

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498 SÃO PAULO - SP
BRASIL

PUBLICAÇÕES

IFUSP/P-988

**EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO E GASES
EM QUEIMADAS NA FLORESTA AMAZÔNICA E NO
CERRADO BRASILEIRO**

**Paulo Artaxo, Suely Carvalho, Marcia A. Yamasoe,
Sergio Kocinas, José V. Martins, Fábio Gerab
Instituto de Física, Universidade de São Paulo**

**2ª Parte do Relatório do Projeto:
Consequências das Emissões da Queima de Combustíveis
Fosseis, Queimadas e Desflorestamento no Brasil para o
Efeito Estufa**

Junho/1992

**Emissões de Material Particulado e
Gases em Queimadas na Floresta
Amazônica e no Cerrado Brasileiro**

Paulo Artaxo, Suely Carvalho,
Marcia A. Yamasoe, Sergio Kocinas, José V. Martins, Fábio Gerab
Instituto de Física, Universidade de São Paulo,
Caixa Postal 20516, CEP 01498, São Paulo, SP. FAX (011) 814 05 03.

2ª Parte do Relatório do Projeto

**Consequências das Emissões da Queima de
Combustíveis Fosséis, Queimadas e
Desflorestamento no Brasil para o Efeito Estufa.**

Realizado pela COPPE / UFRJ, USP e INPE
como subsídio para o IBAMA.

Resumo

As queimadas realizadas regularmente na Amazônia e no cerrado brasileiro tem efeitos sobre a composição global da atmosfera e sobre os ciclos naturais de diversos nutrientes essenciais para a floresta. As emissões de gases e partículas para a atmosfera em regiões tropicais tem um papel importante na química atmosférica global do planeta, e são cruciais para o estudos das mudanças atmosféricas globais, além de afetarem a atmosfera a nível regional. Existem discrepâncias significativas sobre metodologia de quantificação das emissões de queimadas e os efeitos a nível global do planeta. As queimadas de todo o mundo contribuem em cerca de 26 a 40 % do total de CO₂ emitido globalmente. Em termos de contribuição ao efeito estufa, as queimadas são responsáveis por cerca de 13 a 25 % do "Global Warming Potential", de acordo com os últimos dados disponíveis [Levine, 1992, Jäger, 1992]. As queimadas são também responsáveis por uma parcela significativa da emissão de diversos gases como o monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH₃), hidrocarbonetos (HC), cloreto de metila, hidrogênio e outros. Outros gases como ozônio (O₃) e o radical hidroxila (OH⁻) se formam na atmosfera através de reações químicas entre os gases emitidos diretamente. Em termos de matéria particulada, grandes emissões de elementos traços e nutrientes biogênicos 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.

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, Santarém, Manaus, Rondônia, 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 regional do ar na Amazônia em épocas de queimadas. Concentrações de material particulado inalável acima de 300 µg/m³ foram observadas em grandes regiões. Nossos resultados mostram que em uma extensa área da Bacia Amazônica e por cerca de três meses, a legislação brasileira de poluição do ar está sendo violada. Altas concentrações de diversos elementos tais como K,

S, Si, Fe, P, Ca e Zn foram observados. Carbono grafitico responde por cerca de 20 % da massa das partículas. Emissões de grande porte de elementos como potássio, fósforo, enxofre e zinco tem o potencial de alterar os ciclos geoquímicos naturais destes elementos, alterando os fluxos de nutrientes essenciais para a manutenção do ecossistema Amazônico. 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 nuvens, tendo o potencial de alterar os mecanismos de formação de nuvens e de alterar o perfil de precipitação na Bacia Amazônica. Resultados de monitoramento contínuo em Cuiabá confirmam os dados obtidos em avião, apontando para níveis de material particulado bastante elevados na Bacia Amazônica, mesmo em regiões distante milhares de quilômetros das regiões de queimadas. Medidas de CO e de O₃ realizadas pelo INPE em Cuiabá confirmam os resultados obtidos para material particulado. Altas concentrações de ozônio podem estar causando danos à floresta Amazônica. Este quadro configura uma séria problemática regional de poluição do ar causado pelas queimadas na Amazônia. A floresta Amazônica será um recurso natural extremamente valioso e estratégico no futuro próximo, e é imprescindível um plano de manejo adequado para este rico recurso natural de todos os brasileiros.

1 - A evolução da atmosfera terrestre e o efeito estufa

O relacionamento entre a atmosfera terrestre e a biosfera iniciou-se cerca de 4.5 bilhões de anos atrás, quando estima-se que nosso planeta se formou. A partir deste momento houve uma dinâmica e intensa cooperação entre o sistema geofísico, a vida no planeta e a composição da atmosfera, até chegarmos ao momento atual. Hoje, talvez pela primeira vez na história de nosso planeta, uma parte da biosfera (o ser humano e seu sistema) adquiriu a capacidade de alterar globalmente a composição da atmosfera. Esta alteração está ocorrendo globalmente e em uma escala temporal extremamente rápida. Isto está ocorrendo a despeito de conhecermos cientificamente uma minúscula fração dos complexos fenômenos físicos, químicos e biológicos que governam a composição da atmosfera.

A atmosfera terrestre nasceu como resultado de um intenso vulcanismo que deve ter durado por cerca de 100 milhões de anos, durante a infância de nosso planeta. Os gases vulcânicos, principalmente vapor de água, dióxido de carbono (CO₂) e nitrogênio, continham os elementos essenciais para a formação da vida: carbono, nitrogênio, oxigênio

e hidrogênio. O CO₂ e o vapor de água são gases que realizam "efeito estufa", e mantiveram a temperatura da terra acima do congelamento, o que permitiu o aparecimento da vida em nosso planeta. Sem o efeito estufa natural, nosso planeta seria gelado, e incapaz de produzir e manter a vida. O forte acoplamento entre a atmosfera e o oceano foi intensificado pela radiação solar que interagiu com o CO₂, nitrogênio e vapor de água, resultando em moléculas complexas, que absorvidas pelo oceano formaram os primeiros aminoácidos, que foram os precursores dos seres vivos.

A 3.5 bilhões de anos atrás, o primeiro sistema vivo apareceu no oceano. O oceano protegia a vida da letal radiação ultravioleta emitida pelo sol, já que a camada protetora de ozônio ainda não tinha-se formado. A fotossíntese foi um processo desenvolvido para a alimentação de algumas espécies, e iniciou-se a produção de oxigênio (O₂), que foi se acumulando na atmosfera. Junto com o O₂, iniciou-se a produção de Ozônio(O₃), que iniciou um sistema de proteção à vida, diminuindo a incidência da letal radiação ultravioleta emitida pelo sol. A presença de oxigênio também levou ao desenvolvimento de seres vivos capazes de respirar.

Oxigênio atmosférico também trouxe o fogo para nosso planeta. Respiração e fogo se tornaram importantes fontes de CO₂ na atmosfera terrestre. Nos últimos 100 anos, a queima de combustíveis fósseis e de biomassa se tornaram as maiores fontes deste importante gás que é o principal responsável pelo "efeito estufa" natural e antropogênico.

A presença de O₂, O₃ e CO₂ levaram os seres vivos, cerca de 400 a 600 milhões de anos atrás, a deixarem o oceano, que protegia a vida da radiação ultravioleta. Uma vez no solo, a vida prosperou rapidamente, criando uma grande diversidade biológica. A vida das plantas e dos animais passou a controlar e regular a composição da atmosfera através dos ciclos biogeoquímicos dos elementos, da respiração, nitrificação, e metanogênese. Quase todo gás atmosférico (com exceção dos gases nobres) são reciclados ou produzidos através de organismos microscópicos ou plantas e animais macroscópicos. Processos geológicos como vulcanismo também contribuem com gases que são processados por seres vivos dentro de seus ciclos biogeoquímicos. Altas concentrações de carbono grafitico no limite do Cretácio-Terciário (cerca de 70 milhões de anos atrás) apontam para a ocorrência de grandes incêndios globais, que podem ter alterado o clima global na época. O desaparecimento dos dinossauros ocorreu no mesmo período. O uso do fogo como utensílio para preparação de comida e para caça pelo homem teve início à cerca de 1.5 a 2 milhões de anos atrás. A chegada do *Homo sapiens* no

continente Australiano à 40 milhões de anos atrás, foi acompanhado do aumento por cerca de 1000 vezes na quantidade de carbono grafitico em sedimentos [Schüle, 1990].

A nova grande força controladora da composição da atmosfera somente apareceu há cerca de 150 anos atrás, com a revolução industrial. Atualmente gases e partículas são emitidos para a atmosfera em grandes quantidades, como resultado de diversos processos antropogênicos. Entre estes processos, a queima de carvão, petróleo ou gás natural para a produção de energia domina as emissões globais. O segundo mais importante processo é a alteração do uso de solo pelas queimadas em regiões tropicais. O uso indiscriminado de fertilizantes não-naturais produz grandes quantidades de óxido nítrico e óxido nítrico. O aumento das áreas cultivadas por arroz e para pasto de gado são grandes fontes de metano via processos metabólicos microbiais. A emissão de gases industriais como os clorofluorcarbonos e diversos outros compostos está afetando o balanço de radiação atmosférica, tanto para a radiação infravermelha, como para a ultravioleta. Este conjunto de emissões caracteriza a recente capacidade do homem de alterar globalmente a composição da atmosfera.

