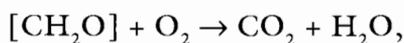


# Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul

SAULO R. FREITAS, KARLA M. LONGO,  
M. A. F. SILVA DIAS e P. L. SILVA DIAS

## Queimadas e seus efeitos climáticos e biogeoquímicos

**U**MA QUEIMADA é um processo de queima de biomassa, que pode ocorrer por razões naturais ou por iniciativa humana. A queima de matéria orgânica produz primariamente água e dióxido de carbono, de acordo com a seguinte reação química:



onde o elemento  $[\text{CH}_2\text{O}]$  representa a composição média da biomassa. Além destes elementos, também são produzidas outras espécies químicas, tais como monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarbonetos, e partículas de aerossóis (Andreae, 1991), os quais são incorporados à atmosfera, sendo a ela misturados e transportados.

De acordo com Andreae (1991), a maior parte das queimadas ocorre nos países em desenvolvimento nos trópicos. Sendo estes, responsáveis por 87% das emissões globais produzidas por queimadas, estimadas em 3940 Tg[C]/ano. Durante a estação seca nas regiões Amazônica e Brasil Central, compreendida entre os meses de julho a outubro ocorrem, em grande quantidade, queimadas antropogênicas em áreas de Cerrado e de Floresta Tropical (Coutinho *et al.* 2002). A concentração de material particulado inalável e gases traços, medidos ao nível da superfície na região tropical do Brasil, apresentam forte sazonalidade, com máximos durante este período do ano. Estudos sobre a composição elementar das partículas de aerossol na região têm mostrado que, durante a estação seca, a emissão de carbono grafítico ('black-carbon'<sup>1</sup>), o qual se sabe ser majoritariamente fuligem proveniente da combustão, está associada a elementos conhecidos como traçadores de emissões de queimadas como, por exemplo, S, K, Cl, Ca e Zn (Artaxo *et al.*, 1993, 2002; Echalar *et al.*, 1998). Artaxo *et al.* (2002) reportam para a estação seca na região de Rondônia, valores máximos de concentração de aerossol de até 250 mg m<sup>-3</sup> e de até 8 ppm e 16 ppb para CO e NO<sub>2</sub>, respectivamente. Durante a estação úmida, segundo estes autores, as concentrações típicas para estas espécies são 2,9 mg m<sup>-3</sup>, 0,15 ppm e 0,67 ppb, respectivamente.

As emissões de queimadas possuem vários efeitos importantes no equilíbrio climático e biogeoquímico do planeta. Além do  $\text{CO}_2$ , as emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) e  $\text{NO}_x$ , também contribuem para aumentar o efeito estufa na atmosfera. As emissões de metano são da ordem de 1% da quantidade de  $\text{CO}_2$ , porém o efeito radiativo da molécula de  $\text{CH}_4$  é 25 vezes maior que a de  $\text{CO}_2$  (Houghton, 1990). No caso do  $\text{CO}_2$ , a emissão durante a queimada pode ser reincorporada à vegetação no seu restabelecimento no ciclo anual, porém em situação de desflorestamento, isto pode não ocorrer, pois a recomposição da floresta nativa, se houver, toma um longo tempo (da ordem de várias décadas), provocando uma emissão líquida à atmosfera. Na presença de radiação solar e altas concentrações de  $\text{NO}_x$ , a oxidação de CO e hidrocarbonetos é acompanhada de formação de ozônio ( $\text{O}_3$ ), outro gás de efeito estufa. As partículas de aerossol emitidas pelas queimadas, com um tempo de residência na atmosfera da ordem de uma semana (Kaufman, 1995), durante a estação seca, compõem uma espessa camada de fumaça sobre as regiões Norte e Centro Oeste do Brasil. As altas temperaturas envolvidas na fase de chamas da combustão e a ocorrência de circulações associadas às nuvens devidas, por exemplo, à entrada de frentes frias provenientes da região sul do Brasil, favorecem o movimento convectivo ascendente e podem ser responsáveis pela elevação destes poluentes até a troposfera, onde podem ser transportados para regiões distantes das fontes emissoras. Este transporte resulta em uma distribuição espacial de fumaça sobre uma extensa área, ao redor de 4-5 milhões de  $\text{km}^2$  (vide a Figura 1), em muito superior à área onde estão concentradas as queimadas. Os efeitos destas emissões excedem, portanto, a escala local e afetam regionalmente toda a composição e propriedades físicas e químicas da atmosfera na América do Sul. Em escalas regional e global, estas emissões de queimadas alteram o balanço radiativo da atmosfera, através dos efeitos diretos das partículas de aerossóis ao refletir e espalhar a radiação solar de volta para o espaço, reduzindo a quantidade absorvida pela superfície terrestre, e ao absorver radiação solar, aquecendo a atmosfera. Jacobson (2001) sugere que o aquecimento atmosférico devido aos aerossóis do tipo 'black carbon' poderia balancear o efeito de resfriamento associado a outros tipos (sulfatos), e que a forçante radiativa direta deste pode exceder aquele associado ao  $\text{CH}_4$ . Desta forma, partículas de aerossol, produto de processos de combustão incompleta, estariam atrás somente do  $\text{CO}_2$  na contribuição para o aquecimento radiativo da atmosfera.

O balanço de radiação e o ciclo hidrológico também podem ser afetados indiretamente pelas emissões de queimadas, via alterações na microfísica e na dinâmica de formação de nuvens (Kaufman, 1995), em função de uma maior disponibilidade de núcleos de condensação de nuvem e gelo na atmosfera, os quais promovem mudanças no espectro de gotas de nuvem (Andreae *et al.*, 2004; Koren *et al.*, 2004, Rosenfeld, 1999, Cotton e Pielke, 1996) e estabilização termodinâmica (Longo *et al.*, 2004). O aumento da concentração de partículas de aerossol impõe a produção de gotas de nuvem menores e em maior número, produzindo dois efeitos: primeiro, a maior quantidade de gotas reflete mais radia-

ção solar de volta para o espaço (portanto resfriando a atmosfera), e, segundo, o tamanho menor será menos favorável para a produção de chuva, pois gotículas muito pequenas não tendem a se aglutinarem para formar as grandes gotas que caem como chuva. Por outro lado, a estabilização termodinâmica imposta pela interação direta das partículas de aerossol com a radiação solar (diminui o aquecimento na baixa atmosfera por redução da radiação solar), restringe a ascensão de células convectivas geradas próximo à superfície e, assim, inibe a formação de nuvens. Este conjunto de fatores sugere que os efeitos das queimadas podem extrapolar a escala local e afetar, de maneira importante, o ciclo hidrológico numa escala regional e o padrão da redistribuição planetária de energia dos trópicos para as latitudes médias e altas.

Além disto, o transporte destas emissões de queimadas para regiões distantes das fontes emissoras e a deposição seca e úmida durante esse transporte podem, ao longo do tempo, produzir alterações nos ciclos biogeoquímicos naturais e na dinâmica de nutrientes tanto das regiões emissoras quanto das regiões receptoras. Também é necessário estudar o potencial efeito na biota marinha devido ao impacto da deposição dos produtos de queimadas e da redução da radiação solar na superfície nas áreas oceânicas vizinhas.

