanho. É importante a separação das partículas de aerossóis nas frações fina e grossa, pois as partículas finas tem um tempo de residência muito maior na atmosfera do que as partículas grossas. A velocidade de sedimentação pequena das partículas finas permite que elas sejam transportadas por grandes distâncias, até alguns milhares de quilômetros, em alguns casos.

As concentrações elementares foram medidas pelo método PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) [Artaxo e Orsini, 1987]. As amostras de partículas de aerossóis são irradiadas com um feixe de prótons de alta energia (2.4 MeV), obtidos através de um acelerador nuclear. Atualmente o GEPA utiliza-se de um novo acelerador nuclear Pelletron instalado no LAMFI (Laboratório de Análise de Materiais por Feixes Iônicos), do Instituto de

Física da Universidade de São Paulo. A precisão do sistema PIXE é de cerca de 5% para os elementos majoritários e de 10% para os elementos cujas concentrações estão próximas do limite de detecção. Podemos medir concentrações elementares a níveis de ng/m^3 , e rotineiramente detectamos cerca de 22 elementos para partículas de aerossóis da Amazônia: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Zr, Rb, Sr, e Pb. A concentração de massa de aerossóis é medida gravimetricamente. A concentração de carbono elementar é determinada por técnicas de reflectância.

Caracterização de partículas de aerossóis emitidas em queimadas no experimento "Brushfire"

Partículas de aerossóis emitidos em queimadas no Mato Grosso e em Rondonia foram coletadas em impactadores em cascata e analisadas pelo método PIXE. A **Figura 1** apresenta a distribuição de tamanho para alguns elementos. Enxofre, potássio, cloro e fósforo são emitidos principalmente na fração fina do aerossol, mas claramente existe uma fração grossa que também é emitida, especialmente para potássio. Alguns elementos como cálcio, ferro, silício e titânio são emitidos principalmente na fração grossa. Dois processos de geração de partículas de aerossóis podem ser discriminados em queimadas. A fração fina é produzida principalmente pela conversão de gases emitidos em partículas. A fração grossa pode ser produzida pela forte convecção atmosférica que ajudam a dispersar partículas de cinzas e de material semi-queimado. A distribuição elementar das partículas emitidas em queimadas é bastante diferente da distribuição natural observada em regiões remotas na Amazônia [Artaxo e Maenhaut, 1990]. Esta diferença pode significar alterações na climatologia local devido à influencia das queimadas nos processos de formações de núvens na Amazônia. A **figura 2** mostra a variabilidade na composição elementar para diferentes amostras coletadas em queimadas. Alguns elementos apresentam grande variabilidade, como potássio, que varia em concentração de 0.03% a 1% da massa total de partículas emitidas. Enxofre tem um perfil elementar razoavelmente constante de 0.1% na massa do particulado emitido. A **figura 3** mostra uma comparação da composição média de partículas de aerossóis emitidas em queimadas, comparada com a composição natural de aerossóis na Amazônia, durante as estações chuvosa e seca [Artaxo et al., 1988, 1990]. É possível observar a maior componente orgânica no aerossol de queimadas, devido à menor presença de elementos em relação à massa total de aerossóis. Se realizamos uma normalização para o potássio, observamos que P, S, Cl, e Ca aparecem com concentrações reduzidas nas queimadas, em comparação com a componente biogênica natural. As razões entre K e Ca, e K e S, são nitidamente diferentes para partículas de queimadas comparadas às partículas naturais da atmosfera amazônica [Artaxo e Maenhaut, 1990].

Resultados dos experimentos de queimadas na Amazônia em 1991

Foi utilizado um avião Bandeirante do INPE na coleta de partículas de aerossóis em voos cobrindo grande parte do cerrado e da floresta Amazônica. O tempo de coleta de cada amostra foi de cerca de 3 a 4 horas, o que faz com que as medidas representem médias sobre grandes regiões, e não medidas em plumas de queimadas individuais. A **figura 4** apresenta o número de focos de queimadas detectados pelo instrumento AVHRR a bordo do satélite NOAA-11, utilizando o canal de $3.75\mu\text{m}$, com resolução de 1Km. Durante a semana de coleta de amostras, 88.414 focos de incêndios foram detectados na Bacia Amazônica, e em setembro de 1991, 237.599 focos individuais foram detectados. Uma forte seca antes do período de amostragem fez com que houvessem 105 dias sem precipitação em diversas áreas da Bacia Amazônica.

A **tabela 1** apresenta a concentração de massa de partículas, elementar, e de carbono gráfitico para cada uma das amostras de filtro total coletadas no experimento. A região onde cada amostra foi coletada também está indicada. A maioria dos elementos apresenta concentrações muito altas, com alta variabilidade, indicando a influencia regional de plumas de queimadas. A **figura 5** apresenta a concentração de massa de partículas de aerossol para cada amostra coletada. A concentração variou de $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ para áreas não muito afetadas por queimadas, como Manaus, a concentrações maiores que $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ para regiões como Marabá e Porto Velho. É importante salientar que estas são concentrações médias de grandes áreas, sem impacto de plumas de queimadas individuais. A visibilidade para toda a área da Bacia Amazônica era muito reduzida, em alguns lugares com visibilidade menor que 500 m. A **figura 6** apresenta as concentrações de enxofre. Para regiões com alta incidência de queimadas, as concentrações de enxofre são extremamente altas, com valores de cerca de $3000\text{ ng}/\text{m}^3$. Para regiões menos afetadas, as concentrações de enxofre foram de cerca de $500\text{ ng}/\text{m}^3$. Estes valores são altos, se comparados com concentrações típicas de enxofre naturalmente na atmosfera da Amazônia, que são de cerca de 200 a $300\text{ ng}/\text{m}^3$. Em áreas urbanas do Brasil, como São Paulo e Rio de Janeiro as concentrações de enxofre são de cerca de $2000\text{ ng}/\text{m}^3$, menores do que os valores medidos em grandes regiões da Amazônia durante a época de queimadas. A **figura 7** apresenta uma comparação da composição elementar do particulado da moda fina medida nos experimentos na África (DECAFE 91/FOS) e na Bacia Amazônica. O perfil elementar médio das emissões de queimadas para a África e para o Brasil são em geral similares, com algumas diferenças. Cloro, bromo e zinco aparecem em menor quantidade na Bacia Amazônica. fósforo possui fatores de emissão muito diferentes na África e no Brasil, sem que seja claro para nós a razão desta diferença. As amostras da Bacia

Amazônica apresentam maiores concentrações para cálcio e estrôncio. Enxofre é responsável por 0.2 a 1.0% da massa do particulado fino. Os elementos emitidos são K, Cl, Si, Al, Ca, S, Fe, e Br. Também aparecem traços de Cu, Zn, Sr, Rb, Mn e Ti. Existem algumas similaridades entre as emissões de particulado entre queimadas na África e no Brasil, mas é necessário a realização de mais experimentos de campo para uma comparação significativa.

A **figura 8** apresenta a composição das frações fina e grossa para uma amostra coletada em Marabá, no Pará, com altas concentrações de emissões de queimadas. A concentração de enxofre para as frações fina e grossa foi de cerca de 2000 ng/m³, e a maioria das concentrações elementares são maiores na fração grossa, para partículas maiores que 2µm com exceção de Cl, Br, Rb, e Sr que são emitidos principalmente na fração fina do aerossol.