2 - As queimadas do ponto de vista global e o efeito estufa

É importante salientar que a ciência ainda conhece muito pouco das emissões atmosféricas de queimadas, e seus efeitos globais. É bastante recente em termos mundiais a execução de experimentos de medidas e caracterização quantitativa de emissões atmosféricas de queimadas. Em uma escala global, anualmente as queimadas consomem em termos de biomassa seca cerca de 8680 Teragramas (Tg) (1 Teragrama = 1 milhão de toneladas = 10^{12} gramas). Cerca de 43 % (3690 Tg/ano) ocorrem nas savanas e cerrados. Queimadas de sobras de atividades na agricultura é responsável por cerca de 23 % (2020 Tg/ano). Queimadas de florestas tropicais responde por cerca de 18 % (1540 Tg/ano) e a queima de madeira para combustível responde por 16 % (1430 Tg/ano) [Levine, 1992]. A queima de 8680 Tg/ano (matéria seca) leva à uma emissão de cerca de 3500 Tg/ano de carbono na forma de CO_2 . Este valor corresponde a cerca de 40 % da emissão mundial de CO_2 , e cerca de 67 % do CO_2 proveniente da queima de combustíveis fósseis, estimada em 5200 Tg C/ano. A Tabela 1 (adaptada de Andreae, 1992) apresenta uma estimativa global das quantidades queimadas por região e as emissões de CO_2 . Diversos aspectos podem ser observados na tabela 1. As emissões de CO_2 da África e da

Ásia são superiores às da América. A maior emissão ocorre como consequência de queimadas de savanas na África. A queima de florestas tropicais ainda representa a menor parcela em termos de massa queimada.

Tabela 1 - Estimativas de quantidades de biomassa queimadas nas regiões tropicais e emissões por atividade e regiões.

Região	Floresta	Savana	Combustível	Sobras Agricultura	Total Região	Emissões
	Tg dm/ano	Tg dm/ano	Tg dm/ano	Tg dm/ano	Tg dm/ano	Tg C/ano
América	590	770	170	200	1730	780
África	390	2430	240	160	3210	1450
Ásia	280	70	850	990	2190	980
Oceania	-	420	8	17	450	200
Total Trópicos	1260	3690	1260	1360	7580	3410

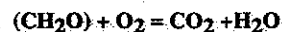
(* Adaptada de Andreae, 1992. Tg dm/ano significa 10^{12} g de matéria seca queimada por ano.

As queimadas não são um fenômeno exclusivamente tropical. Grandes áreas são queimadas em florestas boreais, por exemplo na Sibéria, China, Estados Unidos e outras áreas. Historicamente não é claro se as queimadas estão aumentando ou diminuindo nos últimos 150 anos. Alguns pesquisadores [Pyne, 1992] apontam para as grandes áreas queimadas no século XIX nos continentes norte-americano e europeu, como resultado da expansão populacional nestes continentes. É consenso entretanto, que nos últimos 40 anos, as queimadas no Brasil aumentaram de intensidade. As emissões de gases e partículas tem uma variabilidade muito grande, dependendo do ecossistema, tipo do fogo, humidade da madeira e da fase do fogo. Medidas por satélites indicam claramente aumento da concentração atmosférica de monóxido de carbono (CO) e de ozônio associados com queimadas. Os níveis de ozônio na Amazônia em áreas longe das queimadas atingem esporadicamente valores bastante elevados, a nível de 80 ppb [Setzer et al., 1992, Kirchhoff, 1992], que é estimado como tendo efeito deletério sobre a vegetação. Os níveis de CO em largas regiões são superiores a maioria das áreas urbanas do Brasil. Algumas estimativas apontam que em uma base anual, as queimadas produzem cerca de 38 % do

ozônio na troposfera e 32 % do CO [Levine, 1992]. Em termos de material particulado, as queimadas produzem cerca de 39 % do carbono orgânico da atmosfera. Emissões que são também significativas consistem de hidrogênio, hidrocarbonetos, cloreto de metila, metano, óxidos de nitrogênio e muitos outros gases. As queimadas também alteram significativamente a produção por micróbios de óxido nitroso e óxido nítrico em solos. A bioquímica do solo realizada pela micro fauna e flora parece ser alterada, por mecanismos ainda não totalmente compreendidos.

Existem grandes discrepâncias na literatura internacional sobre a área queimada e sobre as emissões atmosféricas resultantes. Baseado nos trabalhos de Houghton et al., 1985 e de Hao et al., 1990, uma razão média de desflorestamento global de 22 milhões de hectares por ano durante a década de 1970 pode ser derivada. Destes 22 milhões ha/ano, 7.5 milhões de ha/ano correspondem à florestas chuvosas tropicais, correspondendo a uma destruição anual de cerca de 0.6 % dos 1200 milhões de hectares de florestas tropicais chuvosas remanescentes. Estimativas das frações de desmatamento devido à prática de agricultura de deslocamento e uso permanente da terra variam de 1.9 a 5.1 milhões de hectares por ano [Hao et al., 1990, Houghton et al., 1985]. Estas grandes discrepâncias nas estimativas devem ser diminuídas. As savanas e cerrados tropicais cobrem uma área de 1530 milhões de hectares, similar à área de florestas tropicais (1440 milhões de hectares).

A queima de material orgânico da biomassa produz vapor de água e CO₂ como principais produtos, de acordo com a reação:



Onde (CH₂O) representa a composição média da biomassa. Esta reação pode ser essencialmente vista como a reação de respiração-fotossíntese. Deste modo, a longo prazo, as queimadas não influenciam o balanço de CO₂, mas meramente retorna para a atmosfera o CO₂ que foi retirado anteriormente. Entretanto, quando ocorre uma queimada, não temos um rápido re-crescimento da floresta original, fazendo com que o CO₂ seja adicionado à atmosfera, até que outro processo o retire de lá. É importante distinguir a emissão bruta de CO₂ da emissão líquida de CO₂.

Durante o processo de queimadas, além do CO₂ e de água, uma grande variedade de gases e partículas são emitidos. Devido à combustão incompleta são produzidas grandes quantidades de CO. Outros gases são emitidos em diversos processos químicos complexos. Estas emissões são quantificadas em gramas do composto para

quilogramas de carbono como CO₂. A Tabela 2 apresenta um resumo das estimativas de emissões de alguns gases e de partículas.

Tabela 2 - Emissões de gases e partículas em queimadas. Valores em gramas por quilogramas de carbono, como CO₂.

Espécies	Estudos de Campo	Medidas em Laboratório	Provável valor
CO	65-140	59-105	100
Metano	6.2-16	11-16	11
NMHC	6.6-11.0	3.4-6.8	7
Óxido Nitroso	0.18-2.2	0.01-0.05	0.1
NO _x	2-8	0.7-1.6	2.1
Amônia	0.9-1.9	0.08-2.5	1.3
Compostos Orgânicos de Nitrogênio	-	0.24-0.93	0.6
SO ₂ + sulfato	0.1-0.34	-	0.3
COS	0.005-0.016	-	0.01
Cloreto de Metila	0.023-0.033	0.02-0.3	0.05
Ozônio ⁽¹⁾	4.8-40	-	30
Matéria Particulada Total	12-82	-	30
Carbono Orgânico Particulado	7.9-54	-	20
Carbono Elementar (Soot)	2.2-16	-	5.4
Potássio Particulado	0.24-0.58	-	0.4

(*) Adaptada de Andreae, 1992.

(1) Ozônio produzido fotoquimicamente nas plumas de queimadas. Resultados em moles emitidos por 1000 moles de CO₂.

Além da grande variedade de emissões atmosféricas diretas nas queimadas, é importante compreender que estes gases reagem entre si na atmosfera Amazônica. Na região tropical, a temperatura elevada, a alta humidade atmosférica e alta carga de partículas em suspensão fazem com que diversas reações químicas ocorram mais

rapidamente do que em regiões temperadas. Os gases emitidos em queimadas contém essencialmente os mesmos constituintes que formam o "smog" fotoquímico urbano: CO, NO_x e hidrocarbonetos. Esta mistura quando exposta à luz do sol produz ozônio, que é fitotóxico (traz danos à vegetação). O radical hidroxila (OH) também é produzido secundariamente em grandes quantidades. Diversos destes gases tem tempo de residência longo, sendo transportados por milhares de quilômetros, participando da circulação global do planeta. O CO₂ tem tempo de residência estimado em cerca de 100 anos. Outros gases mais reativos tem tempo de residência de somente algumas horas na atmosfera Amazônica.

A Figura 1 apresenta uma comparação das emissões de queimadas com as emissões globais (incluindo queimadas) para uma série de gases e matéria particulada. Observa-se que para CO₂, CO, NO_x e diversos outros gases, as queimadas são responsáveis globalmente por uma fração significativa das emissões totais. Para carbono elementar, as queimadas são responsáveis por 86 % do total emitido no planeta. Para CO₂, as incertezas são grandes, com os valores mais aceitos estando entre 20 % a 40 %. Na Figura 1 estão colocadas as emissões brutas e líquidas de CO₂ (estimadas em 40 % e 26 %). É difícil realizar uma estimativa exclusiva para o Brasil, por razões metodológicas. É importante salientar que independente da importância quantitativa do Brasil nas emissões globais (talvez na faixa de 4 a 9 %), estes valores são bastante elevados e devem ser reduzidos.

A emissão destes gases afeta o balanço de radiação atmosférico. Uma das maneiras de calcular este efeito quantitativamente é através do chamado "Global Warming Potential" (GWP). O GWP fornece uma medida da potencialidade do aquecimento global das emissões de gases com propriedades radiativas que afetam o efeito estufa. Em Lashof [1992] podemos obter cálculos detalhados do GWP relativos às emissões de queimadas, e a melhor estimativa é de que 13 % do GWP atual é devido às emissões de queimadas. O valor máximo estimado é de 25 % do GWP total de todas as emissões mundiais de gases para a atmosfera.