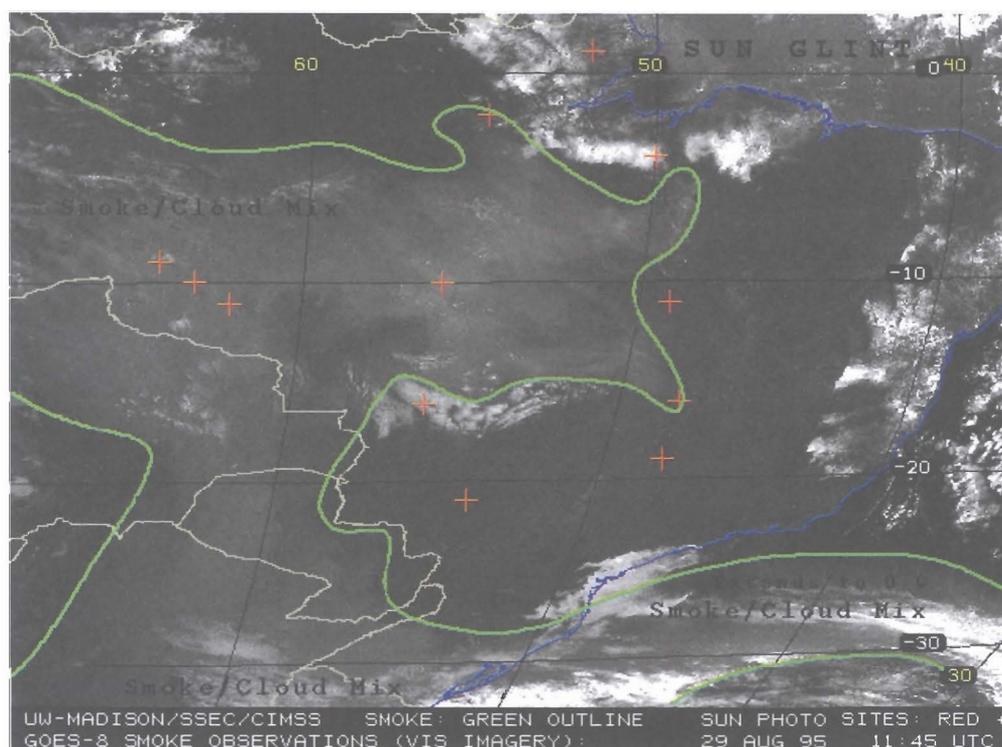


Figura 1– Imagem do satélite GOES-8, no canal visível, do dia 29 de agosto de 1995 às 11:45 UTC, mostrando fumaça sobre a América do Sul. A linha de contorno verde identifica a cobertura de fumaça. Notam-se os principais corredores de exportação continental de fumaça, um mais ao norte e para o oceano Pacífico, o outro para sudeste em direção ao oceano Atlântico e uma exportação direta para o sul em direção à Argentina.

Uma das principais formas de estudar e avaliar as mudanças climáticas induzidas por emissões de queimadas e outras intervenções antropogênicas é através de projeções futuras do estado atmosférico incluindo estas perturbações. Estas projeções são obtidas com modelos matemáticos resolvidos numericamente em supercomputadores. Assim, para se obter resultados que sejam fisicamente consistentes, os modelos atmosféricos devem corretamente incorporar as emissões de queimadas e tratar apropriadamente o transporte e a interação destas emissões com o ambiente.

## **Queimadas nas regiões de pastagem, cerrado e floresta tropical da América do Sul**

### **Descrição de uma queimada**

A evolução de uma queimada é descrita em quatro estágios: ignição, chamas, brasas e extinção. A ignição da biomassa depende do seu tipo e de sua umidade e de fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e vento. O estágio de chamas inicia-se com um processo pirolítico, durante o qual as elevadas temperaturas provocam uma ruptura das moléculas constituintes da biomassa. Componentes de alto peso molecular são decompostos em compostos de peso molecular mais baixo, tais como o carvão e o alcatrão, os quais constituem fonte primária de energia para as chamas, e finalmente em compostos de natureza gasosa. A temperatura pode chegar a 1800 K, produzindo carvão e liberando, principalmente, vapor d'água,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$ . Com a diminuição das condições necessárias para a manutenção das chamas, a queima entra em um estágio mais 'frio', denominado de fase de brasas. Quando a temperatura no interior da chama está abaixo de 1000 K, reduz-se drasticamente a produção de  $\text{CO}_2$ , há uma grande emissão de compostos incompletamente oxidados, como o  $\text{CO}$ , além de uma rápida formação de partículas e acreção de partículas orgânicas de carbono. Este estágio é o responsável pela emissão da maior parte do material particulado (Ward *et al.*, 1992). A extinção pode ser alcançada devido a vários fatores, além da diminuição da quantidade de biomassa disponível. Fatores ambientais causadores seriam, por exemplo, o resfriamento convectivo devido ao entranhamento de ar mais frio, o resfriamento radiativo e o baixo suprimento de oxigênio em relação à densidade e tamanho da biomassa. A evolução seguida pela queima e suas emissões dependem de vários fatores. Um dos mais importantes é o conteúdo de água na biomassa, uma vez que a energia necessária para vaporizar a água líquida é extraída da energia produzida durante a queima. A quantidade de água pode determinar qual fase, de chamas ou de brasas, será mais significativa, definindo, por exemplo, as proporções de  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$  emitidos. O clima local tem grande relevância na determinação da quantidade de biomassa disponível para a queima. O tempo local, através da temperatura, precipitação e umidade e o vento, determinam condições necessárias para a ocorrência do fogo e seu comportamento, no que refere à razão entre a combustão da fase de chamas para a fase de brasas.

De acordo com Lobert e Warnatz, (1993), a fase de brasas é a que apresenta maior número de diferentes compostos emitidos, enquanto que a fase de chamas apresenta maiores quantidades de material emitido. A principal emissão acontece na forma de CO<sub>2</sub>, produzido principalmente na fase de chamas. As emissões deste composto representam em média cerca de 80% a 85% da massa total de carbono queimado, podendo, no entanto, variar de 50% a 99%. A emissão de carbono na forma de CO representa em média 7%, podendo variar entre 2% a 15%. Em terceiro lugar, aparecem os hidrocarbonetos com médias em torno de 2% a 3%, com CH<sub>4</sub> representando cerca de 0,5%. O material particulado é emitido em ambas as fases, sendo sua composição elementar e distribuição de tamanho dependentes do estágio em que foi emitido.

### **Estimativas de emissões de queimadas em regiões de cerrado e floresta tropical da América do Sul**

Ward *et al.*, (1992) apresentam dados dos principais compostos emitidos em queimadas no cerrado do Brasil central e na floresta amazônica brasileira. As estimativas de biomassa acima do solo (kg m<sup>-2</sup>) e fator de combustão (fração de biomassa efetivamente queimada) para as quatro formas de cerrado são 0,71 e 100%, 0,73 e 97%, 0,86 e 72% e 1,00 e 84%, respectivamente. Para floresta tropical, os valores são 12,14 e 43% e 29,24 e 52% para florestas secundárias e primárias, respectivamente. No entanto, estimativas de biomassa para diversos sítios da região Amazônica apresentam grande variabilidade, constituindo uma das principais fontes de incerteza para as estimativas de fluxo de carbono associados à mudança no uso do solo (Houghton *et al.*, 2001).