Resultados de monitoramento contínuo de aerossóis em Cuiabá

Desde Agosto de 1990, o Grupo de Estudos de Poluição do Ar da Universidade de São Paulo está operando uma estação de monitoramento contínuo de aerossóis em Cuiabá, em cooperação com o INPE. O Dr. V. Kirchoff do INPE também monitora no local a concentração de monóxido de carbono e de ozônio. Durante a época de queimadas, o local é fortemente influenciado por emissões de queimadas tanto locais como transportado a longa distância de Rondonia. A figura 9 apresenta a concentração de particulado fino, grosso e inalável. O particulado inalável representa a soma do fino com o particulado grosso. É muito claro o grande aumento de matéria particulada em suspensão na atmosfera durante o período de queimadas. De uma baixa concentração de cerca de 20 µg/m³ fora da época de queimadas, a concentração de massa de particulado inalável sobe para cerca de 140µg/m³ durante a estação de queimadas, mesmo longe das regiões mais afetadas. A legislação brasileira de meio ambiente estabelece que o limite ambiental das concentrações de particulado inalável não pode ser superior a 55µg/m³, e observamos valores maiores que duas vezes o padrão de qualidade do ar estabelecido na legislação brasileira. A **figura 10** apresenta as concentrações de carbono grafítico para a fração fina de aerossóis coletados em Cuiabá. De um valor de cerca de 1µg/m³, a concentração de carbono grafítico sobe para 7µg/m³ durante a estação de queimadas, o que representa um alto acréscimo de um fator 7 nas concentrações de carbono grafítico na atmosfera. Este tipo de partícula tem fortes propriedades radiativas, absolvendo a radiação solar e provocando um aquecimento da baixa atmosfera.

Conclusões

As concentrações de partículas em suspensão na atmosfera da bacia Amazônica atingem valores extremamente altos durante a época de queimadas. Grande quantidade de material particulado é injetado na atmosfera, aonde ocorre o transporte a longa distância. Diversos nutrientes essenciais são transportados para a atmosfera como resultado da prática de queimadas. A concentração de material particulado em grandes regiões atingem valores extremamente altos de até $350\mu\text{g}/\text{m}^3$. A composição destas partículas apresenta como elementos dominantes o K, Si, Ca, P, Cl, S, Fe, Br, Zn, Al e outros elementos. Também grandes quantidades de material carbonáceo e carbono grafitico são emitidos para a atmosfera, com o potencial de alterar o balanço radiativo da atmosfera. Existem algumas similaridades entre as emissões de particulado entre queimadas na África e no Brasil, mas é necessário a realização de mais experimentos de campo para uma comparação significativa. Enxofre, potássio, fósforo e cloro são emitidos em grandes quantidades para a atmosfera como resultado do processo de queimada. Estas grandes emissões tem o potencial de alterarem os fluxos de nutrientes essenciais para a manutenção do ecossistema. A maioria das partículas são solúveis em água e podem ser ativas como núcleo de condensação de núvens, tendo o potencial de alterar os mecanismos de formação de núvens na bacia Amazônica.

Agradecimentos

Agradecemos o suporte do pessoal da reserva ecológica do IBGE nas medidas em queimadas no cerrado, e à tripulação do avião Bandeirante do INPE pela dedicação nas medidas aéreas. P. Artaxo agradece o suporte fornecido pelo projeto BID-USP número 27.12. Este trabalho foi realizado com o suporte financeiro da FAPESP, através do projeto temático 90/2950-2.

Referências

- Andreae, M.O. et al., 1988. Biomass burning emissions and associated haze layers over Amazonia, *J. of Geophys. Res.*, 93, D2, 1509-1527.
- Andreae, M.O., 1983. Soot Carbon and Excess Fine Potassium: Long-Range Transport of Combustion Derived Aerosols, *Science*, vol. 220, 1148-1151.
- Artaxo, P., and C. Orsini, 1987. PIXE and receptor models applied to remote aerosol source apportionment in Brazil, *Nucl. Instrum. Methods*, B22, 259-263.
- Artaxo, P., H. Storms, F. Bruynseels, R. Van Grieken, and W. Maenhaut, 1988. Composition and sources of aerosols from the Amazon Basin, *J. Geophys. Res.*, 93, 1605-1615.
- Artaxo, P., W. Maenhaut, 1990. Trace Element concentrations and size distribution of biogenic aerosols from the Amazon Basin during the wet season, *Nuclear Instruments and Methods*, B49, 366-371.

- Artaxo, P., W. Maenhaut, H. Storms, and R. Van Grieken, 1990. Aerosol characteristics and sources for the Amazon Basin during the wet season, *J. Geophys. Res.*, 95, D10, 16971-16985.
- Artaxo, P., R. Van Grieken, F. Watt, and M. Jaksic, 1990b. The microanalysis of individual atmospheric aerosol particles by electron, proton and laser microprobe. Anais do "Second World Congress on Particle Technology", Society of Powder Technology, Kyoto, Japão, 421-426.
- Cachier, H., P. Buat-Menard, M. Fontugne, and J. Rancher, 1985. Source terms and source strengths of the carbonaceous aerosol in the tropics, *J. Atmos. Chem.*, 3, 469-489.
- Crutzen, P. and M. O. Andreae, 1990. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science*, 250, 1669-1678.
- Crutzen, P.J., A.C. Delany, J. Greenberg, P. Haggenson, L. Heidt, R. Lueb, W. Pollock, W. Seiler, A. Wartburg, and P. Zimmerman, 1985. Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season, *J. Atmos. Chem.*, 2, 233-256.
- Desalmand, F., R. Serpolay, and J. Podzimek, 1985. Some specific features of the aerosol particle concentrations during the dry season and during a brushfire event in West Africa, *Atmos. Environ.*, 19, 1535-1543.
- John, W., S. Hering, G. Reischl, and G. Sasaki, 1983. Characteristics of Nuclepore filters with large pore size - II: Filtration properties. *Atmos. Environ.*, 17, 373-382.
- Harriss et al., 1988. The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE-2A): Dry Season 1985, *J. Geophys. Res.*, 93, 1351-1360. See also Harriss et al., The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE-2B): Wet Season 1987, *J. Geophys. Res.*, 1990
- Kaufman, Y.J., A. Setzer, D. Ward, D. Tanre, B.N. Holben, P. Menzel, M.C. Pereira, and R. Rasmussen, 1991. Biomass burning airborne and spaceborne experiment in the Amazonas (BASE-A), Submitted à publicação em *J. Geophys. Res.*
- Levine, J., 1990. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications, *EOS*, vol. 71, 37, 1075-1077.
- Maenhaut, W., A. Selen, P. Van Espen, R. Van Grieken and J.W. Winchester, 1981, PIXE analysis of aerosol samples collected over the Atlantic Ocean from a sailboat, *Nuclear Instruments and Methods*, 181, 399-405.
- Radke, L.F., D.A. Hegg, J.H. Lyons, C.A. Brock, P.V. Hobbs, R. Weis, and R. Rasmussen, 1988. Airborne measurements on smokes from biomass burning, in: *Aerosols and Climate*, P.V. Hobbs and M.P. McCormick, eds., A. Deepak Publishing, Hampton, VA, USA.
- Radke, L.F., D.A. Hegg, P.V. Hobbs, J.D. Nance, J.H. Lyons, K.K. Laursen, P.J. Reagan, and D.E. Ward, 1990. Particulate and trace gas emission from large biomass fires in North America, Chapman Conference on Biomass Burning, Williamsburg, VA, USA.
- Robock, A., 1988. Enhancement of surface cooling due to forest fire smoke, *Science*, 242, 911-913.
- Rogers, C.F., Hudson, J.G., Zielinska, B., Tanner, R.J., Hallett, J., Watson, and J.G., Cloud, 1992. Condensation nuclei from biomass burning, in press in: *Global Biomass Burning*:

atmospheric, climatic, and biospheric implications, J. Levine ed., MIT press, Cambridge, MA, USA.

Setzer, A. and M.C. Pereira, 1991. Amazonia Biomass Burning in 1987 and an Estimate of Their Tropospheric Emissions, *Ambio*, vol. 20, 1, 19-22.