Um aspecto importante das emissões de queimadas é o seu efeito no ciclo hidrológico [Salati, 1979] e na composição da chuva. As grandes quantidades de óxidos de nitrogênio e enxofre emitidos, além do aerossol de sulfato, acidificam a precipitação. Valores de acidez (medidos pelo pH da precipitação) de pH = 4.6 foram observados na Amazônia durante a estação seca [Andreae, 1992], e valores de pH = 4.4 foram medidos na África [J.P. Lacaux, comunicação pessoal]. Os valores para os locais mais poluídos dos Estados Unidos apresentam pH em torno de 4.3, valor muito próximo dos observados na Amazônia e na África em épocas de queimadas. Esta acidificação atmosférica pode estar

Emissões Globais de Queimadas Queimadas versus todas as fontes

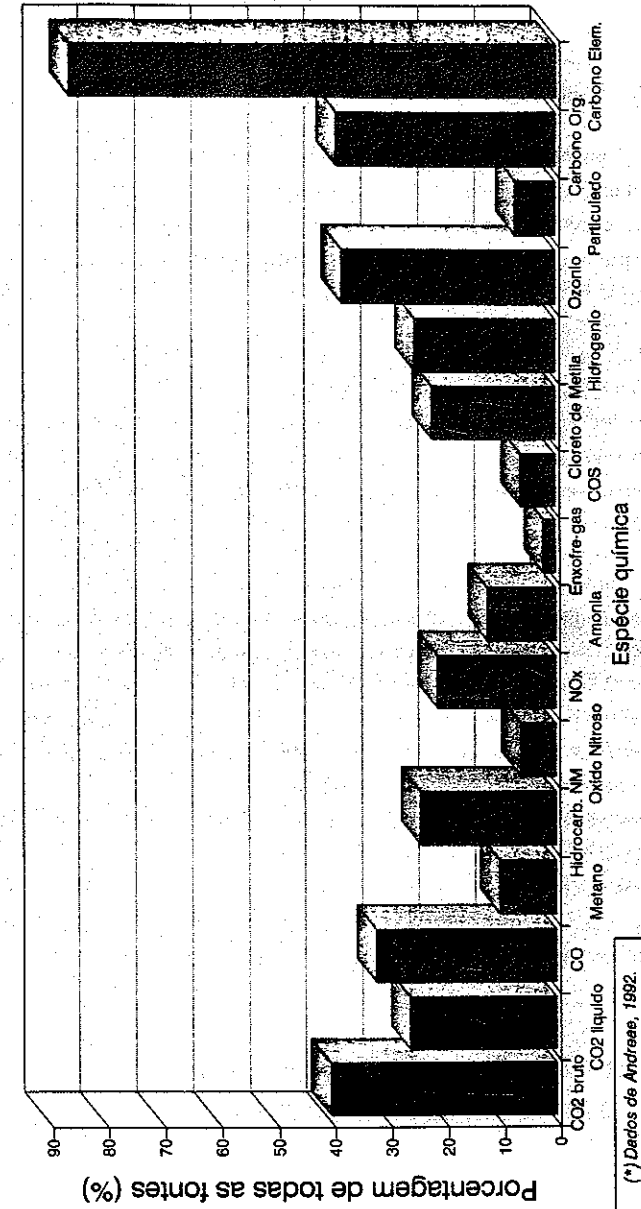


Figura 1 - Comparação das emissões de queimadas com as emissões globais (incluindo queimadas) para uma série de gases e matéria particulada. Observa-se que para CO₂, CO, NO_x e diversos outros gases, as queimadas são responsáveis globalmente por uma fração significativa das emissões totais.

alterando a acidez do solo Amazônico. Os dados são muito escassos para permitirem uma análise mais detalhada, e são necessários mais estudos sobre a acidez da precipitação na Amazônia. A maior parte desta acidez é causada por ácidos orgânicos, em vez de compostos de enxofre e nitrogênio como no hemisfério norte.

Os ciclos naturais de nutrientes essenciais para a vegetação estão sendo alterados na Amazônia como consequência das queimadas. Os ecossistemas tropicais são freqüentemente deficientes em nitrogênio, enxofre e fósforo. Quando uma área é queimada, uma parte substancial do nitrogênio e enxofre presente no ecossistema é volatilizado. Cerca de 90 % do fósforo é perdido para a atmosfera no cerrado. Somente uma fração destas emissões volta para o ecossistema [L. Coutinho, comunicação pessoal]. No caso do nitrogênio, 60 % é emitido como nitrogênio molecular, que não pode mais ser utilizado pelo ecossistema. Mudanças a longo prazo na população de micróbios no solo como efeito de acidificação da precipitação ou de alteração do fósforo e nitrogênio disponíveis podem estar ocorrendo. O equilíbrio do ecossistema Amazônico é mantido por uma complexa interação entre o ciclo hidrológico, a biosfera e a composição da atmosfera [Salati e Vose, 1984].

As emissões de queimadas também afetam a camada de ozônio estratosférico. Diversos gases traços emitidos por queimadas estão envolvidos ativamente nas complexas reações químicas heterogêneas que contribuem para o declínio das concentrações de ozônio estratosférico. Cerca de 20 % do cloro de metila provém de queimadas, e este composto é responsável pela segunda maior fonte de cloro livre envolvido na destruição da camada de ozônio [Andreae, 1992]. N_2O é emitido em queimadas e é uma fonte de nitrogênio reativo na estratosfera. O fato que a maior parte das queimadas ocorrem na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é importante. Esta região tem fortes movimentos convectivos verticais, e mesmo gases com tempo de residência pequenos podem atingir rapidamente a estratosfera. Compostos gasosos de enxofre são transportados à alta atmosfera e oxidados, formando partículas de ácido sulfúrico estratosférico que contribuem com as reações heterogêneas de destruição da camada de ozônio.

3 - A emissão de material particulado para a atmosfera pelas queimadas

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]. Em termos de matéria particulada, as emissões mundiais são ao redor de 104 Tg (1 Teragrama = 10^{12} g) por ano. 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 [Levine, 1992]. Este particulado na moda fina tem um tempo de residência atmosférica suficientemente grande para participar da circulação atmosférica global. Em termos de carbono orgânico, as queimadas em todo o mundo emitem mais de um terço das emissões globais. Para carbono elementar, as queimadas emitem cerca de 86 % do total emitido mundialmente. 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 discrepâncias nos fatores de emissão de particulados em queimadas são maiores do que para compostos gasosos. Parte da razão se dá pela grande diferença das emissões nas fases "smoldering" e "flaming" do fogo, e pela faixa de tamanho de partículas coletadas nos diversos experimentos de campo. Seiler e Crutzen [1980] sugerem um fator de emissão de 200 a 450 Tg/ano para matéria particulada total, quando os dados da Tabela 2 sugerem 104 Tg/ano de emissão por queimadas. 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%.

As partículas de aerossóis emitidas em queimadas de florestas tropicais são ativas como núcleo de condensação de nuvens, e exercem forte influência na concentração e tamanho das gotículas constituintes de nuvens [Rogers et al., 1992]. Existe a possibilidade de que um aumento do número de NCN (Núcleo de Condensação de Nuvens) cause alterações na climatologia regional da Amazônia e de outras regiões. Warner e Twomey [1967] observaram concentrações elevadas de NCN 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. Robock [1980] mostrou que as temperaturas superficiais foram reduzidas de 1.5°C a 4°C durante o dia sobre

grandes regiões dos Estados Unidos como consequência de queimadas no Canadá em Julho de 1982. 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.

4 - Medidas de emissões de material particulado em queimadas no Brasil

Dos 8 511 960 Km^2 da área do Brasil, cerca de 2 860 000 Km^2 estavam cobertos de florestas até o final da década de 60. Com a recente intensificação do desmatamento a área coberta por florestas tropicais chuvosas decresceu para cerca de 2 460 000 Km^2 [Myers, 1991]. A floresta Amazônica representa cerca de um quarto das florestas tropicais chuvosas úmidas no mundo. A Amazônia Legal cobre cerca de 5 000 000 Km^2 , e inclui áreas de cerrado e outros ecossistemas. Existem discrepâncias sérias sobre a taxa de desmatamento no Brasil. Alguns autores [Myers, 1991] sugerem uma taxa de desmatamento em 1990 de 50 000 Km^2 por ano, que representam um desaparecimento de 2 % da área de floresta por ano. Fearnside et al. [1990] estimaram uma taxa de desmatamento anual de 27 000 Km^2 , representando cerca de 1.1 % da área de florestas. Outras publicações do final da década de 80 sugerem valores ainda mais altos, com os resultados de Setzer et al., [1988] apontando para 1987 uma estimativa de área queimada anual de florestas em cerca de 81 000 Km^2 , somente nos estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso e Pará. Em 1988, os cálculos apontam para um desmatamento anual de 96 000 Km^2 nestes mesmos 4 estados, segundo os cálculos de Setzer. Estes valores podem ser comparados com os dados de 1979, de cerca de 14 800 Km^2 [Food and Agriculture Organization, 1981, Myers, 1980] mostrando um grande acréscimo na área queimada no Brasil durante a década de 80. Estas mesmas referências estimaram mundialmente uma perda anual de 75 000 Km^2 no final da década de 70. Um número elevado de estudos estimaram por diversas metodologias a área desmatada na Amazônia em diferentes épocas. Algumas referências recentes podem ser obtidos em: Myers, 1991, Binswanger, 1989, Buschbacher et al., 1987, da Cunha, 1989, Fearnside, 1989, 1990, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1988, 1989, Johns, 1988, Mahar, 1988,

Malingreau and Tucker, 1988, Setzer et al., 1988, Setzer e Pereira, 1991, Woodwell et al., 1987. Existem diferenças significativas nas metodologias aplicadas em cada trabalho, o que torna difícil a comparação entre as estimativas.

Para toda a floresta Amazônica, as perdas acumuladas de desmatamento são motivo de discordâncias entre os resultados de diversas instituições. Foi estimado que o total acumulado de desmatamento na Amazônia Brasileira era de 29 000 Km^2 em 1975 e de 125 000 Km^2 em 1980 [Food and Agriculture Organization, 1981, Myers, 1980]. No final da década de 80 diversos pesquisadores trabalhando com sensoriamento remoto [Binswanger, 1987; Fearnside, 1989, 1990; Fearnside et al., 1990; Mahar, 1988] apontaram para uma área desmatada total de cerca de 400 000 Km^2 , ou cerca de 14 % da floresta Amazônica original (2 860 000 Km^2). Dados oficiais do INPE [da Cunha, 1989] contestam estas estimativas, apontando para uma área total desmatada até 1988 de 251 000 Km^2 , o que fornece uma área percentual de 9 % da floresta Amazônica destruída até 1988. De qualquer modo, estas discrepâncias não são o ponto mais importante nesta questão, pois todas apontam para uma taxa muito alta de desmatamento, e colocam que cerca de dois terços deste desmatamento ocorreram após 1980. As emissões decorrentes deste desmatamento contribuíram significativamente para as alterações atmosféricas globais [Houghton 1991]. A possibilidade de futuras alterações regionais na Amazônia são discutidas no trabalho de Shukla et al., [1990].