Utilizando medidas de concentração de CO<sub>2</sub>, CO, NO e material particulado com diâmetro menor que 2,5 mm (MP<sub>2,5</sub>), Ward *et al.* estimaram fatores de emissão para cada um destes compostos. O fator de emissão ( $E_p$ ) é um número que fornece diretamente a quantidade de emissão de um dado composto químico em função da quantidade de biomassa queimada. O cerrado em geral, emite em torno de 1700 g de CO<sub>2</sub> por kg de biomassa queimada e de 50 a 70 g de CO por kg de biomassa queimada e a floresta nativa emite entre 1500 a 1700 g de CO<sub>2</sub> e de 100 a 150 g de CO por kg de biomassa queimada. Ward *et al.* fornecem, ainda, a divisão da quantidade de biomassa consumida por estágio de queima. Quase toda biomassa é queimada durante a fase de chamas no cerrado. Enquanto que na floresta primária a partição é em torno de 50%. Mais recentemente, Andreae e Merlet (2001) apresentam uma completa revisão bibliográfica de informações sobre emissões em vários tipos de queimadas, integrando dados publicados em um grande número de periódicos.

A partir do conhecimento da quantidade de biomassa acima do solo ( $b$ ), do fator de combustão ( $c$ ), do fator de emissão ( $E_p$ ) e da área queimada em um dado ecossistema ( $A_q$ ), a quantidade emitida de um dado composto [ $\eta$ ] pela queima, pode ser estimada por

$$F^{[\eta]} = b.c.E_p.A_q \quad (1)$$

em unidades kg[η] emitido. Porém, estimativas de áreas queimadas ou fração de biomassa afetada pelo fogo são extremamente incertas, constituindo outra dificuldade importante para o cálculo da quantidade de material lançado na atmosfera.

### **Detecção e caracterização de queimadas via sensoriamento remoto**

A extensão espacial da ocorrência de queimadas em áreas tropicais e subtropicais da América do Sul torna o sensoriamento remoto por satélites a mais viável forma de monitoramento destes eventos. Detecção de focos de queimadas na região de cerrado e floresta tropical no Brasil, usando o radiômetro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), com resolução aproximada 1,1 km x 1,1 km no nadir e a bordo da série de satélites NOAA, foi desenvolvida por Pereira (1988). Setzer e Pereira (1991) implantaram a técnica de forma operacional no Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [www.cptec.inpe.br/queimadas](http://www.cptec.inpe.br/queimadas)), São José dos Campos.

Prins e Menzel (1992) apresentam resultados de monitoramento de queimadas em áreas de desflorestamento e de cerrado do Brasil, usando o radiômetro VAS (Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder) a bordo do satélite geostacionário GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). A resolução do satélite GOES é um fator limitante para este monitoramento. No nadir, as resoluções são: no visível, 0,9 x 0,9 km<sup>2</sup>, no canal 11,2 mm, 6,9 x 6,9 km<sup>2</sup> e no canal 3,9 mm, 13,8 x 13,8 km<sup>2</sup>. No entanto, sua alta resolução temporal, permite um acompanhamento da variabilidade diurna do número e extensão dos focos, além, de possibilitar o estudo do movimento e extensão em grande escala da fumaça associada à emissão coletiva de todos os focos de fogo. Prins *et al.* (1996, 1998) apresentam resultados utilizando observações do radiômetro VAS a bordo do satélite GOES-8 juntamente com o algoritmo ABBA (Automated Biomass Burning Algorithm) para a estação de queimadas do ano de 1995. Neste trabalho é mostrada a variabilidade diurna do número de focos de fogo durante os dias 15 de agosto a 15 de setembro de 1995, detectados às 11:45, 14:45, 17:45 e 20:45 UTC. O pico de queimadas acontece por volta das 17:45 UTC, oscilando de 1500 a 3500 focos detectados por dia. Os valores neste horário são da ordem de 2 a 3 vezes maiores daqueles às 14:45 e 20:45 UTC, e 20 vezes daqueles às 11:45 UTC. Reportaram ainda que, 338.690 focos de fogo foram detectados na América do Sul, com uma estimativa de 41.845 km<sup>2</sup> de área queimada. Sendo que só o período de 15 de agosto a 15 de setembro foi responsável por cerca de 40% destas quantidades. A grande maioria das queimadas ocorreu em áreas previamente desflorestadas na região de transição entre os ecossistemas de cerrado e floresta tropical.

Mais recentemente, o sensor MODIS (*MODerate - Resolution Imaging Spectroradiometer*) vem sendo utilizado na detecção de focos de incêndio em vegetação. Sensores MODIS encontram-se a bordo dos satélites TERRA e AQUA, lançados em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente, e

circulam em torno do globo terrestre 16 vezes ao dia de pólo a pólo, produzindo duas imagens globais diárias. Os sensores MODIS obtêm medidas em 36 bandas espectrais (0,41 - 14mm), com três diferentes resoluções espaciais (250 m, 500 m e 1 km).

Atualmente, a detecção de focos de queimadas pelo Inpe incorpora produtos derivados a partir das imagens do VAS do satélite GOES e do MODIS dos satélites TERRA e AQUA, cobrindo quase a totalidade da América do Sul. Todas as informações são integradas num sistema de informações geográficas e disponibilizadas na rede Internet em tempo quase real. Este sistema reporta anualmente um número de focos de calor superior a 300.000.

A Figura 2, à esquerda, apresenta a distribuição de focos de calor detectados em 2004 pelos sensores VAS, MODIS e AVHRR (já eliminadas as redundâncias devido as detecções de um mesmo foco por mais de um sensor). A escala de cores determina o número de focos em células de 40 x 40 km<sup>2</sup>. Focos na região noroeste da América do Sul tipicamente ocorrem durante os meses de janeiro a abril, no nordeste a ocorrência se dá principalmente de outubro a janeiro, enquanto que no centro-oeste do Brasil e na borda da região Amazônica ocorrem nos meses de julho a outubro. Observa-se a grande quantidade de queimadas que ocorreram sobre o Mato Grosso (superior a 2000 focos por km<sup>2</sup>) principalmente associados com a expansão agropecuária. No estado de São Paulo, os focos ocorrem primariamente em áreas de canaviais. No lado direito da mesma figura, aparece a correspondente estimativa de emissão de monóxido de carbono, com valores de acima de 200 ton/km<sup>2</sup> no Mato Grosso.