Ward, D., 1990. 18 Factors influencing the emissions of gases and particulate matter from biomass burning, in: *Fire in the tropical and subtropical biota*, Springer-Verlag, Goldammer, J. G. (editor).

Ward, D.E., and C.C. Hardy, 1991. Smoke emissions from wildland fires, *Environmental International*, 17, 117-134.

Ward, D., Setzer, A., Kaufman, Y.J., and R. Rasmussen, 1992. Characteristics of smoke emissions from biomass fires of the Amazon region - BASE-A Experiment. In: *Global Biomass Burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications*, J. Levine ed., Cambridge, MA, MIT press (em impressão)

Ward, D., Susott, R., Kauffman, J., Holben, B., Kaufman, Y., Setzer, A., Rasmussen, R., Cummings, D., and B. Dias, 1992b. Emissions and burning characteristics of biomass fires for cerrado and tropical forest regions of Brazil - BASE-B experiment, submetido à publicação em *J. Geophys. Res.*

Warner, J., and S.A. Twomey, 1967. The concentration of cloud nuclei by sugar cane fires and the effect on cloud drop concentrations, *J. Atmos. Sci.*, 24, 704.

Legenda das Figuras

Figura 1 - Distribuição de tamanho elementar de partículas emitidas durante o processo de queimadas na Amazônia. As partículas finas, menores que $2\mu\text{m}$, podem ser transportadas por grandes distâncias.

Figura 2 - Variabilidade da composição elementar para diferentes amostras coletadas em queimadas.

Figura 3 - Comparação da composição elementar média de amostras coletadas em queimadas com amostras de regiões remotas, não afetadas por queimadas, representando partículas biogênicas emitidas naturalmente pela vegetação.

Figura 4 - Número de focos de queimadas na Amazônia detectados pelo sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo do satélite NOAA-11.

Figura 5 - Concentração de massa de aerossóis na atmosfera Amazônica coletados em voos do avião Bandeirante do INPE. A duração média dos voos foi de 3 horas, com as amostras representando médias sobre regiões extensas da Bacia Amazônica. A altitude média foi de 1000 m.

Figura 6 - Concentração de enxofre na atmosfera Amazônica analisadas em amostras coletadas com o avião Bandeirante do INPE em Setembro de 1991.

Figura 7 - Comparação da composição elementar de aerossóis emitidos em queimadas na África e no Brasil.

Figura 8 - Composição elementar de aerossóis das modas finas e grossas em Marabá, PA durante as medidas de emissões de queimadas utilizando-se o avião Bandeirante do INPE em Setembro de 1991.

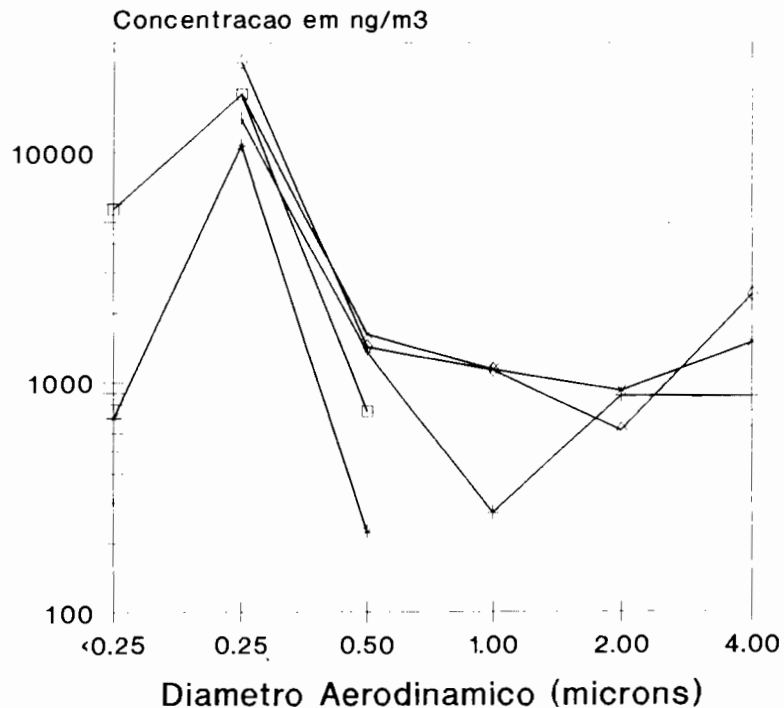
Figura 9 - Concentração de massa em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtidas na estação de monitoramento de queimadas em Cuiabá, MT. O Particulado inalável representa a soma das frações fina e grossa do material particulado.

Figura 10 - Concentração de carbono gráfico para as amostras de aerossóis coletadas na estação de monitoramento de Cuiabá, Mato Grosso.

Tabela 1 - Composicao elementar de aerossóis coletados em plumas de queimadas na Amazonia em 1991. Concentracao de massa de aerossóis, carbono grafítico e elementos, expressa em ng/m3.

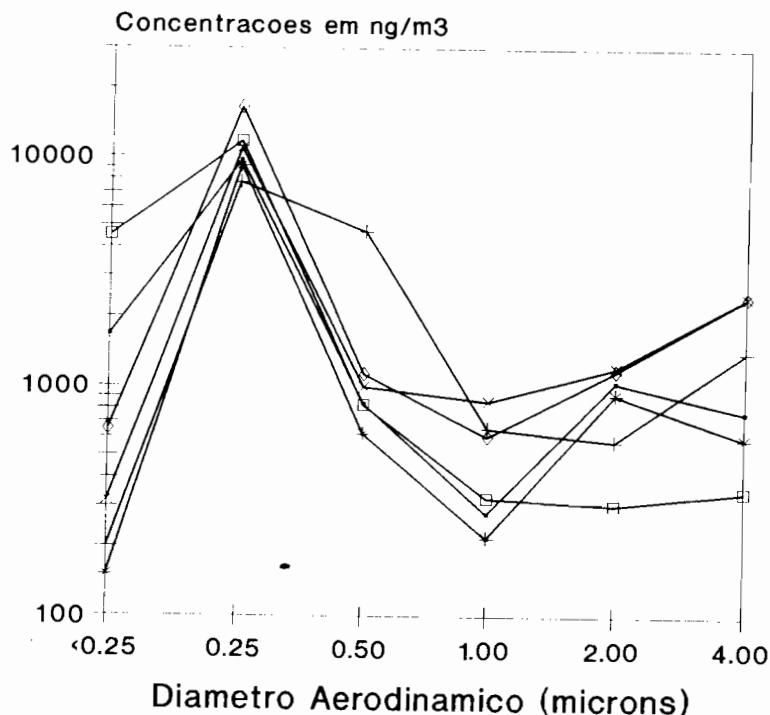
Regiao	Massa	Carbono	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Pb	Br	Rb	Sr	Zr
Brasilia	60000			3539	4402	105.8	604	146	875	1025	423		56.9	3085							8.06	15.0
P. Emas 1	128000			9643	7452	68.7	1126	192	1535	1649	1145	19	69.3	7817		4.4					10.55	36.9
P. Emas 2	94000			7558	5490	95.5	902	199	1369	980	1065	25	71.2	6449		5.6					8.14	22.8
Goiania	134000		1346	5344	3381		631	292	1141	925	369		243.1	3463								
Barr. (Ba) 1	101000			2127	3433		505	131	609	700	195		33.2	1435								
Barr. (Ba) 2	37000			1590	2883		492		765	773	150		26.8	1089	6.9	7.4					4.84	9.0
P. Nacional	80000	7010	426	2223	4009	124.2	871	131	1604	1348	185	3	71.3	1663	5.0	11.7		8.3	4.8		13.27	
Maraba 1	289000	26230	4337	1629	4252	1509.0	2645	2265	11061	9253	112		370.9	1350	16.7	45.3	1.8	37	18		83.64	
Maraba 2B	171000	10780	502	645	2422	159.6	2596	908	3042	2892	93		53.8	759	11.1	24.9		24			27.11	
Maraba 3	188000	14270	555	589	1083	115.9	2839	165	3189	1585	41		52.8	384		20.3		27	9.1		12.82	
Santarem	28000			216	399		1269		865	129	13		3.3	141		7.3						
Manaus	94000	7610	137	443	798		1960	28	1434	138	38		6.9	369	2.1	11.7				9.9		
Manaus B	342000	11150	864	1375	5930	363.7	2775	2153	3613	4966	271		99.1	1424	8.5	25.8		19	7.5		43.51	
P. Velho 1	207000	16370		1062	1487		3286	121	2484	276	88		17.2	796		22.8		15	15			
P. Velho 2	106000			4044	4724		1444		1789	479	375		45.4	2944		14.1						16.6
P. Velho 1B	370000	15140	1485	1615	5665	370.1	3210	1346	4469	7693	141		175.9	1410		27.1		14	10		67.99	
Cuiaba	181000	13940	468	7241	9113	252.6	1755	106	2479	1522	933	19	149.5	6234	9.6	34.3	4.9	13			20.71	21.0
C. Grande	49000			737	1618		1489		673	210	85		13.3	729	4.0	11.5		7.68				
Ponta Pora	248000			207	525		311		172	88	33		4.1	241				8.59				