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, entre elas 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 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 óptica 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'atmosphère en Forêt Equatoriale). 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 relatório.

5 - 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 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.

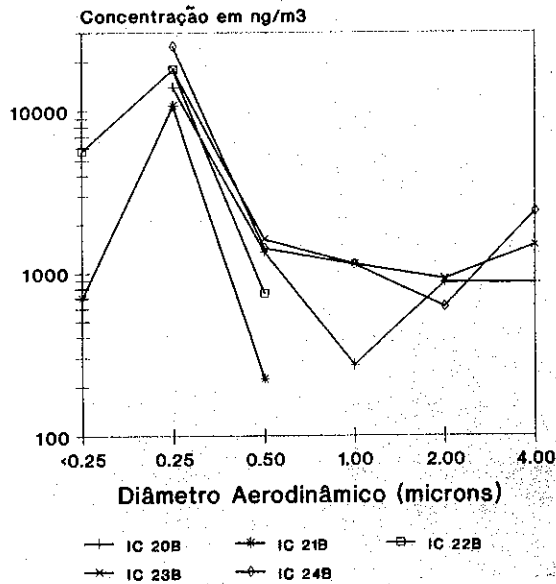
As concentrações elementares foram medidas pelo método PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) [Artaxo e Orsini, 1987]. As amostras de partículas de aerossóis

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.

6 - 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 2 apresenta a distribuição de tamanho de partículas para enxofre e fósforo. Note que o valor mais alto da concentração ocorre para partículas de $0.25\mu\text{m}$, onde ocorre o máximo de espalhamento de luz na atmosfera. Enxofre, potássio, cloro e fósforo são emitidos principalmente na fração fina do aerossol, mas existe uma fração de particulado grosso 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 influência das queimadas nos processos de formações de nuvens na Amazônia. A Figura 3 mostra a variabilidade na composição elementar para diferentes amostras coletadas em queimadas ao longo da rodovia Porto Velho - Rio Branco. 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. Esta variabilidade dificulta a obtenção de fatores de emissão para quantificar as emissões

Fósforo - Distribuição de Tamanho Queimadas 1980



Enxôfre - Distribuição de Tamanho Queimadas na Amazônia 1980

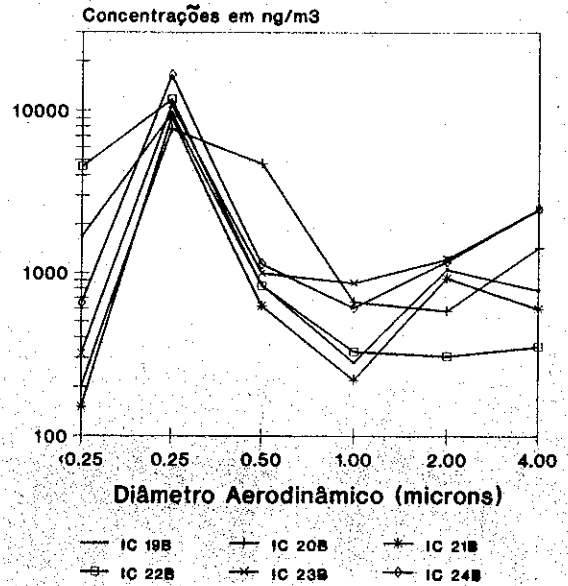


Figura 2 - Distribuição de tamanho para alguns elementos em partículas de aerossóis emitidos em queimadas no Mato Grosso e em Rondonia. Os aerossóis foram coletados em impactadores em cascata e analisados pelo método PIXE.

Queimadas na Bacia Amazônica - 1980 Variabilidade na Composição elementar

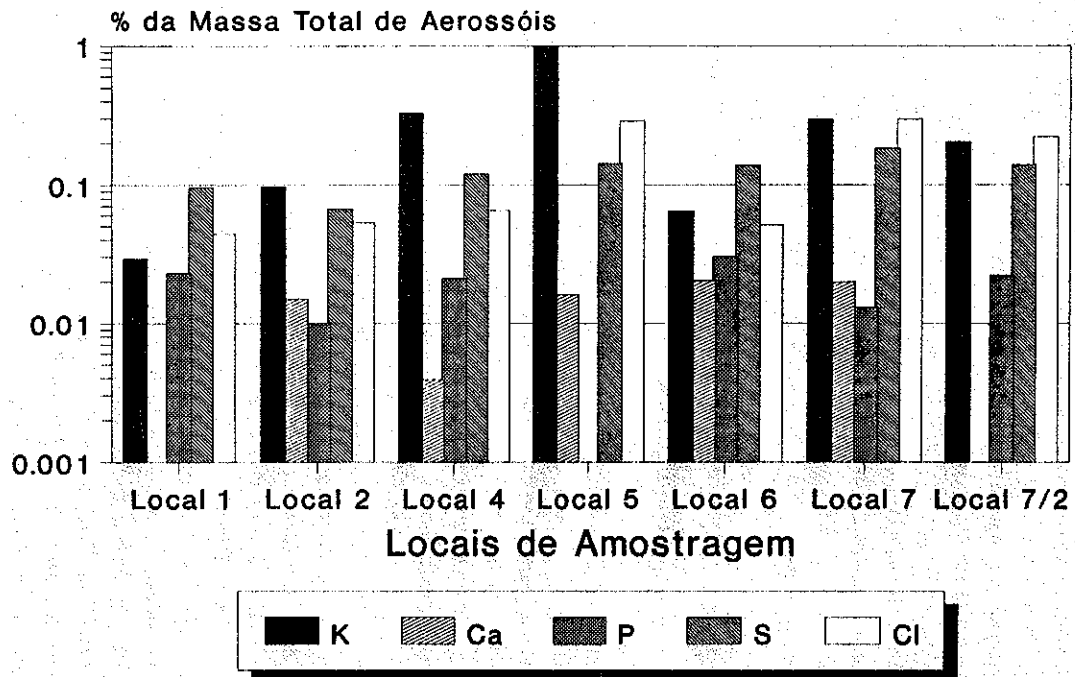


Figura 3 - Variabilidade na composição elementar para diferentes amostras coletadas em queimadas. Alguns elementos apresentam grande variabilidade, como potássio, que varia em concentração de 0.03% a 1% da massa total de partículas emitidas. Enxofre tem um perfil elementar razoavelmente constante de 0.1% na massa do particulado emitido.

elementares de queimadas. A Figura 4 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], e estas razões podem ser utilizadas para a discriminação de emissões de queimadas em relação às emissões biogênicas naturais.

7 - Resultados dos experimentos de queimadas na Amazônia em 1991

É essencial a utilização de aviões em amostragens atmosféricas de emissões de queimadas na Amazônia, devido à extensão territorial das emissões. É também importante coletarmos gases e partículas relativamente longe das fontes emissoras, para caracterizarmos uma atmosfera após a ocorrência de reações secundárias das emissões, que mostra mais adequadamente seu papel a nível global. Foi utilizado um avião Bandeirante do INPE na coleta de partículas de aerossóis em voos cobrindo grande parte do cerrado e da floresta Amazônica na primeira semana de Setembro de 1991. 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 (cerca de 600 a 900 Km), e não medidas em plumas de queimadas individuais. A Figura 5 apresenta o número de focos de queimadas detectados pelo instrumento AVHRR a bordo do satélite NOAA-11, utilizando o canal de 3.75 μm , com resolução de 1 Km. Durante a semana de coleta de amostras, 88.414 focos de incêndios foram detectados na Bacia Amazônica, e em setembro de 1991, um total de 237.599 focos individuais de queimadas foram detectados. Uma forte seca antes do período de amostragem fez com que houvessem 105 dias sem precipitação em diversas áreas da Bacia Amazônica. Fotos de satélite nos canais visível e infravermelho mostram que uma pluma não homogênea de cerca de 3 milhões de quilômetros quadrados cobria a Amazônia. Diversos aeroportos estavam fechados na época, com uma reduzida visibilidade devido à alta carga de partículas na atmosfera.

Aerossóis de queimadas e remoto Composição elementar da moda fina

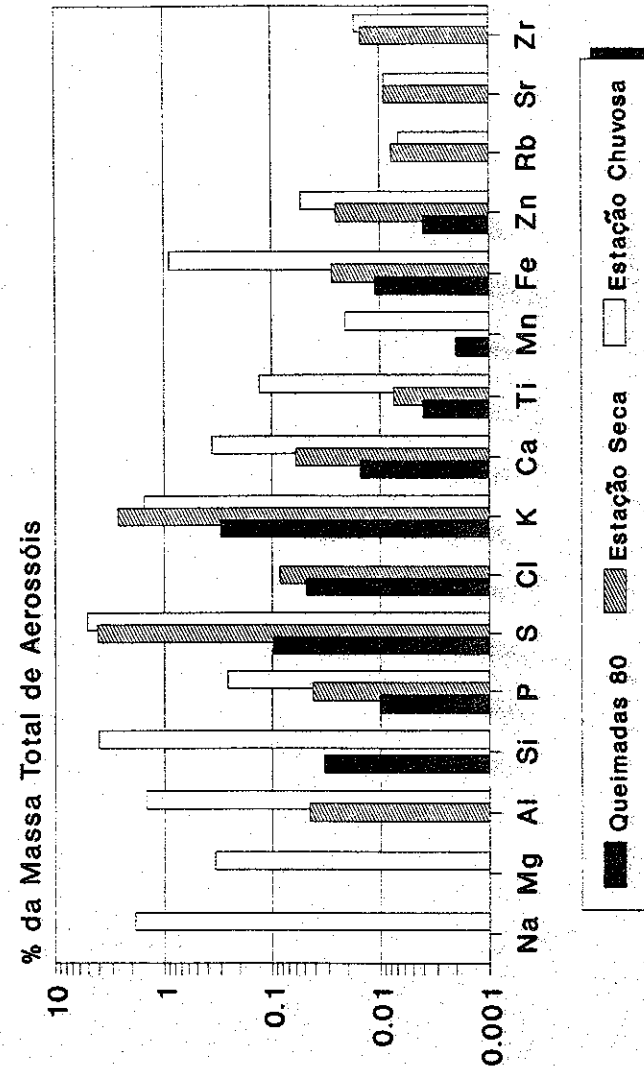


Figura 4 - Comparação da composição média de partículas de aerossóis emitidas em queimadas, comparada com a composição natural de aerossóis na Amazônia, durante as estações chuvosa e seca [Artaxo et al., 1988, 1990].