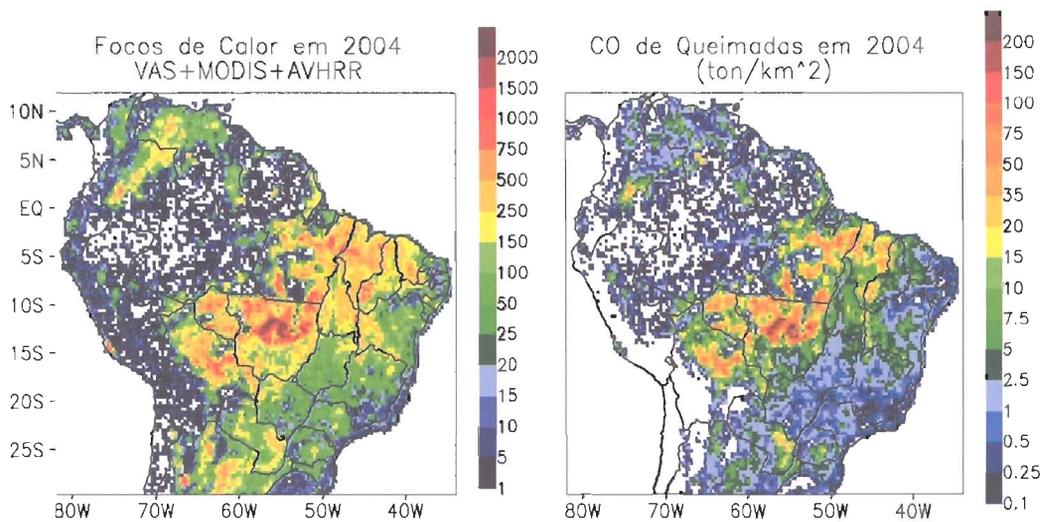


Figura 2 – À esquerda, focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/TERRA & AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004 (número de focos em áreas de 40 x 40 km<sup>2</sup>). À direita, estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km<sup>2</sup>.

Além da detecção e caracterização dos focos de incêndio, têm-se desenvolvido técnicas de sensoriamento remoto destinadas a observar e quantificar os efeitos dos produtos emitidos. Os produtos de aerossol do MODIS, derivados a partir dos canais 0,47; 0,66; 2,1 e 3,8 $\mu$ m com uma resolução de 10 x 10 km (no nadir), permitem monitorar globalmente a espessura óptica do aerossol atmosférico<sup>2</sup> (Kaufman e Tanré, 1998). Adicionalmente, sobre os oceanos é derivada também a distribuição de tamanho das partículas de aerossol e sobre áreas continentais a sua provável origem, diferenciando partículas de aerossol de queimadas, de solo e sulfatos. O produto índice de aerossol, obtido a partir de medidas com o sensor TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), possibilita a observação de aerossóis absorvedores de radiação ultravioleta, tais como àqueles associados à queima de biomassa e às tempestades de poeira em desertos. Também a bordo do satélite Terra, o sensor MOPITT (Measurements of Pollution In The Troposphere) permitiu a observação de CO e CH<sub>4</sub>. O MOPITT mede a radiação no canal do infravermelho emitida pela superfície terrestre e isola a energia irradiada pelas moléculas de CO e CH<sub>4</sub>, possibilitando, desta maneira, a determinação das concentrações destas espécies químicas na troposfera. O MOPITT possibilita a geração de mapas globais de concentração destas espécies para estudos de química atmosférica e validação de modelos numéricos.

### **Processos de transporte de emissões de queimadas**

As fontes emissoras associadas às queimadas emitem gases e partículas a temperaturas superiores àquelas da atmosfera do ambiente, tendo assim uma flutuação positiva que transporta estes materiais verticalmente para cima. Um dos fatores determinantes para altura final em que estes materiais são injetados na atmosfera é a estabilidade termodinâmica. Outro fator é a interação entre a fumaça e o ambiente, através de turbilhões que entram ar ambiente frio para dentro da pluma de fumaça, o que provoca uma diluição desta e reduz a flutuação. Tipicamente, fogos em cerrado e pastagem injetam material dentro da própria camada limite planetária (CLP)<sup>3</sup>, enquanto que fogos em florestas, com alta densidade de biomassa sendo queimada e uma taxa de calor da ordem 10 GW durante algumas horas, conseguem injetar a fumaça diretamente na baixa e média troposfera (3 a 10 km de altura) desenvolvendo os pirocumulus (Figura 3). A mistura turbulenta da camada limite diurna, também transporta verticalmente estes materiais, tendendo a homogeneizá-los por toda a camada de mistura. Na direção horizontal, a advecção pelo vento domina o transporte, arrastando os materiais na direção do fluxo da atmosfera dentro da CLP. O entranhamento no topo da CLP e processos convectivos úmidos atuam para transportar estes materiais para a troposfera, rompendo a estabilidade no topo da CLP. Sistemas convectivos rasos e não-precipitantes formam-se no topo da CLP e, tipicamente, atuam transportando gases e partículas para a baixa troposfera, e desta forma ajudam na dispersão dos poluentes. Sistemas convectivos profundos e precipitantes atuam de formas distintas dependendo da natureza higroscópica dos traçadores.

CO<sub>2</sub> e CO, por exemplo, possuem baixa higroscopicidade, e desta forma são transportados pelas correntes ascendentes até o topo da nuvem na alta troposfera onde são desentranhados no ambiente. Uma vez na troposfera, o transporte destes poluentes se dá de forma mais eficiente devido às velocidades maiores do fluxo de ar, transportando-os para regiões distantes dos locais de emissão, transformando o problema de escala local para continental ou, mesmo, global. Além deste aspecto, processos de remoção de poluentes da atmosfera são mais eficientes dentro da CLP, de modo que, uma vez transportados para a alta troposfera, a vida-média destes pode aumentar. Por outro lado, partículas de fumaça podem atuar como núcleos de condensação de água formando gotas de chuva que precipitam, sendo então removidos da atmosfera, processo denominado remoção úmida. Sistemas convectivos induzem também a formação de correntes descendentes que trazem parcelas de ar da média troposfera para a CLP, diluindo e esfriando a atmosfera local. As interações de camadas de ar com a superfície terrestre induzem também a remoção de material, num processo denominado deposição seca. A Figura 4 ilustra os principais mecanismos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera.

Vários autores (Chatfield e Crutzen, 1984; Dickerson et al., 1987; Pickering et al., 1988; Thompson et al., 1994; Chatfield et al., 1996; Longo et al., 1998; Andreae et al., 2001, Freitas et al., 2000, 2004) têm estudado o transporte de gases traços e aerossóis de queimadas na América do Sul e na África, com especial atenção ao transporte por circulações associadas à convecção úmida e profunda mostrando a importância deste mecanismo na distribuição de poluentes para a alta e média troposfera, e, conseqüentemente, para as questões de mudanças climáticas.



Foto cedida por M. O. Andreae

Figura 3 – Pirocumulus produzido por queimada em área de floresta no estado de Rondônia.