Fosforo - Distribuicao de Tamanho Queimadas 1980



- | | | |
|------------|------------|------------|
| —+— IC 20B | —+— IC 21B | —+— IC 22B |
| —+— IC 23B | —+— IC 24B | |

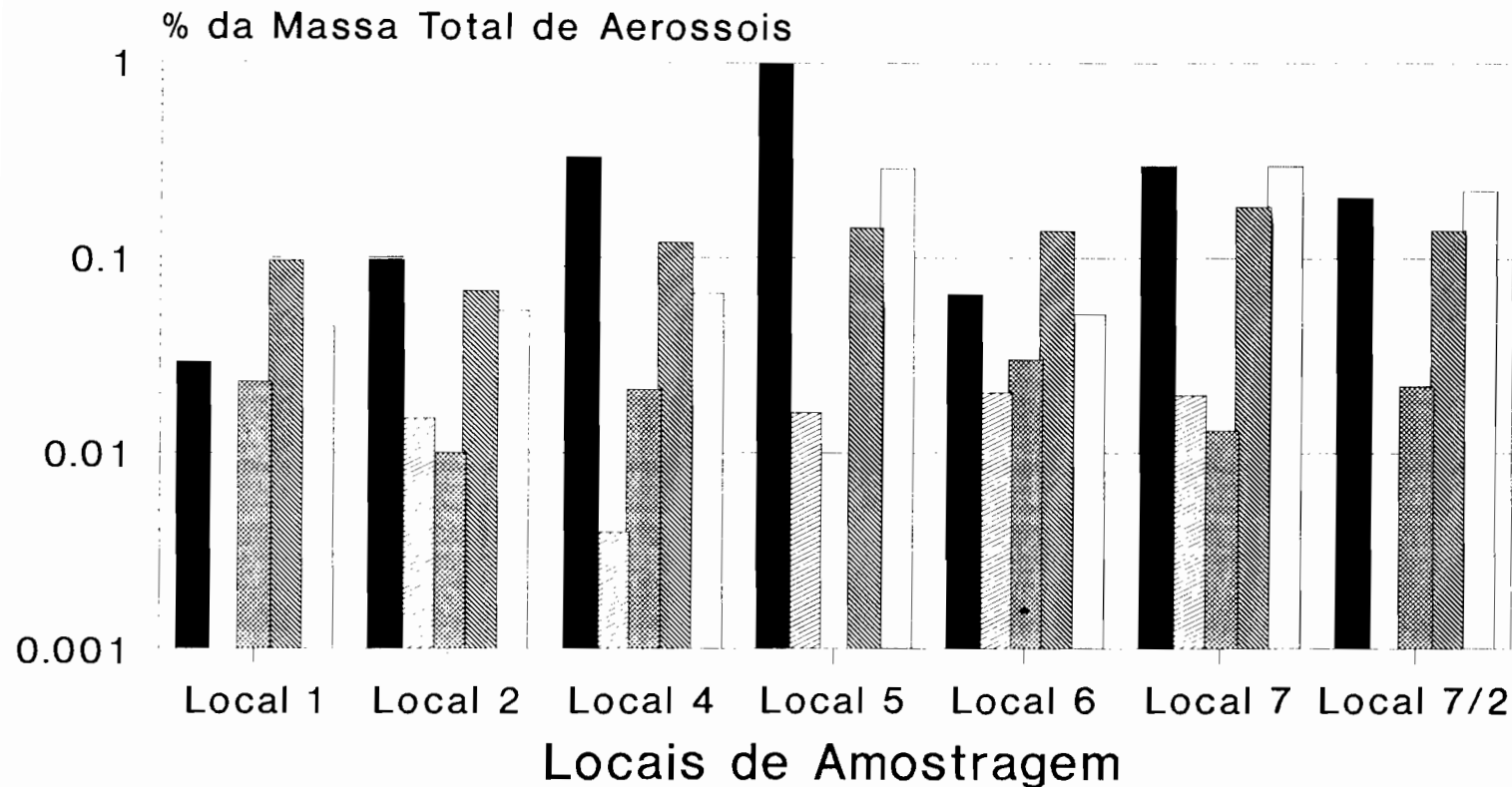
S - Distribuicao de Tamanho Queimadas 1980



- | | | |
|------------|------------|------------|
| —+— IC 19B | —+— IC 20B | —+— IC 21B |
| —+— IC 22B | —+— IC 23B | —+— IC 24B |