Número de Focos de Queimadas - Amazônia Estação de queimadas de 1991 - AVHRR

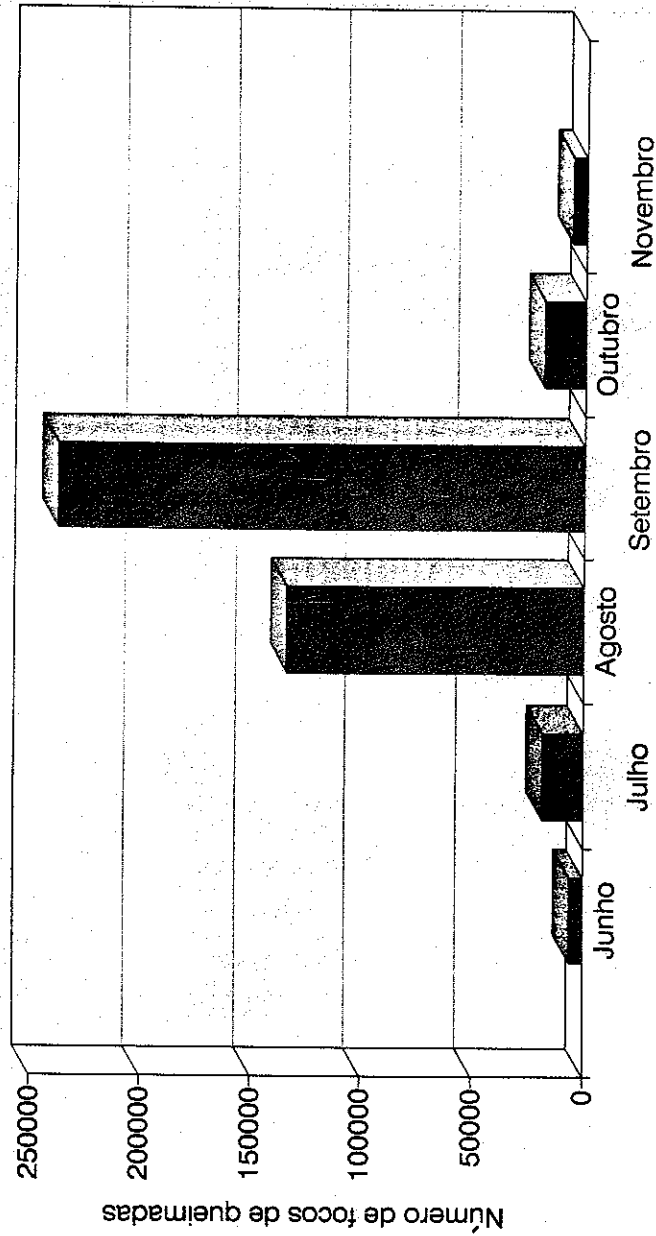


Figura 5 - Número de focos de queimadas detectados pelo instrumento AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo do satélite NOAA-11, utilizando o canal de 3.75 μm , com resolução espacial de 1 Km.

A Tabela 3 apresenta a concentração de massa de partículas, elemental, e de carbono grafitico 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 grande variabilidade, indicando a influência regional de plumas de queimadas. Nota-se na Tabela 3 a ocorrência de diversos metais pesados como Zn, Cu, Pb, Sr e Zr, associados às emissões de queimadas. A Figura 6 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, atingindo 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 legislação brasileira em vigor estipula em 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o valor máximo da concentração de particulado inalável diário, que não deve ser excedido mais que uma vez por ano [Portaria Normativa nº 348, de 14/03/90]. Embora o padrão de qualidade do ar estipula amostragens de 24 horas, e nossas amostragens foram de 3 a 4 horas, é possível inferir concentrações médias de 24 horas a partir de nossas medidas. Nossos resultados indicam que em uma extensa área da Bacia Amazônica a legislação brasileira de poluição do ar não está sendo obedecida, com valores acima do padrão máximo de qualidade do ar. Estes altos níveis de particulados estão certamente afetando a saúde da população amazônica. A visibilidade para toda a área da Bacia Amazônica era muito reduzida, em alguns lugares com visibilidade menor que 500 m. A Figura 7 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 ng/m^3 . Para regiões menos afetadas, as concentrações de enxofre foram de cerca de 500 ng/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 ng/m^3 . Em áreas urbanas do Brasil, como São Paulo e Rio de Janeiro as concentrações de enxofre são de cerca de 2000 ng/m^3 , menores do que os valores medidos em grandes regiões da Amazônia durante a época de queimadas. O problema global de acidificação atmosférica é discutido em Rodhe e Herrera, 1988, que mostram um acelerado processo de acidificação, especialmente em regiões tropicais. Nossos resultados mostram que este processo de acidificação também está ocorrendo na Amazônia Brasileira. Desde que a Amazônia e a África são as duas maiores regiões afetadas por queimadas, é importante comparar as emissões destas duas regiões. Para tanto participamos de diversos experimentos de queimadas na África em associação com laboratórios franceses e alemães. A Figura 8 apresenta uma comparação da composição elemental do particulado da moda fina medida nos experimentos na África (DECAFE 91/FOS) e na Bacia Amazônica. O perfil elemental médio das emissões de queimadas para a África e para o Brasil são em geral similares,

Tabela 3- Composição elementar de aerossóis de queimadas na Amazônia - 1991
 Massa de aerossóis, carbono elementar e concentrações elementares expressas em ng/m³.

Region	Mass	Black C.	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Pb	Br	Rb	Sr	Zr
Brasília	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
Goiânia	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	
Marabá 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	
Marabá 2B	171000	10780	502	645	2422	159.6	2596	908	3042	2892	93		53.8	759	11.1	24.9			24		27.11	
Marabá 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	
Cuiabá	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				

Queimadas na Amazônia em 1991 Concentração de partículas em suspensão

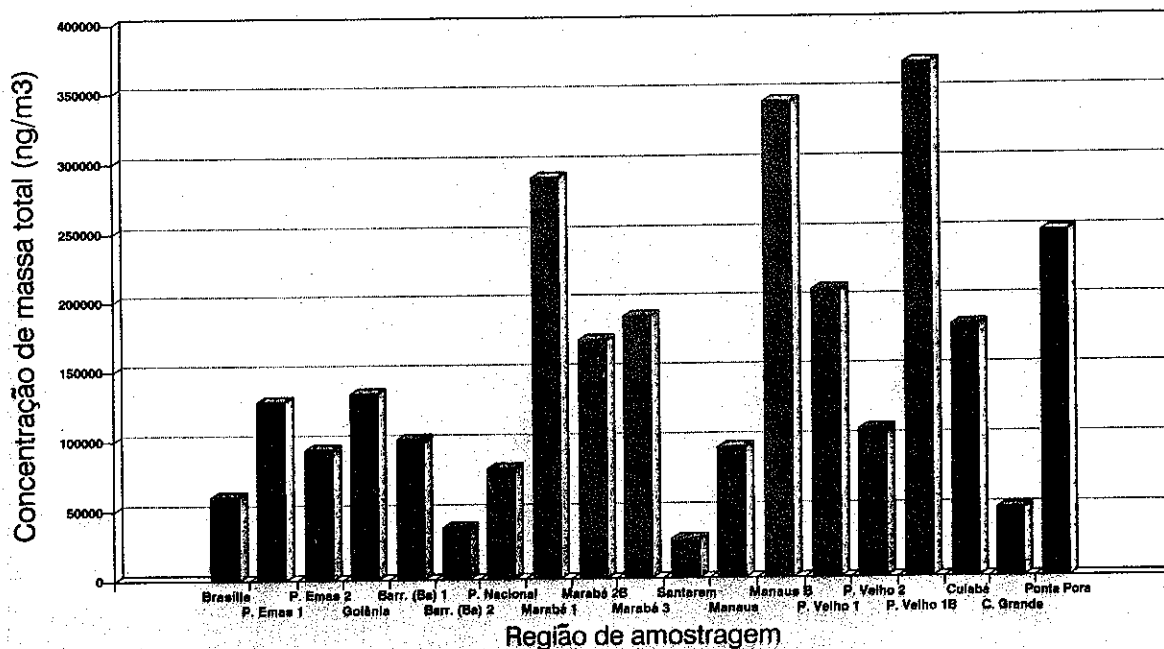


Figura 6 - Concentração de massa de partículas de aerossol em voos do avião Bandeirante na Amazônia em setembro de 1991. Estas concentrações representam médias de grandes áreas, sem impacto de plumas de queimadas individuais. As concentrações foram de cerca de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para áreas não muito afetadas por queimadas, como Manaus, atingindo concentrações maiores que 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para regiões como Marabá e Porto Velho.