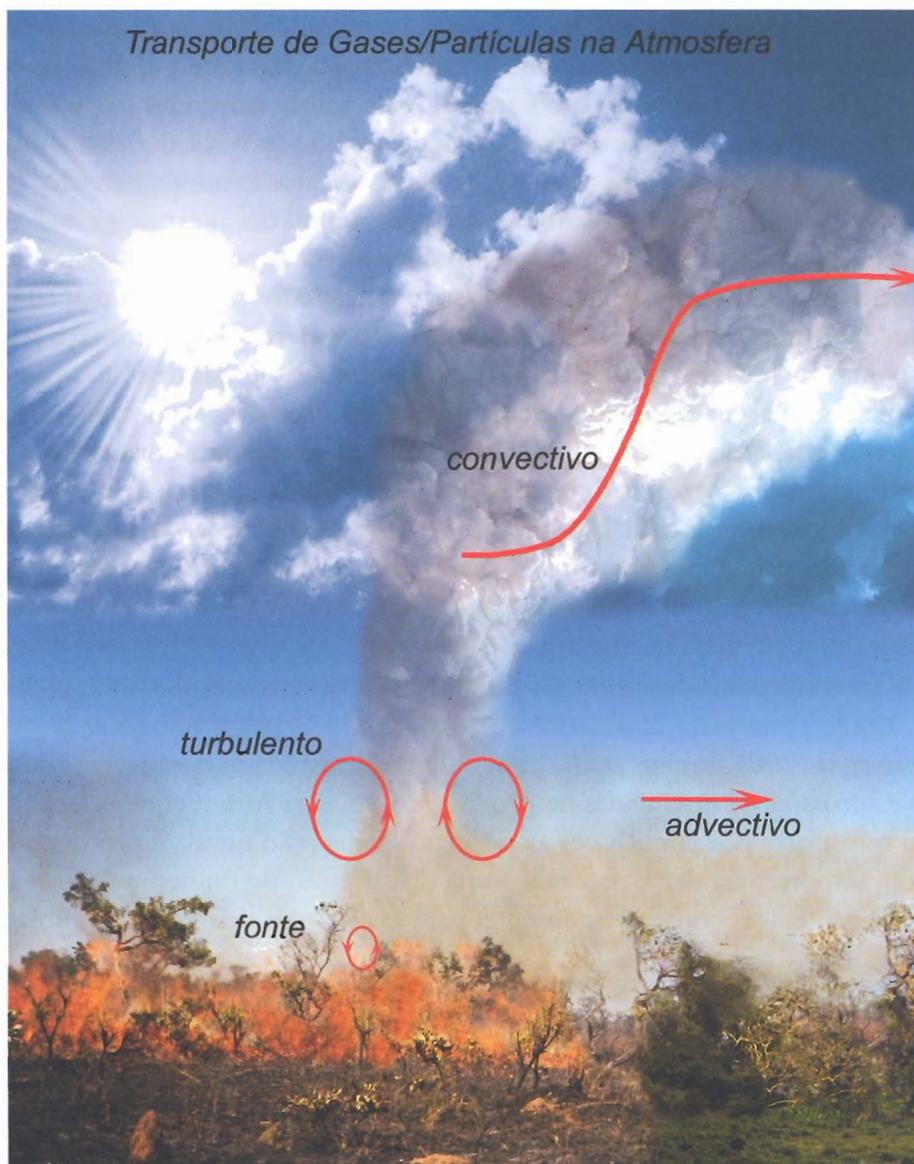


Figura 4 – Ilustração dos principais mecanismos físicos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera.

### Modelagem numérica do transporte atmosférico

O transporte atmosférico de material de densidade  $\rho$  é governado pela equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}\rho) + D\nabla^2 \rho + R + F \quad (2)$$

onde  $\mathbf{v}$  é a velocidade do fluido atmosférico,  $D$  é o coeficiente de difusão molecular do material,  $R$  descreve os processos de remoção e transformação e  $F$  os processos de emissão e produção do poluente. Nesta mesma equação, o símbolo  $\nabla \cdot$  representa o operador divergente e  $\nabla^2$  o Laplaciano. Em estudos com escalas espaciais muito maiores que a escala molecular, o segundo termo do lado

direito da Eq. (2) pode ser desprezado. Em problemas reais, a Eq. (2) é resolvida numericamente através de modelos matemáticos em computadores. Em termos gerais, modelos numéricos atmosféricos são necessários uma vez que o sistema de equações que governa a evolução do estado atmosférico não possui solução analítica nos casos mais gerais do campo do vento e das propriedades de dispersão por processos turbulentos. No entanto, a solução numérica obtida através da discretização das equações (por exemplo, através de diferenças finitas), intrinsecamente impõe outras dificuldades. Uma das mais relevantes se refere ao que se chama de ‘separação de escalas’ definida pela resolução espacial da discretização. Isto significa que o procedimento de discretização necessariamente irá separar todas as escalas de movimento existentes na atmosfera em duas famílias: as que são explicitamente resolvidas (escala da grade) e as que não são resolvidas (escala sub-grade). No entanto, a natureza não linear do sistema de equações permite a migração de energia entre as escalas, e assim, processos da escala sub-grade geralmente possuem um efeito líquido na escala da grade. A contabilização dos efeitos dos processos sub-grade na escala resolvida é realizado através de parametrizações (como é normalmente denominado quando se trata de processos de superfície ou convecção) ou de fechamentos (para processos de difusão turbulenta na CLP). Parametrizações, as quais são desenvolvidas com base em dados observacionais e no entendimento da forma como as diversas escalas atmosféricas interagem entre si, são ainda bastante incompletas, e é, geralmente, reconhecido serem uma das principais fontes de incerteza na previsão numérica do tempo, clima ou qualidade do ar.

Quando se utiliza o esquema de diferenças finitas, a solução da Eq. (2) é determinada em pontos de grade separados por dimensões espaciais  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$ , com a interpretação para a quantidade  $\rho$  passando a ser o de concentração média do poluente no volume  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ . Exemplos de escalas de movimento sub-grade são o transporte turbulento dentro da CLP e o transporte convectivo por nuvens, sendo os efeitos destes processos na determinação de  $\rho$ , parametrizados e inseridos na Eq. (2). O termo  $R$  representa os processos que atuam na eliminação do material poluente. Para partículas podemos destacar os processos de deposição seca (associados a remoção de material pela rugosidade da superfície), sedimentação (devido à ação gravitacional) e deposição úmida (associada ao processo de precipitação de material por água de chuva). O termo  $F$  representa os processos de incorporação do material a atmosfera e produção por reações químicas. Este termo, no caso das queimadas, representa a fonte de poluentes emitidos a partir do processo de combustão de biomassa, sendo parametrizado através da combinação de dados de sensoriamento remoto, mapa de tipo de vegetação e o uso de dados de quantidades de biomassa acima do solo, fatores de combustão, fatores de emissão descritos anteriormente na Eq. (1). Desta forma, é obtida a distribuição espacial e intensidade das fontes emissoras associadas aos focos de incêndio, atualizada diariamente de acordo com a detecção derivada da observação por sensores a bordo de satélites.

O campo de vento e outras propriedades que descrevem o estado da atmosfera, necessárias para a solução da Eq. (2), são obtidos utilizando um modelo numérico da atmosfera. Alguns modeladores realizam primeiro a simulação da atmosfera, salvando os campos atmosféricos em intervalos de tempo e, após o término da simulação, estes dados são utilizados para a integração numérica da Eq. (2). Outros estudos de modelagem realizam a integração simultaneamente com a simulação atmosférica. Esta modalidade permite o estudo da interação do material com a própria evolução da atmosfera e uma descrição mais realista do processo de dispersão por turbulência. Por exemplo, em situações de alterações importantes no balanço de radiação em função de altas concentrações de partículas de aerossol atmosférico, taxas de aquecimento obtidas no cálculo de transferência de radiação através da coluna atmosférica são fornecidas no passo de tempo seguinte para o modelo atmosférico.