Queimadas na Bacia Amazonica

Composicao elemental - Queimadas 1980



K

Ca

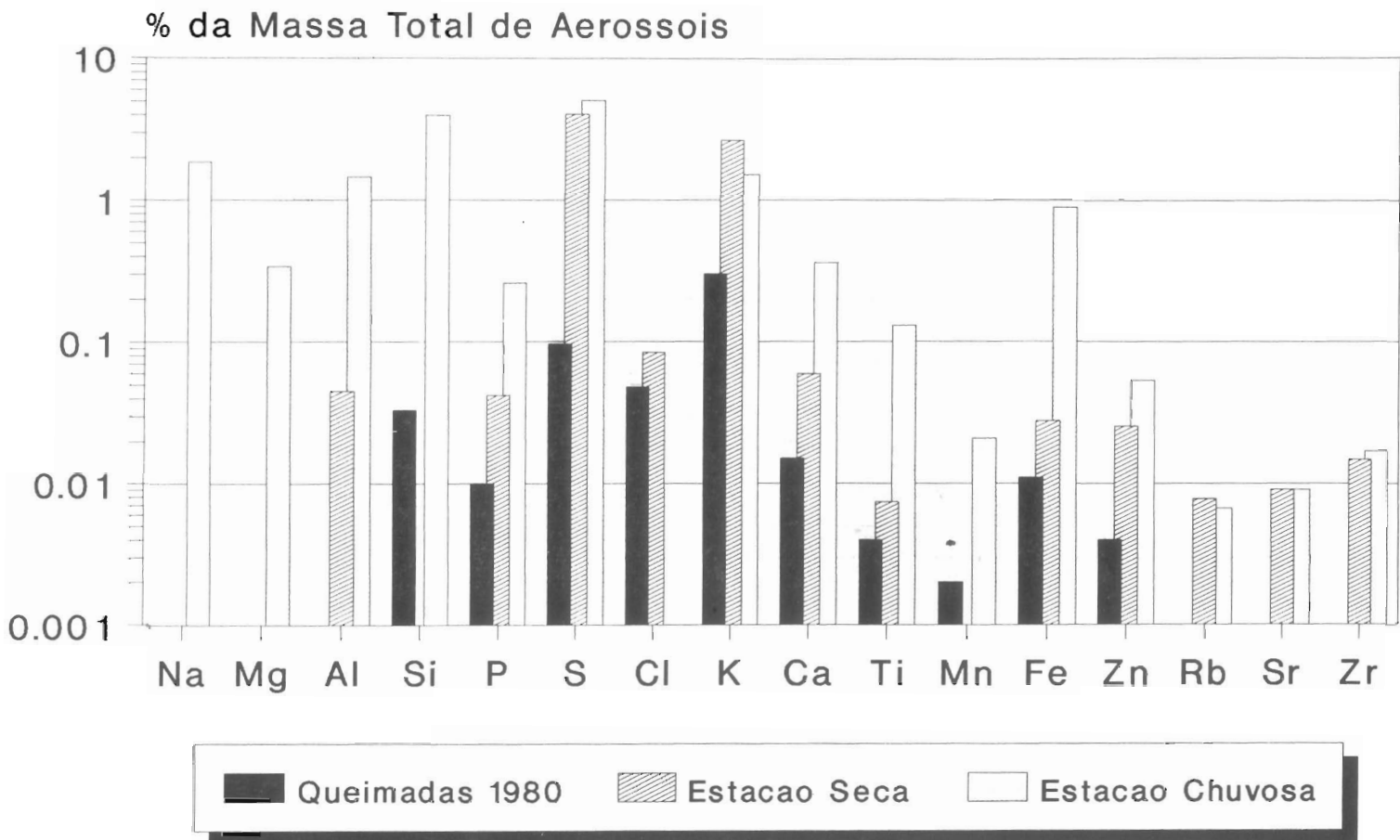
P

S

Cl

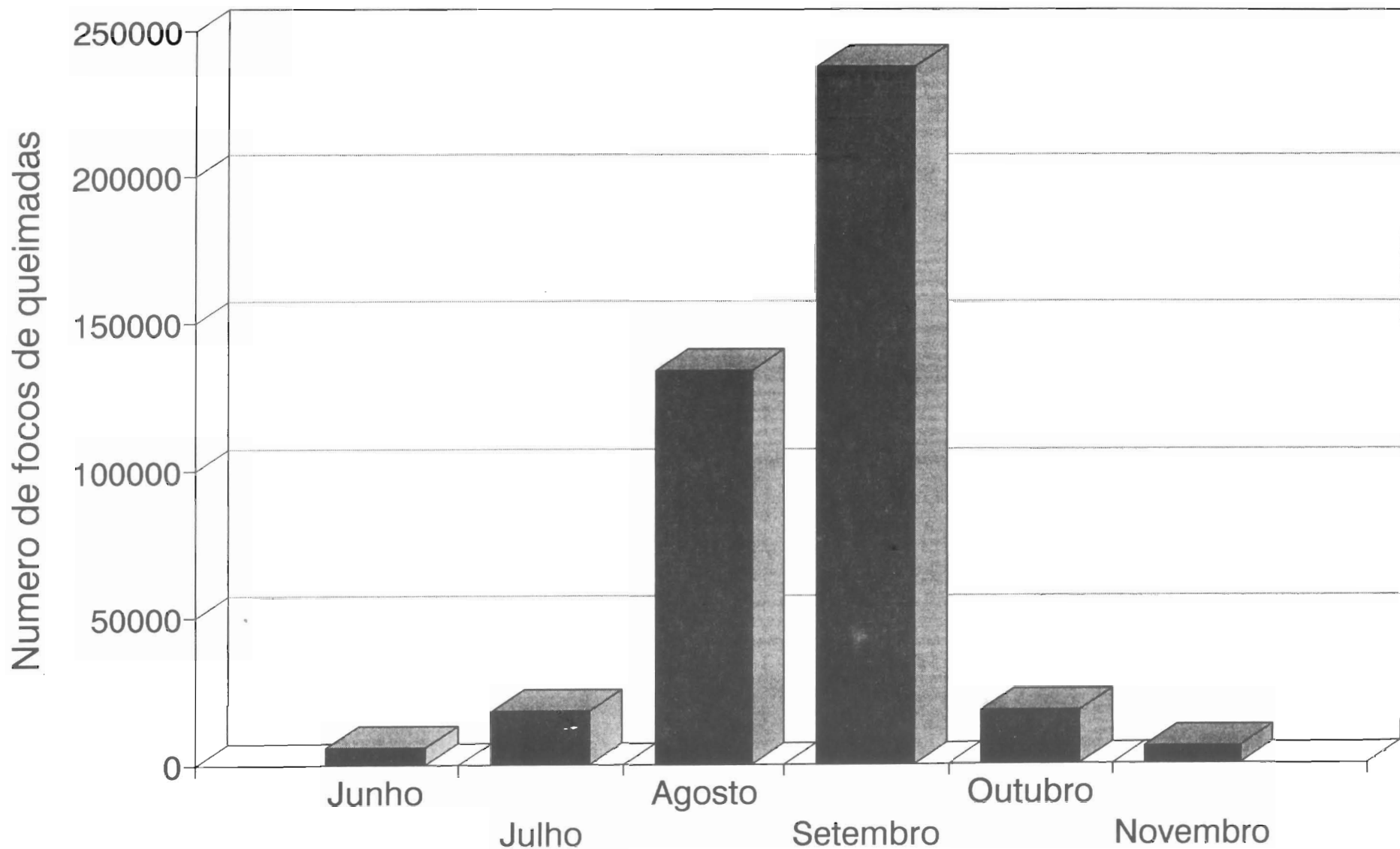
Aerossóis de queimadas e remoto

Composicao elemental da moda fina



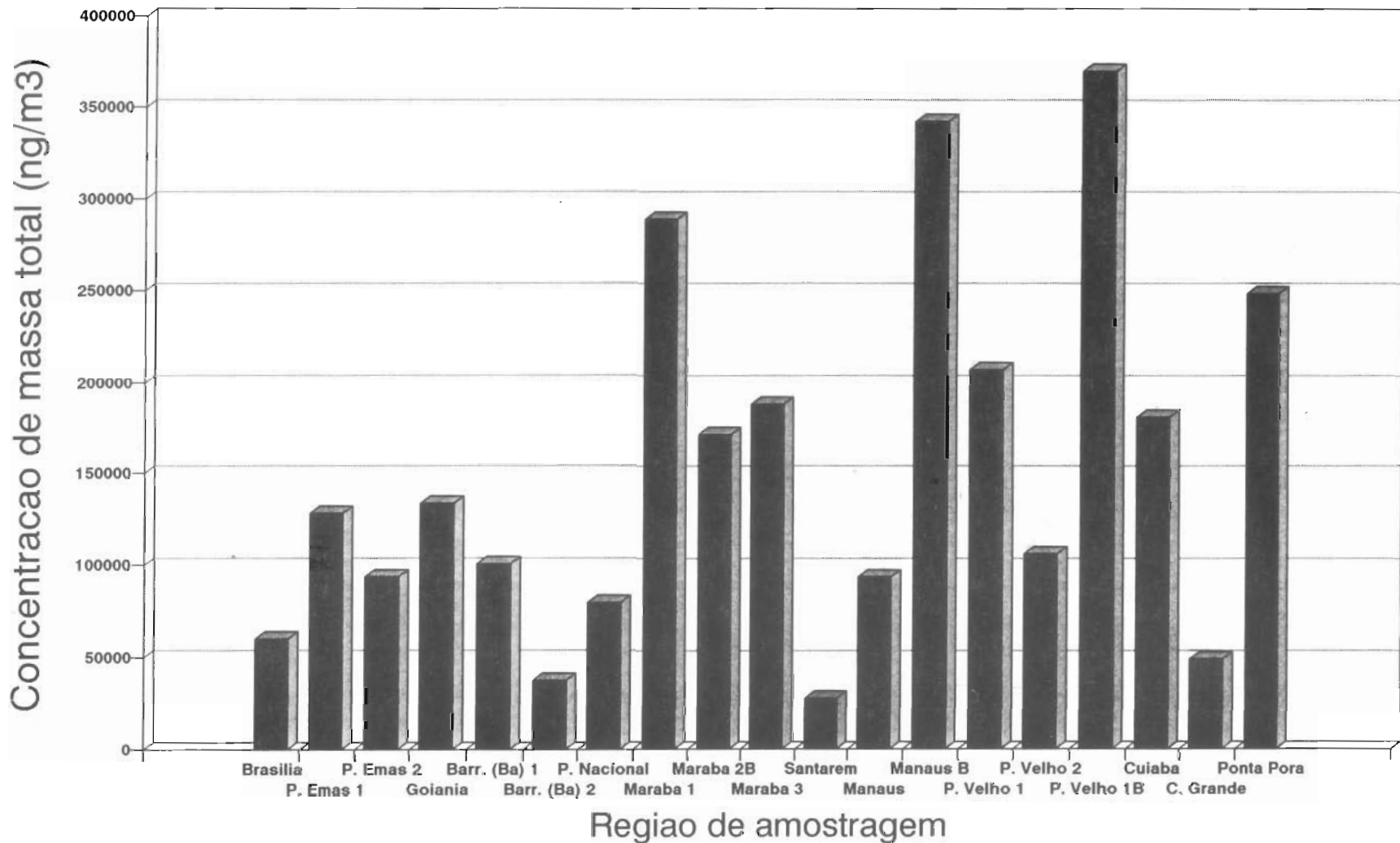
Numero de Focos de Queimadas - Amazonia

Estacao de queimadas de 1991 - AVHRR

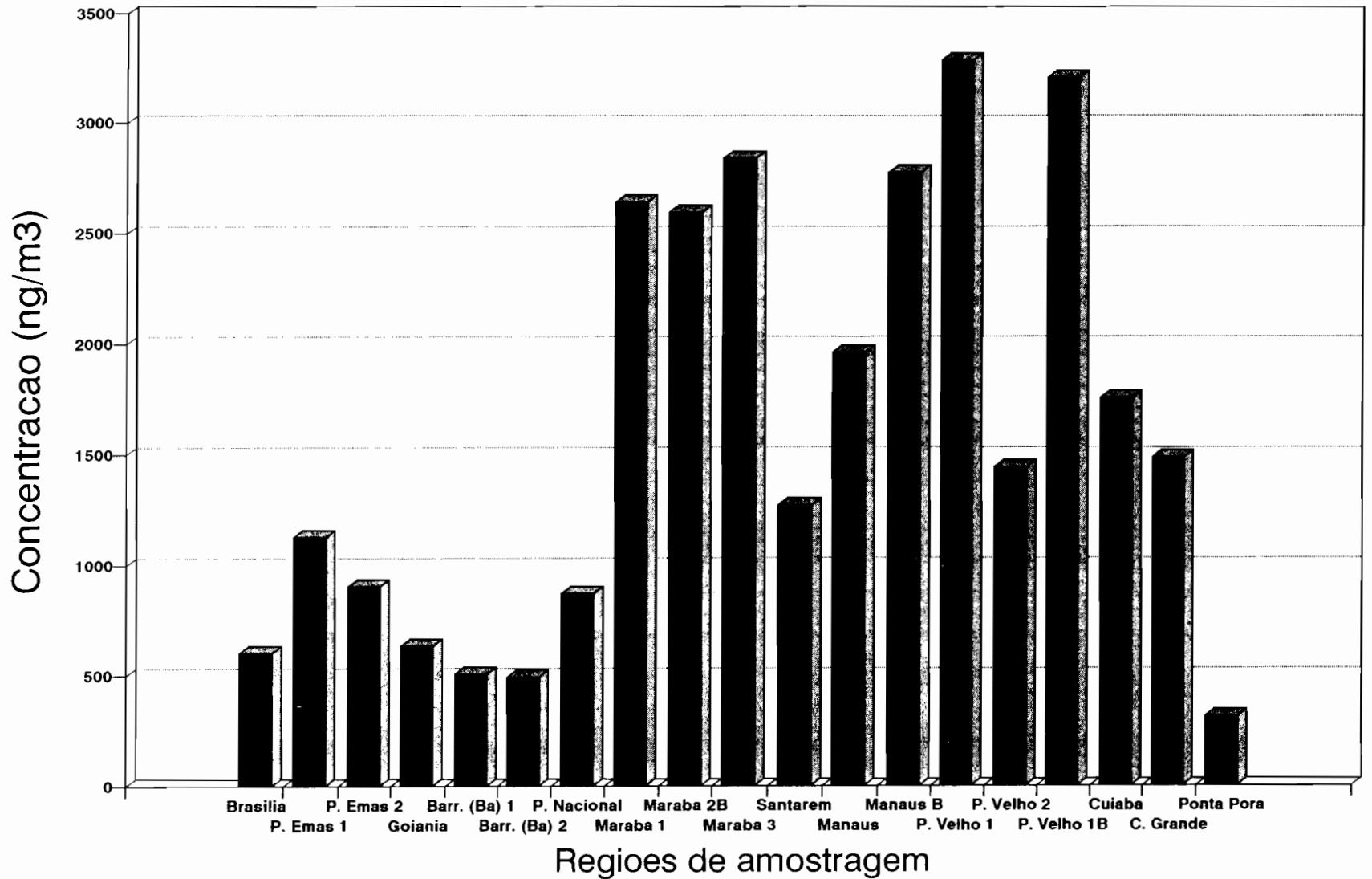


Queimadas na Amazonia em 1991

Concentracao de particulas em suspensao

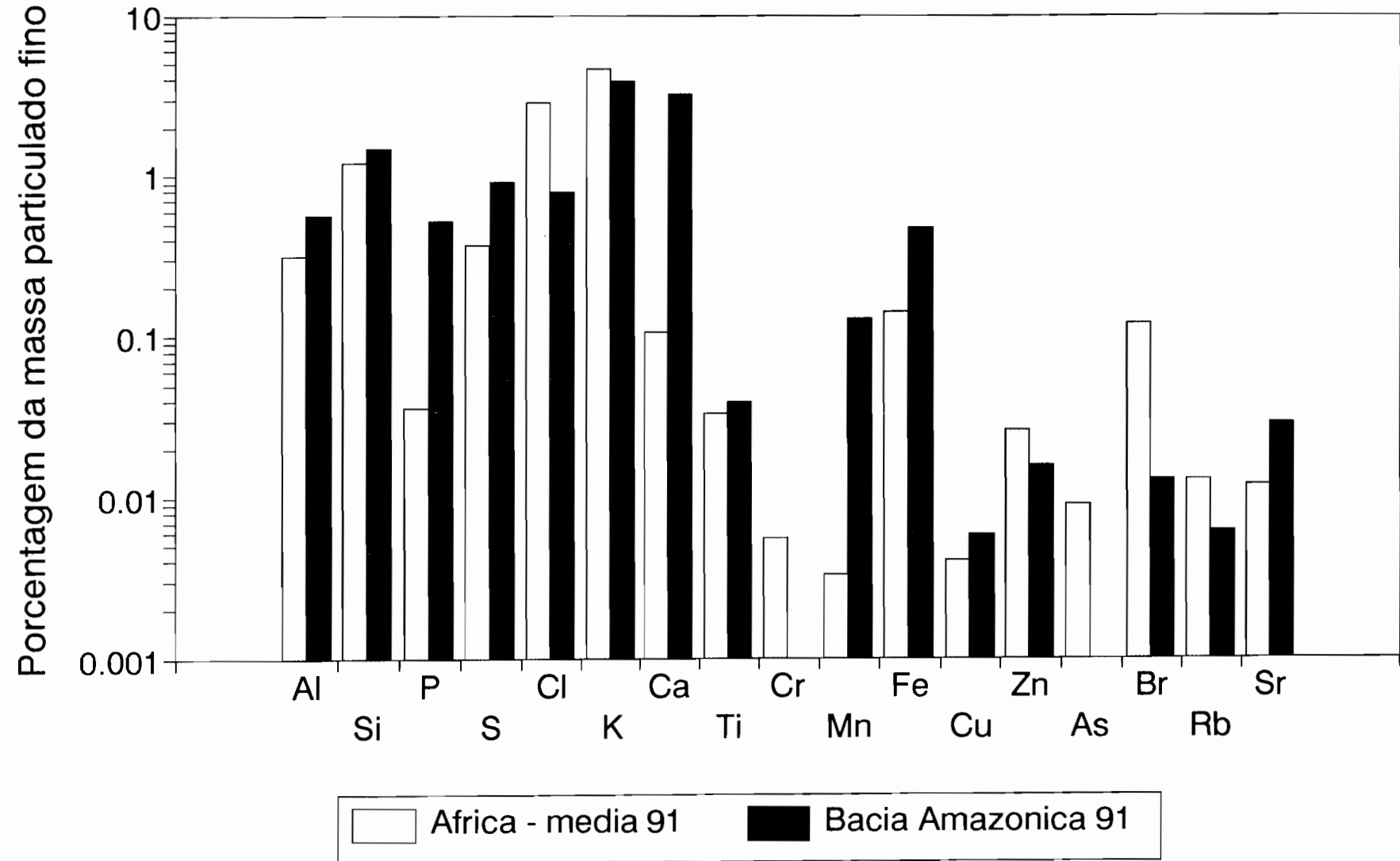


Enxofre em Queimadas na Amazonia- 1991



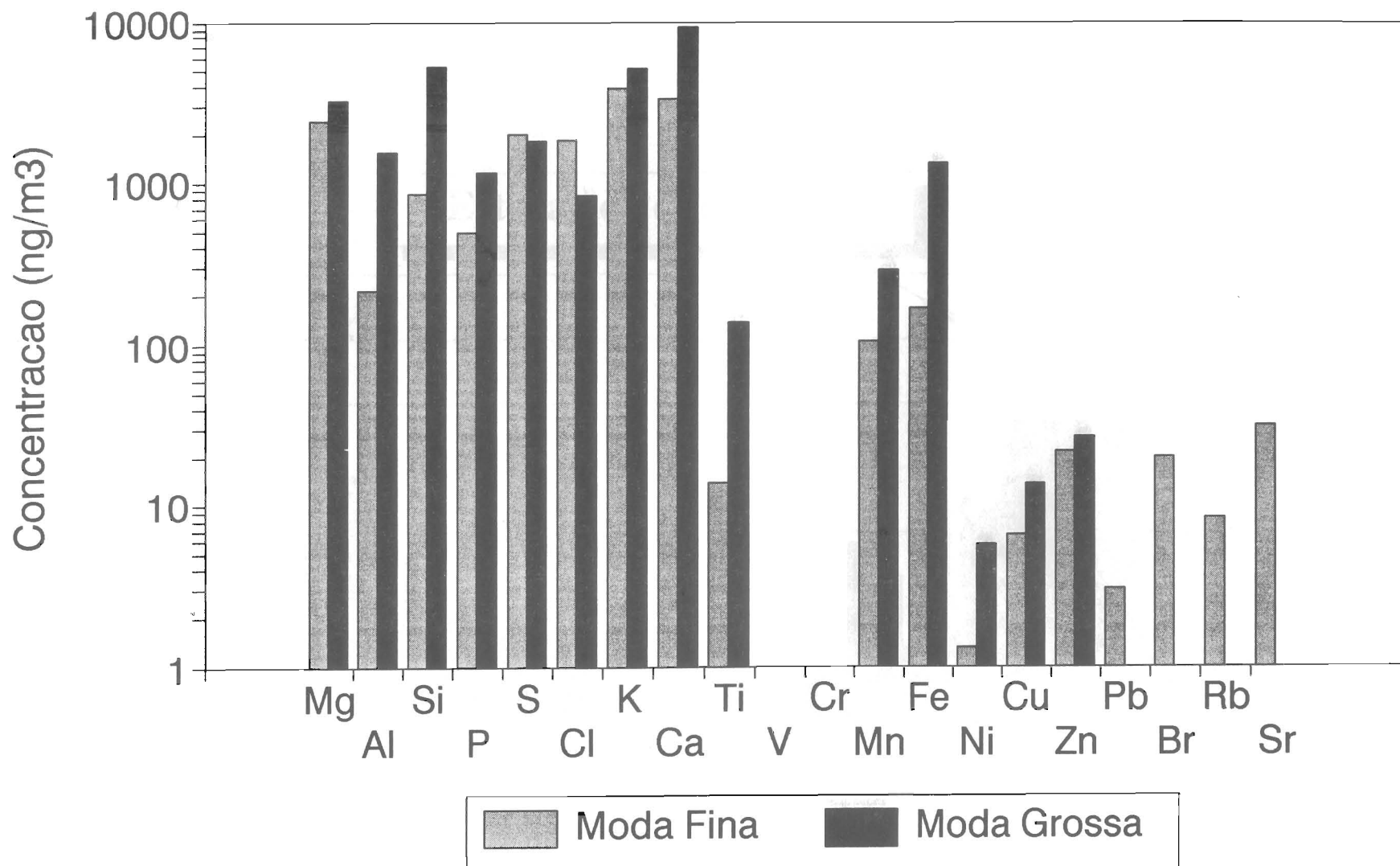
Composicao Elementar Emissoes Queimadas

Africa (DECAFE-91/FOS) e Amazonia 1991