Enxôfre em Queimadas na Amazônia- 1991

Aerossóis a 1000 m de altitude

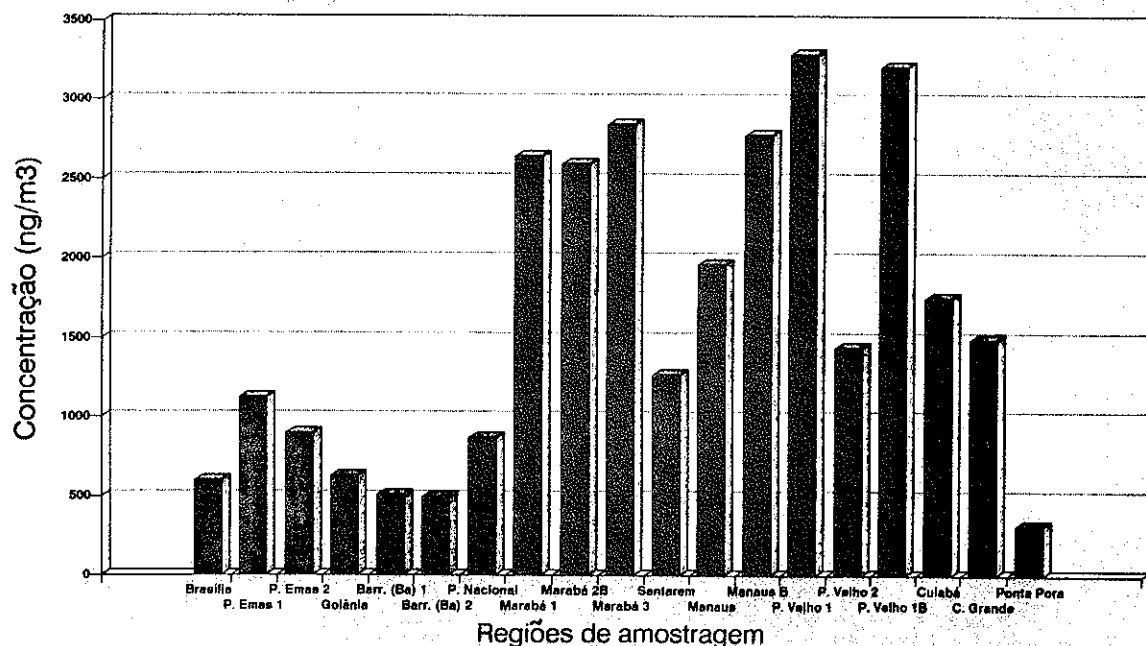


Figura 7 - Concentrações de enxofre em partículas de aerossol nos voos do avião Bandeirante na Amazônia em setembro de 1991. Para regiões com alta incidência de queimadas, as concentrações de enxofre são extremamente altas, com valores de cerca de 3000 ng/m^3 . Para regiões menos afetadas, as concentrações de enxofre foram de cerca de 500 ng/m^3 . As concentrações típicas de enxofre natural na atmosfera da Amazônia são de cerca de 200 a 300 ng/m^3 .

Composição Elementar Emissões Queimadas

África (DECAFE-91/FOS) e Amazônia 1991

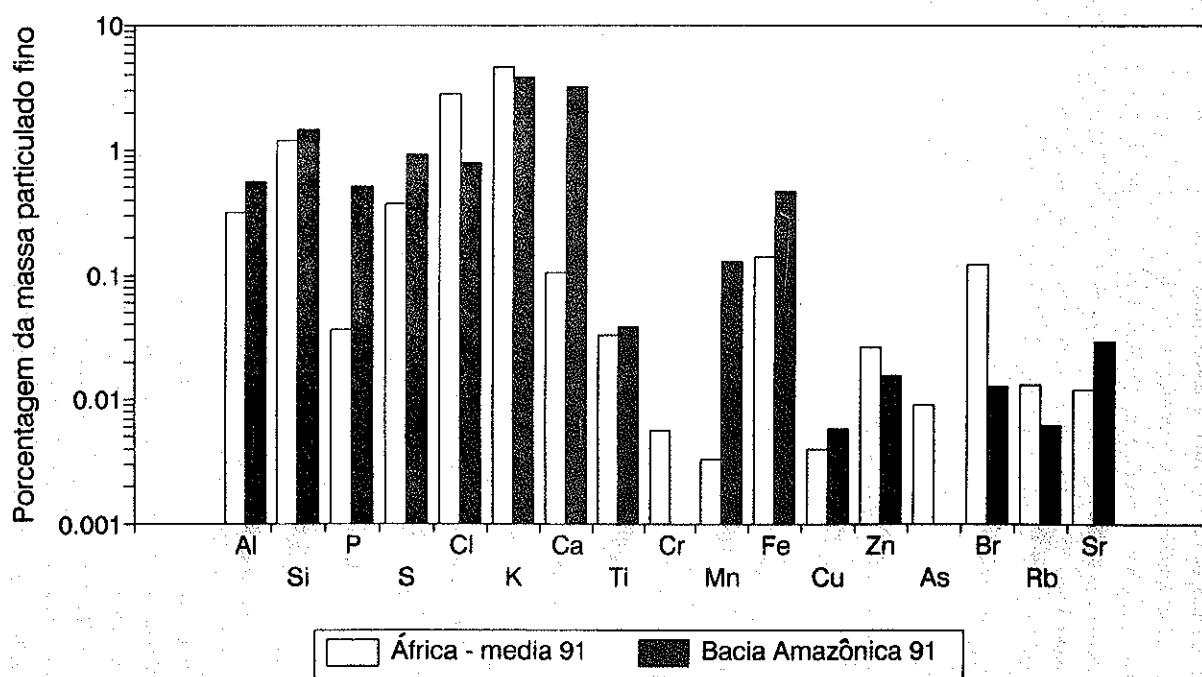


Figura 8 - Comparação da composição elementar do particulado da moda fina medida nos experimentos na África (DECAFE 91/FOS) e na Bacia Amazônica. O perfil elementar médio das emissões de queimadas para a África e para o Brasil são em geral similares.

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. Observamos 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.

8 - 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. Kirchhoff do INPE 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 as medidas de concentração da massa de particulado fino, grosso e inalável. O particulado inalável representa a soma do fino com o particulado grosso, e tem diâmetro menor que 10 μm . É claro o grande aumento de matéria particulada em suspensão na atmosfera durante o período de queimadas. De uma baixa concentração de cerca de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fora da época de queimadas, a concentração de massa de particulado inalável sobe para cerca de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante a estação de queimadas, mesmo longe das regiões mais afetadas. A legislação brasileira de meio ambiente estabelece o limite ambiental das concentrações de particulado inalável em 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para média aritmética anual e de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para o valor máximo diário (medido em 24 horas) que não deve ser excedido mais que uma vez por ano [Portaria Normativa nº 348, de 14/03/90]. Observamos em Cuiabá uma concentração média de particulado inalável de 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor próximo do padrão médio anual, em uma área distante das regiões mais diretamente afetadas pelas queimadas. Pelas medidas das amostras individuais, coletadas por períodos de 3 a 4 dias cada amostra, podemos observar que o padrão diário de qualidade do ar foi excedido diversas vezes durante a época de queimadas. A **figura 10** apresenta as concentrações de carbono grafitico para a fração fina de aerossóis coletados em Cuiabá. De um valor de cerca de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a concentração de carbono grafitico sobe para 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante a estação de queimadas, o que representa um acréscimo de um fator 7 nas concentrações de carbono grafitico na atmosfera. Este tipo de

Material Particulado em Cuiabá Monitoramento contínuo em 1990/1991

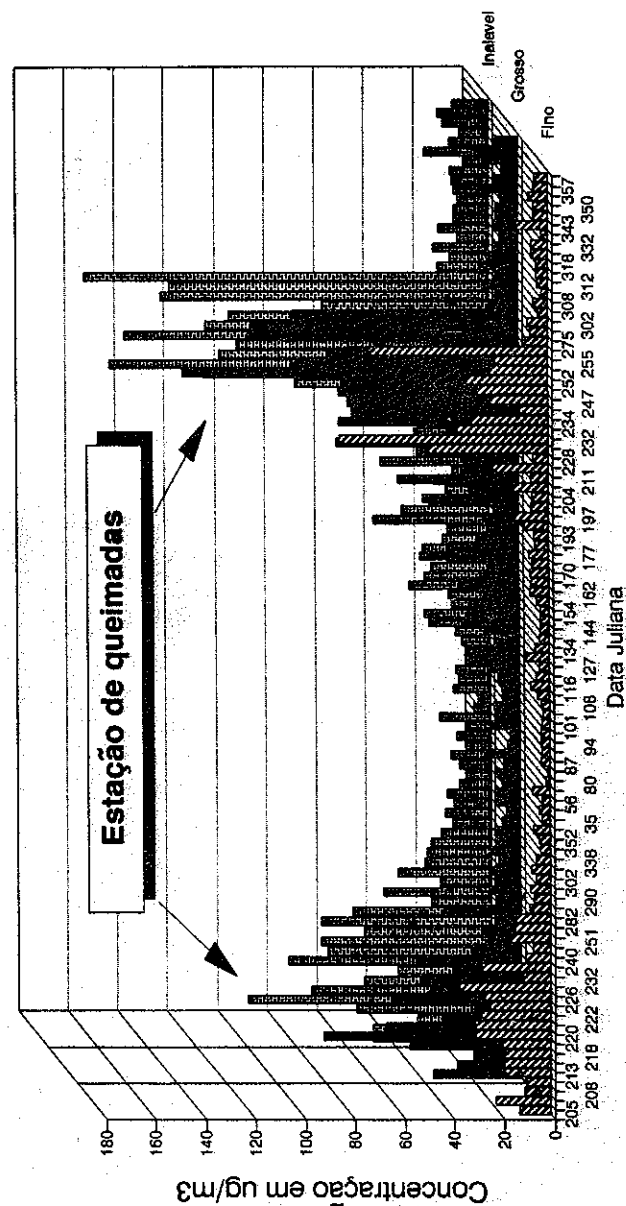


Figura 9 - Concentração de massa de particulado fino, grosso e inalável na estação de monitoramento de Cuiabá. O particulado inalável representa a soma do particulado fino com o particulado grosso.