### **Corredores atmosféricos de exportação das emissões de queimadas e a distribuição regional da fumaça**

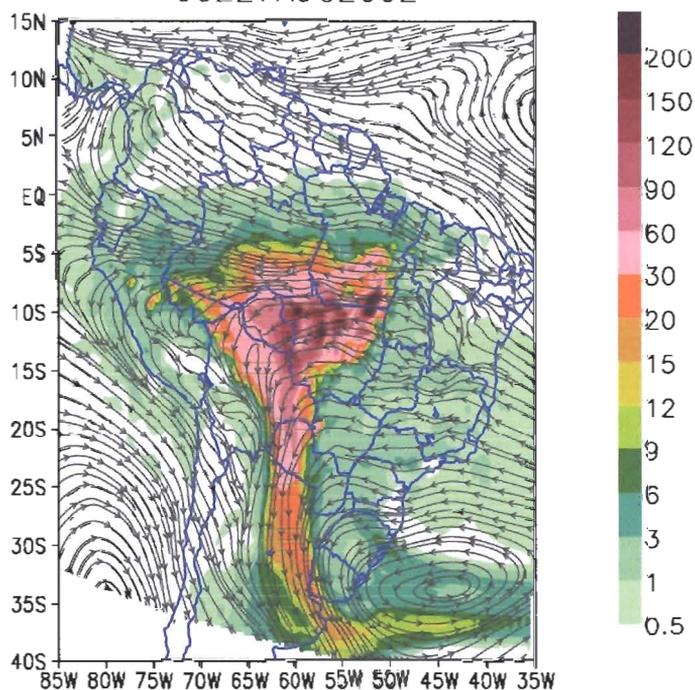
Freitas (1999) apresenta uma metodologia para o estudo do transporte de gases traços e partículas de aerossóis emitidos por queimadas na América do Sul. A metodologia é baseada no acoplamento do modelo de transporte ao modelo atmosférico RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), um código numérico desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado (EUA) para produzir simulações diagnósticas e prognósticas do estado atmosférico (Walko *et al.*, 2000). Os principais processos de transporte e remoção de traçadores na escala sub-grande são parametrizados e a simulação do transporte é realizada simultaneamente com a evolução do estado atmosférico. Como um resultado desta metodologia, Freitas *et al.*, (2004) desenvolveram um sistema de monitoramento do transporte de emissões de queimadas em tempo real, o qual foi implementado operacionalmente gerando previsões de concentração de CO e MP<sub>2.5</sub> para a América do Sul e parte da África ([www.cptec.inpe.br/meio\\_ambiente](http://www.cptec.inpe.br/meio_ambiente)). A Figura 5 apresenta um resultado desta metodologia, a simulação numérica do conteúdo de MP<sub>2.5</sub> na coluna atmosférica (mg/m<sup>2</sup>) é a mostrada para o dia 27 de agosto de 2002 em duas resoluções espaciais: (a) 40 km, (b) 200 km. Nesta figura aparecem também as linhas de corrente do fluxo de ar na baixa troposfera. Climatologicamente a estação seca do Brasil central é dominada por área de alta pressão com pouca precipitação e ventos calmos na baixa troposfera (Satyamurti *et al.*, 1998; Silva Dias e Marengo, 1999) e com a convecção na bacia Amazônica deslocada para a parte noroeste da América do Sul. Estas condições são associadas com o deslocamento para noroeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e com o movimento para norte da Zona de Convergência Intertropical. Na região nordeste do Brasil, os ventos de leste na baixa troposfera (alísios) trazem massas de ar não poluídas vindas do oceano, que diluem e transportam as emissões de queimadas para oeste. Com a barreira topográfica dos Andes, a maior parte do fluxo de ar é desviada para o sul e sudoeste, transportando a fumaça sobre a Bolívia, Paraguai

e Argentina, saindo do continente em direção ao oceano Atlântico na parte mais ao sul e sudeste de América do Sul. Com a entrada de frentes frias vindo do sudoeste e sul do continente, a fumaça é empurrada novamente para o norte e nordeste, e, em muitas vezes, parte da exportação para o oceano Atlântico se dá na região sul e sudeste do Brasil, passando sobre as regiões mais populosas, com os valores máximos de concentração ocorrendo a uma altura em torno de 2 km. Outra parte da fumaça pode ser transportada bem ao norte (atravessando a latitude equatorial) atingindo a região central da Amazônia durante os eventos de friagem, alterando significativamente a composição química em áreas pristinas (Cordova *et al.*, 2004). Uma rota de exportação para o Oceano Pacífico acontece quando o anticiclone associado a ASAS se dirige ainda mais para o norte e oeste em direção ao continente. Este movimento intensifica o fluxo de ar de sudeste sobre a região poluída, exportando fumaça para o Oceano Pacífico em torno da latitude 5° S, onde os Andes apresentam uma depressão. O caso da Figura 5 contém ainda a ocorrência de jatos de baixos níveis no lado leste dos Andes, em torno da latitude 20° S. Este sistema produz um enorme fluxo de massa da região Amazônica para o sul da América do Sul, transportando não só fumaça, mas também vapor d'água e favorecendo a formação de grandes tempestades, os chamados complexos convectivos de mesoescala, sobre o norte da Argentina e sobre o Paraguai, com conseqüente deposição úmida de material transportado da região de queimadas.

A poluição provocada pelas queimadas na América do Sul atinge regiões distantes dos locais de ocorrência das queimadas e soma-se à poluição antropogênica associada à ocupação urbana e atividades industriais. Como um exemplo do efeito nas grandes cidades, a Figura 6 apresenta a fotografia do pôr-do-sol sobre a cidade do Rio de Janeiro no dia 23/10/2003. A inusitada coloração avermelhada esta associada à interação da poluição atmosférica com a radiação solar. A Figura 7 apresenta a distribuição de fumaça ( $MP_{2.5}$ ) simulada numericamente para às 18:00h (hora local). Como resultado de convergência de massas de ar que se formou sobre o sudeste do Brasil (veja as linhas de corrente do fluxo de ar na Figura 7), houve uma canalização da fumaça exportada para Oceano Atlântico passando sobre o Rio de Janeiro. De acordo com o modelo, o CO, proveniente das queimadas, apresentou valores de até 1000 ppb dentro da pluma na baixa troposfera.

Em resumo, é importante ressaltar que as queimadas ocorrem numa escala espacial muito maior que a América do Sul, sendo freqüente em outras regiões do planeta, principalmente nos continentes Africano e Asiático que também apresentam um ciclo anual de queima, emitindo grandes quantidades de poluentes para a atmosfera. Assim, as queimadas têm um impacto relevante no processo de mudanças climáticas em escala planetária. O entendimento e avaliação deste impacto passam, necessariamente, pela junção de estudos observacionais e modelagem numérica gerando modelos complexos que descrevem as inter-relações biosfera-atmosfera, caracterizando um estudo multidisciplinar.