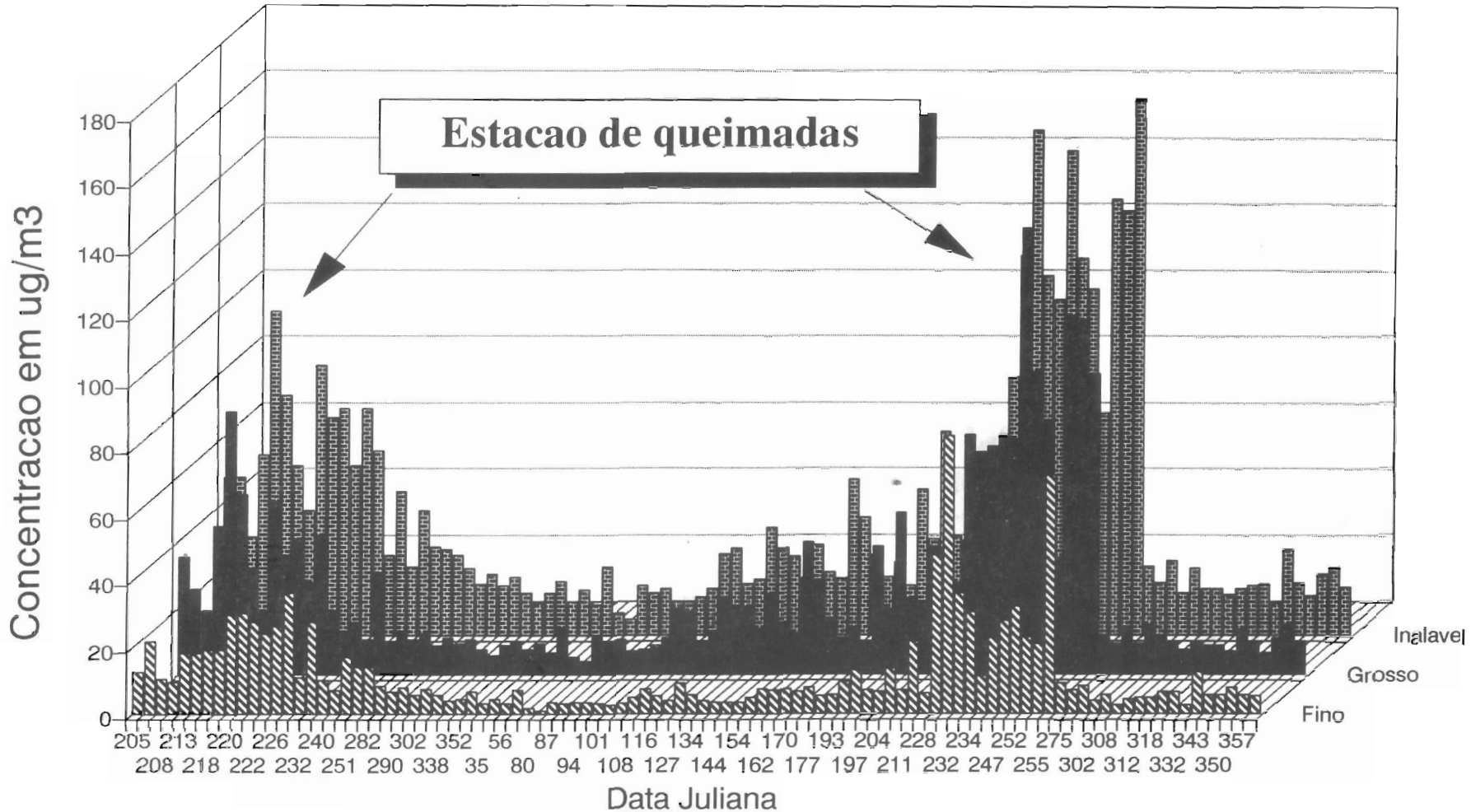
Queimadas na Amazonia em 1991

Aerossois em Maraba - Altitude 1000 m



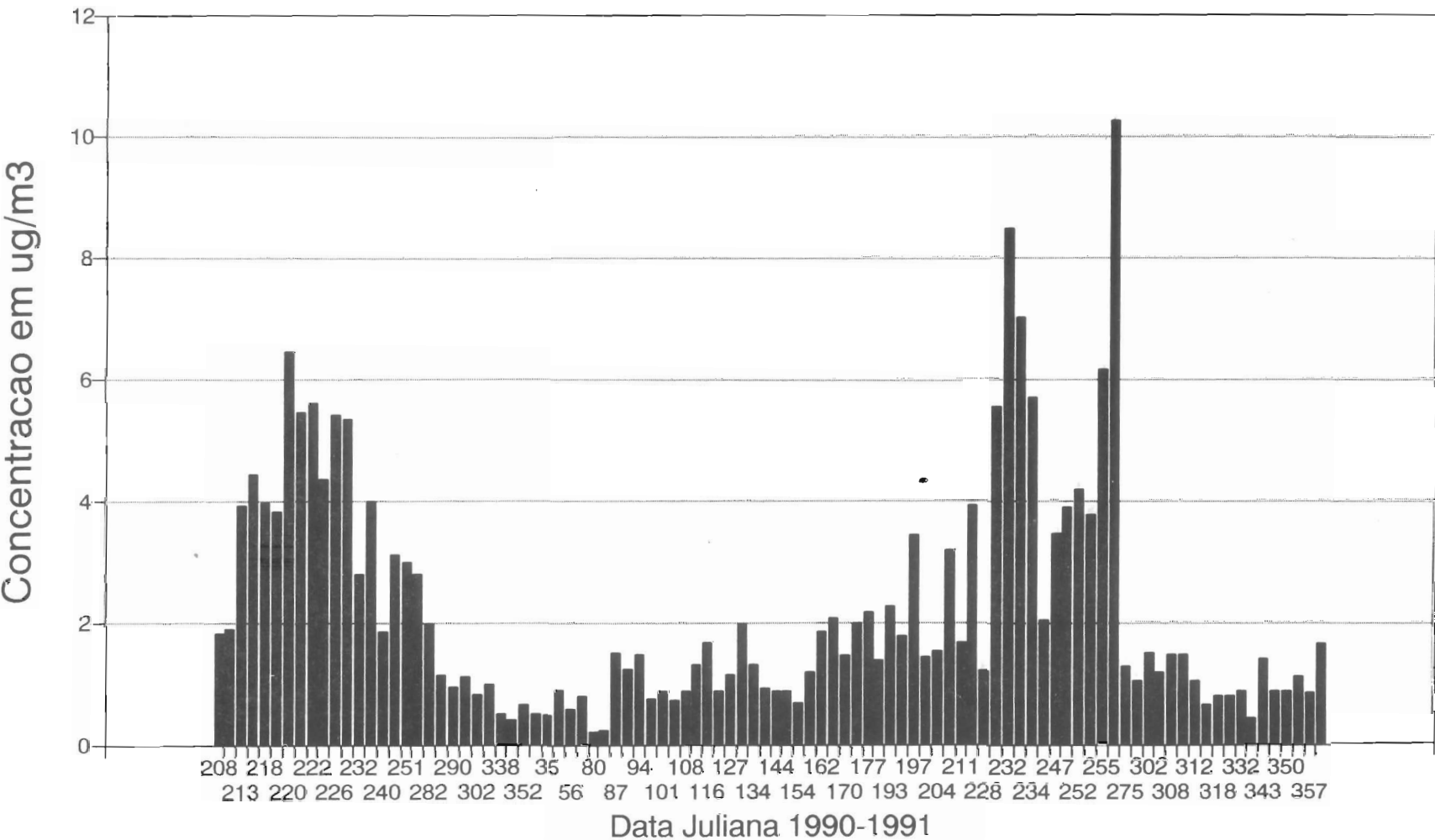
Material Particulado em Cuiaba

Monitoramento contínuo em 1990/1991



Estacao Amostradora de Cuiaba

Concentracao de carbono grafítico



Legenda das Figuras

Figura 1 - Distribuição de tamanho elementar de partículas emitidas durante o processo de queimadas na Amazônia. As partículas finas, menores que $2\mu\text{m}$, podem ser transportadas por grandes distâncias.

Figura 2 - Variabilidade da composição elementar para diferentes amostras coletadas em queimadas.