Estação Amostradora de Cuiabá

Concentração de carbono grafítico

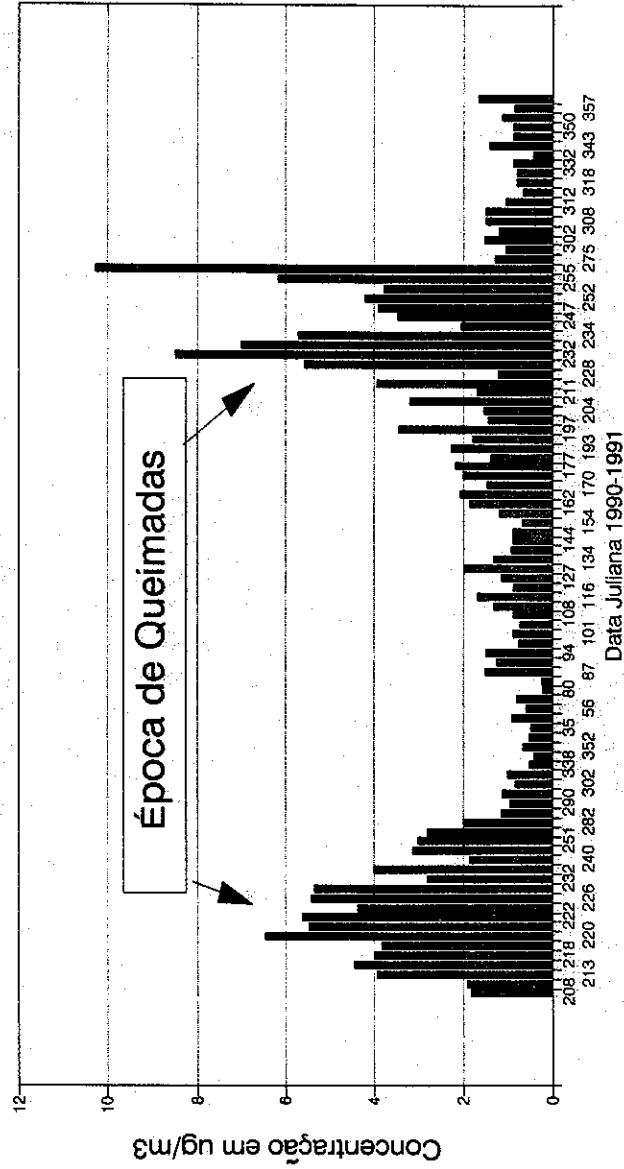


Figura 10 - Concentrações de carbono grafítico para a fração fina de aerossóis coletados na estação de monitoramento de Cuiabá. De um valor de cerca de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fora da estação de queimadas, a concentração de carbono grafítico sobe para $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante a estação de queimadas.

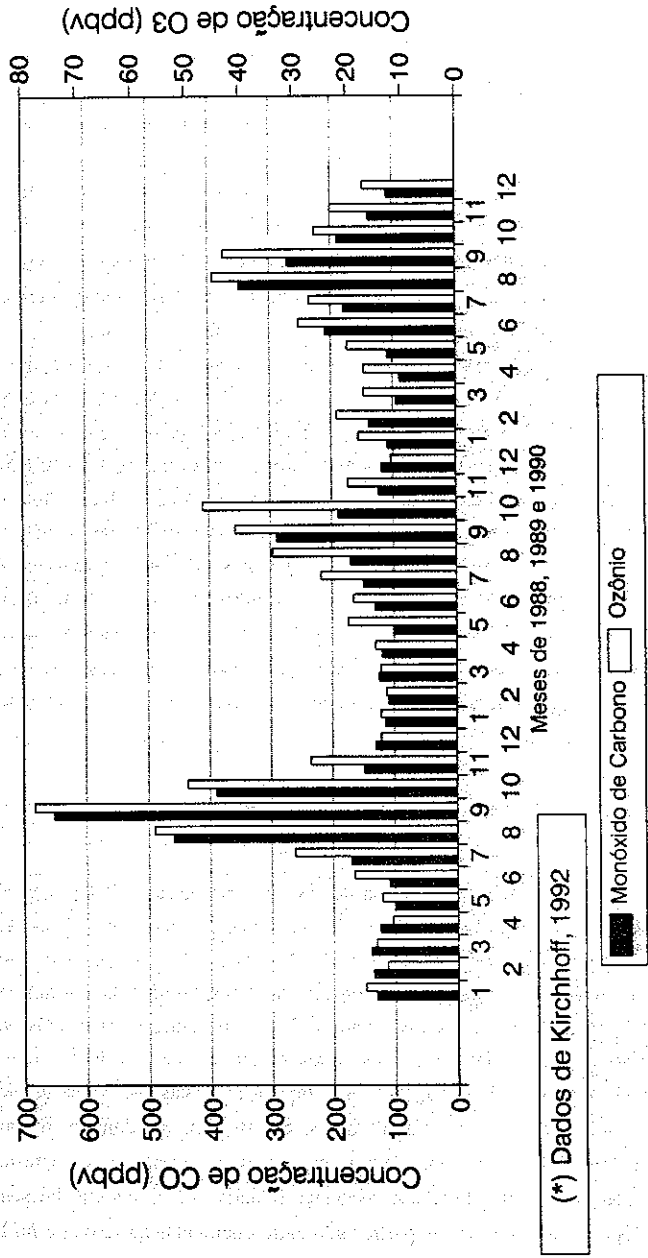
partícula tem fortes propriedades radiativas, absolvendo a radiação solar e provocando um aquecimento da baixa atmosfera, afetando a termodinâmica da atmosfera. Por estar presente na fração fina das partículas, ela pode viajar por milhares de quilômetros, entrando na circulação global da atmosfera e afetando globalmente propriedades radiativas da atmosfera. A Figura 11 apresenta as médias mensais das concentrações de CO e de O₃ para a mesma estação monitoradora de Cuiabá, operada pelo Dr. Volker Kirchhoff, do INPE, para os anos de 1988, 1989 e 1990 [Kirchhoff, 1992]. Para os resultados de CO, fora da época de queimadas, as concentrações são de cerca de 100 ppbv (partes por bilhão em volume). De agosto a novembro as concentrações médias mensais atingem valores altos, de até 600 ppbv. Para ozônio, a partir de um valor de referência de 10 ppbv, as concentrações sobem durante a época de queimadas para valores de 70 ppbv de média mensal. O padrão de qualidade do ar da legislação brasileira [Portaria Normativa n° 348, de 14/03/90] para O₃ é de 82 ppm medidos por uma hora, que não deve ser excedido mais que 1 vez por ano. Como observamos médias mensais próximos deste valor em épocas de queimadas, em uma fração alta de dias certamente tivemos violação dos padrões de qualidade do ar para O₃ em Cuiabá. Para o CO, a legislação brasileira aponta para um padrão primário de 9000 ppbv, medidos em 8 horas [Portaria Normativa n° 348, de 14/03/90]. Este padrão também deve ter sido excedido, devido aos altos valores mensais médios observados por Kirchhoff, 1992. O quadro apontado para material particulado, O₃ e CO certamente deve ser repetir para outros gases não monitorados. Eles mostram um quadro preocupante de poluição do ar em uma grande parte do território nacional durante a época de queimadas.

9 - 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, e a maioria destes nutrientes são perdidos para a biota. A concentração de material particulado inalável 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 além de outras espécies. Grandes quantidades de material carbonáceo e carbono grafítico 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

Concentrações de CO e O₃ na Amazônia

Monitoramento contínuo em Cuiabá (*)



(*) Dados de Kirchoff, 1992

Figura 11 - Concentrações de Monóxido de Carbono e de Ozônio na estação de monitoramento de Cuiabá, operada pelo Dr. Volker Kirchoff, do INPE. Observa-se claramente um aumento significativo das concentrações de CO e de O₃ de Agosto a Novembro. [Dados obtidos de Kirchoff, 1992].

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 emissões tem o potencial de alterar os fluxos naturais de nutrientes essenciais para a manutenção do ecossistema Amazônico. A maioria das partículas emitidas são solúveis em água e podem ser ativas como núcleo de condensação de nuvens, tendo o potencial de alterar os mecanismos de formação de nuvens na bacia Amazônica. Resultados de medidas de CO e O₃ realizadas pelo INPE mostram valores altos para a concentração destes gases na atmosfera Amazônica. A legislação brasileira de poluição do ar está sendo violada na Amazônia durante a época de queimadas. As medidas mostram um quadro preocupante de poluição do ar na Amazonia durante a época de queimadas.

10 - Agradecimentos

Agradecemos a todos os membros do Grupo de Estudos de Poluição do Ar (GEPA) do IFUSP; em particular a Alcides Camargo Ribeiro, Ana Lucia Loureiro e Tarsis Germano pelo suporte nas amostragens e análises. Agradecemos também 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, e por um convênio com o IBAMA.

11 - Referências

- Andreae, M.O., 1983. Soot Carbon and Excess Fine Potassium: Long-Range Transport of Combustion Derived Aerosols, *Science*, **220**, 1148-1151.
- Andreae, M.O. et al., 1988. Biomass burning emissions and associated haze layers over Amazonia, *Journal of Geophysical Research*, **93**, D2, 1509-1527.
- Andreae, M.O., Biomass Burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel Levine, 3-21, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA, 1992.
- Artaxo, P., and C. Orsini, 1987. PIXE and receptor models applied to remote aerosol source apportionment in Brazil, *Nuclear Instruments and Methods*, **B22**, 259-263.
- Artaxo, P., H. Storms, F. Bruynseels, R. Van Grieken, and W. Maenhaut, Composition and sources of aerosols from the Amazon Basin, *Journal of Geophysical Research*, **93**, 1605-1615, 1988.
- Artaxo, P., W. Maenhaut, Trace Element concentrations and size distribution of biogenic aerosols from the Amazon Basin during the wet season, *Nuclear Instruments and Methods*, **B49**, 366-371, 1990.
- Artaxo, P., W. Maenhaut, H. Storms, and R. Van Grieken, Aerosol characteristics and sources for the Amazon Basin during the wet season, *Journal of Geophysical Research*, **95**, D10, 16971-16985, 1990.
- Artaxo, P., R. Van Grieken, F. Watt, and M. Jaksic, 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, 1990b.
- Artaxo, P., M.A. Yamasoe, J.V. Martins, S. Kocinas, S. Carvalho, Case study of atmospheric measurements in Brazil: aerosol emissions from the Amazon Basin biomass burning. Em impressão nos anais do "*Dahlem Workshop on Fire in the Environment: Its ecological, climatic and atmospheric chemical importance*", 15 a 20 de março de 1992, Berlin, Alemanha, 1992.
- Binswanger, H.P., Brazilian policies that encourage deforestation in the Amazon, Environmental Department, The World Bank, Washington, D.C., USA, 1989.