(a) Material Particulado ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) – 40km  
00Z27AUG2002



(b) Grade de 200km 00Z27AUG2002

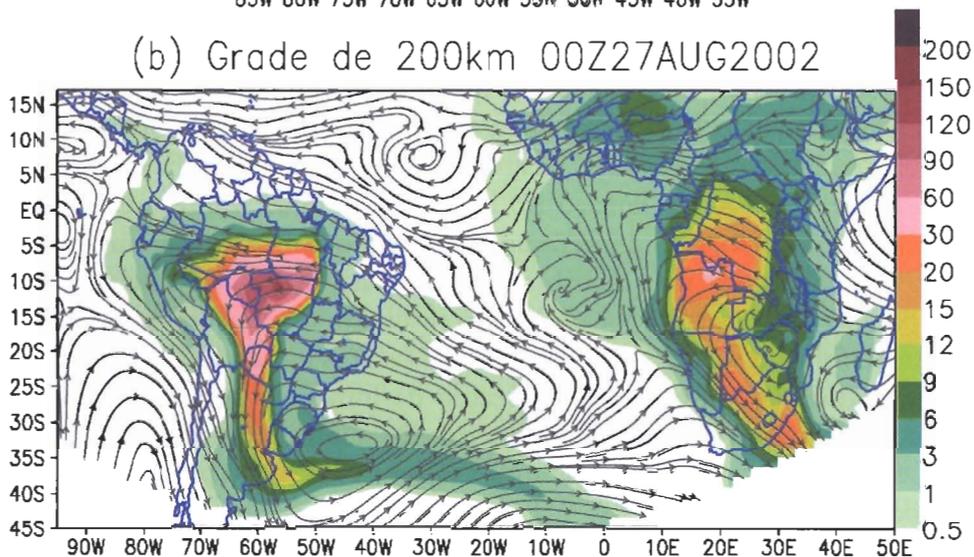


Figura 5 – Simulação numérica do transporte de fumaça emitida por queimadas. Conteúdo de  $\text{MP}_{2.5}$  integrado na coluna ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) às 00 Z do dia 27 de agosto de 2002: (a) grade regional do modelo com resolução 40 km x 40 km; (b) grade de larga escala com resolução de 200 km x 200km.

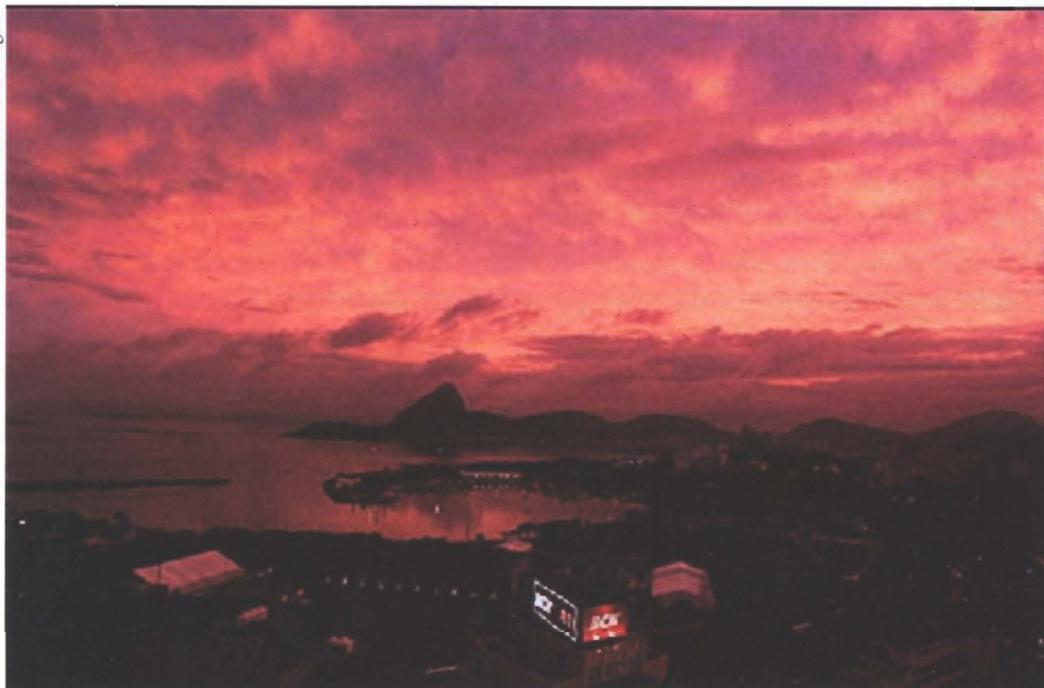


Figura 6 – Fotografia da cidade do Rio de Janeiro no final da tarde do dia 23/10/2003

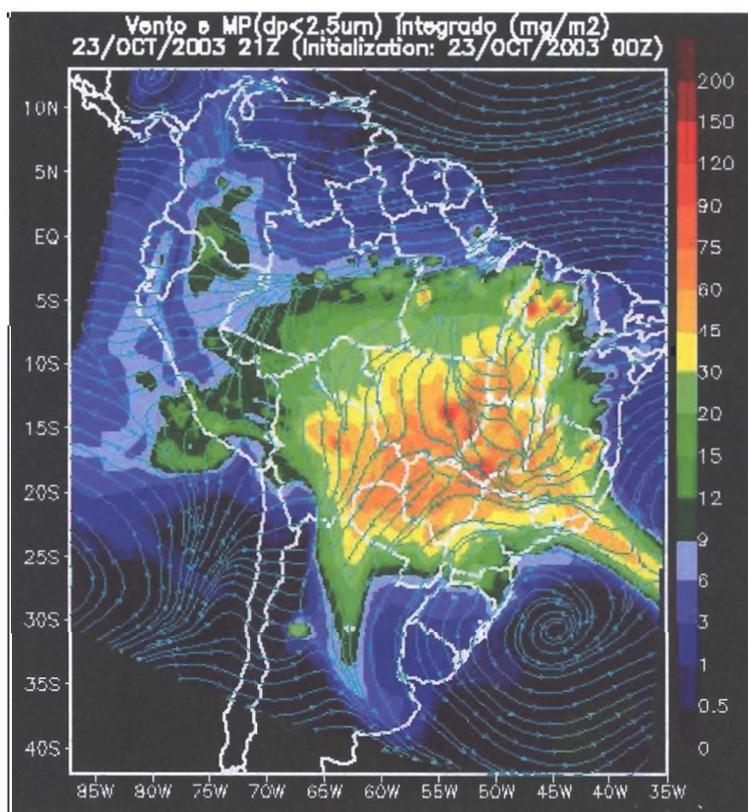


Figura 7 – Simulação numérica do transporte de fumaça emitida por queimadas, a figura descreve o conteúdo de  $MP_{2.5}$  integrado na coluna para às 18:00 hora local do dia 23/10/2003, com valor em torno de  $55 mg/m^2$  sobre a cidade do Rio de Janeiro.

## Notas

- 1 A definição de black-carbon inclui as diversas espécies de carbono particulado, que eficientemente absorvem radiação.
- 2 A espessura óptica do aerossol é uma medida da quantidade de partículas de aerossol opticamente ativa na coluna atmosférica.
- 3 Camada atmosférica, com profundidade diurna típica de 1 a 2 km, caracterizada pelo forte acoplamento com a superfície terrestre e intensa turbulência.