Figura 3 - Comparação da composição elementar média de amostras coletadas em queimadas com amostras de regiões remotas, não afetadas por queimadas, representando partículas biogênicas emitidas naturalmente pela vegetação.

Figura 4 - Número de focos de queimadas na Amazônia detectados pelo sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo do satélite NOAA-11.

Figura 5 - Concentração de massa de aerossóis na atmosfera Amazônica coletados em voos do avião Bandeirante do INPE. A duração média dos voos foi de 3 horas, com as amostras representando médias sobre regiões extensas da Bacia Amazônica. A altitude média foi de 1000 m.

Figura 6 - Concentração de enxofre na atmosfera Amazônica analisadas em amostras coletadas com o avião Bandeirante do INPE em Setembro de 1991.

Figura 7 - Comparação da composição elementar de aerossóis emitidos em queimadas na África e no Brasil.

Figura 8 - Composição elementar de aerossóis das modas finas e grossas em Marabá, PA durante as medidas de emissões de queimadas utilizando-se o avião Bandeirante do INPE em Setembro de 1991.

Figura 9 - Concentração de massa em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtidas na estação de monitoramento de queimadas em Cuiabá, MT. O Particulado inalável representa a soma das frações fina e grossa do material particulado.

Figura 10 - Concentração de carbono grafitico para as amostras de aerossóis coletadas na estação de monitoramento de Cuiabá, Mato Grosso.