- Buschbacher, R.J., Uhl, C., e Serrão, E.A.S., Largescale development in Eastern Amazonia, in: C.F. Jordan (ed.), *Amazonian Rainforests: ecosystem disturbance and recovery*, Springer Verlag, New York, USA, 1987.
- Carvalho, S., P. Artaxo, M.A. Yamasoe, S. Kocinas, J.V. Martins, Trace elements in atmospheric aerosol from background regions and biomass burning from the Amazon basin. Em impressão nos anais do "*International Symposium on Applications of Isotopes and Radiation in Conservation of the Environment*", AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica, 9 a 13 de março de 1992, Karlsruhe, Alemanha, 1992.
- 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.
- da Cunha, R.P., deforestation estimates through remote sensing: the state of the art in the Legal Amazônia, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 1989.
- 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, *Atmospheric Environment*, **19**, 1535-1543.
- Fearnside, P.M., Forest Management in Amazonia: the need for new criteria in evaluating economic development options, *Forest Ecology and Management*, **27**, 61-79, 1989.
- Fearnside, P.M., Deforestation in Brazilian Amazonia, in: G.M. Woodwell (ed.) *The earth in transition: patterns and processes of biotic impoverishment*, Cambridge University Press, New York, USA, pp. 211-238, 1990.
- Fearnside, P.M., Tardin, A.T., e Filho, L.G.M., Deforestation rate in Brazilian Amazonia, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 1990.
- Fearnside, P.M., The rate and extent of deforestation in Brazilian Amazonia, *Environmental Conservation*, **17**, 213-226, 1990.
- 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.
- Hao, W.M., M.H. Liu, P.J. Crutzen, 1990, estimates of annual and regional release of CO₂ and other trace gases to the atmosphere from fires in the tropics, based on FAO statistics

for the period 1975-1980. In: *Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges*, editado por J. G. Goldammer. *Ecological Studies* **84**, 440-462, Springer-Verlag, Berlin.

Harriss et al., 1988. The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE-2A): Dry Season 1985, *Journal of Geophysical Research*, **93**, 1351-1360.

Hecht, S., e A. Cockburn, *The fate of the forest: developers, destroyers and defenders of the Amazon*, Verso Publishers, Londres, Inglaterra, 1989.

Houghton, R.A., R. D. Boone, J.M. Melillo, C.A. Palm, G.M. Woodwell, N.Meyers, B. Moore III, D.L. Skole, 1985. Net flux of carbon dioxide from tropical forest in 1980. *Nature*, **316**, 617-620, 1985.

Houghton, R.A., Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide, *Climatic Change* **19**, 99-118, 1991.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Relatório de atividades do projeto IBDF/INPE "SEQE" ano 1987, Ministério de Ciência e Tecnologia, Brasil, 1988.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avaliação da alteração da cobertura florestal na Amazônia legal utilizando sensoriamento remoto orbital, São José dos Campos, SP, Brasil, 1989.

J. Jäger e H.L. Ferguson, Climate change: science, impacts and policy, Proceedings of the Second World Climate Conference, Cambridge University Press, Cambridge, Mass. USA, 1992.

Johns, A.D., Economic development and wildlife conservation in Brazilian Amazonia, *Ambio*, **17**, 302-306, 1988.

Kaufman, Y.J., A. Setzer, D. Ward, D. Tanre, B.N. Holben, P. Menzel, M.C. Pereira, and R. Rasmussen, Biomass burning airborne and spaceborne experiment in the Amazonas (BASE-A), Submetido à publicação em *Journal of Geophysical Research*, 1992.

Kirchhoff, V.W.J.H., Biomass burning in the Brazilian Amazon region: Measurements of CO and O₃, In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel S. Levine, 106-111, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA, 1992.

Lashof, D.A., The contribution of biomass burning to global warming: An integrated assessment, In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel S. Levine, 441-444, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA, 1992.

Levine, J.S., 1992, Introduction: Global biomass burning: atmospheric, climatic and biospheric implications. In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel S. Levine, 25-30, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA.

Mahar, D.J., Government policies and deforestation in Brazil's Amazon region, Environmental Department, The World Bank, Washington, D.C., USA, 1988.

Malingreau, J-P, e C.J. Tucker, Large-scale deforestation in the southern Amazon basin of Brazil, *Ambio* **17**, 49-55, 1988.

Myers, N., Conversion of tropical moist forests, Report to the National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1980.

Myers, N., Tropical forests: present status and future outlook, *Climatic Change* **19**: 3-32, 1991.

Pyne S. J., Sky of ash, earth of ash: a brief history of fire in the United States, In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel S. Levine, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA, 504-512, 1992.

Radke, L.F., D.A. Hegg, J.H. Lyons, C.A. Brock, P.V. Hobbs, R. Weis, and R. Rasmussen, 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, 1988.

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, Particulate and trace gas emission from large biomass fires in North America, Chapman Conference on Biomass Burning, Williamsburg, VA, USA, 1990.

Rodhe, H., R. Herrera, (eds.) *Acidification in tropical countries*, John Wiley and Sons, Chichester, Inglaterra, 1988.

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.

Salati, E., e P.B. Vose, Amazon basin: a system in equilibrium, *Science* **225**, 129-138, 1984.

Salati, E., The forest and the hydrological cycle, in: R.E. Dickinson (ed.) *The Geophisiology of Amazonia. Vegetation and climate interactions*, John Wiley & Sons, New York, pp. 273-296, 1979.

Salati, E., e C.A. Nobre, Possible climatic impacts of tropical deforestation, *Climatic Change* **19**, 177-196, 1991.

Salati, E., R.L. Vitória, L.A. Martinelli, e J.E. Richey, Forests: their role in global change, with special reference to the Brazilian Amazon, in: *Climate change: science, impacts and policy, Proceedings of the Second World Climate Conference*, eds. J. Jäger, H.L. Ferguson, Cambridge University Press, Cambridge, Mass. USA, pp. 391-396, 1992.

Seiler, W., P.J. Crutzen, Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning, *Climatic Change*, **2**, 207-247, 1980.

Setzer, A.W., e M.C. Pereira, Detection of large biomass burning in the Amazon with satellite images, *EOS transactions AGU* **67**, 247, 1986.

Setzer, A.W., M.C. Pereira, A.C. Pereira, e S.A.O. Almeida, Relatório de atividades do projeto IBDF-INPE "SEQE"- ano 1987, INPE, São José dos Campos, SP, 1988.

Setzer, A.W., M.C. Pereira, Relatório de atividades do projeto "Sensoriamento de Queimadas por Satélite - "SEQE"- ano 1988, 56 pp., INPE, São José dos Campos, SP, 1989.

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

Setzer, A.W., V.W.J.H. Kirchhoff, M.C. Pereira, Ozone concentrations in the Brazilian Amazonia during BASE-A, In: *Global Biomass Burning: Atmospheric climatic and biospheric implications*, ed. Joel S. Levine, 112-114, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA, 1992.

Schule, W., Landscapes and climate in prehistory: interactions of wildlife, man and fire. In: *Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges*, editado por J. Goldammer, *Ecological Studies* **84**, 273-318, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

Shukla, J., C. Nobre, P. Sellers, Amazon deforestation and climate change, *Science* **247**, 1322-1325, 1990.

Ward, D., 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), 1990.

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. A. Rasmussen, 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, pp. 394-402, 1992.

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 *Journal of Geophysical Research*.

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.

Woodwell, G.M., R.A. Houghton, T.A. Stone, R.F. Nelson, W. Kovalic, Deforestation in the tropics: new measurements in the Amazon basin using Landsat and NOAA Advanced Very High Resolution Radiometry Imagery, *Journal of Geophysical Research* **92**, 2157-2163, 1987.

Legenda das figuras

Figura 1 - Comparação das emissões de queimadas com as emissões globais (incluindo queimadas) para uma série de gases e matéria particulada. Observa-se que para CO_2 , CO , NO_x e diversos outros gases, as queimadas são responsáveis globalmente por uma fração significativa das emissões totais.

Figura 2 - Distribuição de tamanho para alguns elementos em partículas de aerossóis emitidos em queimadas em Rondônia. Note que o valor mais alto da concentração ocorre para partículas de $0.25 \mu\text{m}$, onde ocorre o máximo de espalhamento de luz na atmosfera. Enxofre, potássio, cloro e fósforo são emitidos principalmente na fração fina do aerossol, mas existe uma fração de particulado grosso que também é emitida, especialmente para potássio.

Figura 3 - 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.

Figura 4 - Comparação da composição elementar 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].

Figura 5 - Número de focos de queimadas detectados pelo instrumento AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo do satélite NOAA-11, utilizando o canal de $3.75 \mu\text{m}$, com resolução espacial de 1 Km. Dados de Alberto Setzer.

Figura 6 - Concentração de massa de partículas de aerossol em vôos do avião Bandeirante na Amazônia em setembro de 1991. Estas concentrações representam médias de grandes áreas, sem impacto direto de plumas de queimadas individuais. As concentrações foram de cerca de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para áreas não muito afetadas por queimadas, como Manaus, atingindo concentrações maiores que $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para regiões como Marabá e Porto Velho.

Figura 7 - Concentrações de enxofre em partículas de aerossol nos voos do avião Bandeirante na Amazônia em setembro de 1991. 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 $500 \text{ ng}/\text{m}^3$. As concentrações típicas de enxofre natural na atmosfera da Amazônia são de cerca de 200 a $300 \text{ ng}/\text{m}^3$.

Figura 8 - 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.

Figura 9 - Concentração de massa de particulado fino, grosso e inalável na estação de monitoramento de Cuiabá. O particulado inalável representa a soma do particulado fino com o particulado grosso.

Figura 10 - Concentrações de carbono gráfico para a fração fina de aerossóis coletados na estação de monitoramento de Cuiabá. De um valor de cerca de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fora da estação de queimadas, a concentração de carbono gráfico sobe para $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante a estação de queimadas.

Figura 11 - Concentrações de Monóxido de Carbono e de Ozônio na estação de monitoramento de Cuiabá, operada pelo Dr. Volker Kirchhoff, do INPE. Observa-se claramente um aumento significativo das concentrações de CO e de O_3 de Agosto a Novembro. [Dados obtidos de Kirchhoff, 1992].