## Bibliografia

- 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*, editado por J. S. Levine, pp. 3-21, MIT Press, Cambridge, Mass., 1991.
- Andreae, M. O., P. Artaxo, H. Fischer, S. R. Freitas, J.-M. Grégoire, A. Hansel, P. Hoor, R. Kormann, R. Krejci, L. Lange, J. Lelieveld, W. Lindinger, K. Longo, W. Peters, M. de Reus, B. Scheeren, M. A. F. Silva Dias, J. Ström, P. F. J. Velthoven and J. Williams. Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, n<sup>o</sup>. 6, p. 951, 2001.
- Andreae, M., and Merlet, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 4, 955–966, 2001.
- Andreae M. O., D. Rosenfeld, P. Artaxo, A. A. Costa, G. P. Frank, K. M. Longo, and M. A. F. Silva-Dias: 2004, Smoking rain clouds over the Amazon, *Science*, 303, 1337-1342.
- Artaxo, P., F. Gerab, and M.L.C. Rabello, Elemental composition of aerosol particles from two background monitoring stations in the Amazon Basin, *Nucl. Instru. and Methods in Phys. Rev.*, B75, 277-281, 1993.
- Artaxo, P., J. V. Martins, M. A. Yamasoe, A. S. Procópio, T. M. Pauliquevis, M. O. Andreae, P. Guyon, L. V. Gatti, A.M. Cordova Leal. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondônia, Amazonia. *J. Geophys. Res.* 107 (D20): 49.1-49.14, 2002.
- Chatfield, R. B., and P. J. Crutzen. Sulfur Dioxide in Remote Oceanic Air: Cloud Transport of Reactive Precursors. *J. Geophys. Res.*, 89, D5, 7111-7132, 1984.
- Chatfield, R. B., J. A. Vastano, H. B. Singh and G. Sachse. A General Model of How Fire Emissions and Chemistry Produce African/Oceanic Plumes (O<sub>3</sub>, CO, PAN, smoke). *J. Geophys. Res.*, 101, D19, 24279- 24306, 1996.
- Cordova, A., K. Longo, S. Freitas, L. Gatti, P. Artaxo, A. Procópio, M. Silva Dias, E. Freitas. Nitrogen oxides measurements in an Amazon site and enhancements associated with a cold front. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 4, 1–31, SRef-ID: 1680-7375/2004
- Cotton, W., and Pielke, R.: 1996, *Human impacts on weather and climate*, Cambridge University Press, New York.

- Coutinho, L.M., H.S.Miranda e H.C. de Morais. O Bioma do Cerrado e o Fogo. Revista do Instituto de Estudos Avançados da USP, 50 pp., 2002.
- Dickerson, R. R. et al. Thunderstorms: An Important Mechanism in the Transport of Air Pollutants. *Science*, 235, 460-465, 1987.
- Echalar, F., P. Artaxo, J. V. Martins, M. Yamasoe, e F. Gerab, Long-term monitoring of atmospheric aerosols in the Amazon basin: Source identification and apportionment, *J. Geophys. Res.*, 103, 31849-31864, 1998.
- Freitas, S. R. Modelagem Numérica do Transporte e das Emissões de Gases Traços e Aerossóis de Queimadas no Cerrado e Floresta Tropical da América do Sul. Tese de Doutorado em Física Aplicada - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, agosto de 1999. 204 p.
- Freitas, S., K. Longo, M. Silva Dias, P. Silva Dias, R. Chatfield, E. Prins, P. Artaxo, G. Grell and F. Recuero. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, 2004 (em impressão, disponível eletronicamente em [www.kluweronline.com/issn/1567-7419](http://www.kluweronline.com/issn/1567-7419), na seção Articles in Advance).
- Freitas, S. R., M. A. F. da Silva Dias, P. L. da Silva Dias, K. M. Longo, P. Artaxo, M. O. Andreae and H. Fischer, A convective kinematic trajectory technique for low-resolution atmospheric models, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. D19, p. 24375-24386, 2000.
- Houghton, R. A. The Global Effects of Tropical Deforestation. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 24, No. 4, 414-422, 1990.
- Houghton, R. A, K. T. Lawrence, J. L. Hackler and S. Brown. The Spatial Distribution of Forest Biomass in the Brazilian Amazon: a Comparison of Estimates. *Global Change Biology*, 7, 731-746, 2001.
- Jacobson, M. Z. Strong Radiative Heating due to the Mixing State of Black Carbon in Atmospheric Aerosols. *Nature*, vol. 409, 695-697, 2001.
- Kaufman, Y. J. Remote Sensing of Direct and Indirect Aerosol Forcing. In: *Aerosol Forcing of Climate*. Ed. by R. J. Charlson and J. Heintzenberg, John Wiley & Sons Ltd., 1995.
- Kaufman, Y. J., e D. Tanré, *Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS*, [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04\\_L2/index.html](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04_L2/index.html), 1998.
- Koren I., Y. Kaufman, L. A. Remer, J. V. Martins: 2004, Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation, *Science*, 303, 1342-1345.
- Lobert, J. M. and J. Warnatz. Emissions from the Combustion Process in Vegetation. *Fire in the Environment*, ed. by P. J. Crutzen and J. G. Goldammer. John Wiley & Sons, 1993.
- Longo, K. M., A. M. Thompson, V. W. J. H. Kirchhoff, L. A. Remer, S. R. Freitas, M. A. F. Silva Dias, P. Artaxo, W. Hart, J. D. Spinhirne, e M. A. Yamasoe, Correlation between smoke and tropospheric ozone concentration in Cuiabá during SCAR-B, *J. Geophys. Res.*, 104, 12113-12129, 1999.

- Longo K., S. Freitas, M. Silva Dias, R. Chatfield, P. Silva Dias. Numerical modelling of the biomass burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and convective precipitation. 8th International Global Atmospheric Chemistry Conference, Christchurch, Nova Zelândia. 2004.
- Pickering, K. E., R. R. Dickerson, and G. J. Huffman. Trace Gas Transport in the Vicinity of Frontal Convective Clouds. *J. Geophys. Res.*, 93759-773, 1988.
- Prins, E. M., J. M. Feltz, W. P. Menzel and D. E. Ward. An Overview of GOES-8 Diurnal Fire and Smoke Results for SCAR-B and 1995 Fire Season in South America. *J. Geophys. Res.*, 103, D24, 31821-31835, 1998.
- Prins, E. M., and W. P. Menzel. Geostationary Satellite Detection of Biomass Burning in South America. *Int. J. Remote Sensing*, 13, no. 15, 2783-2799, 1992.
- Prins, E. M., W. P. Menzel and D. E. Ward. GOES-8 ABBA Diurnal Fire Monitoring During SCAR-B. *Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation – Brazil (SCAR-B) Proceedings*. Fortaleza, 4-8 November 1996, Transtec Editorial, 153-157.
- Rosenfeld, D.: 1999, TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall, *Geophys. Res. Lett.* 26, 20, 3101
- Satyamurty, P., C. Nobre and P. Silva Dias. South America. In: Karoly, D., and Vincent, D., (eds.), *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Meteorological Monographs 27, 49, 119-139, American Meteorological Society, Boston, 1998.
- Silva Dias, P.L. e J. Marengo, *Águas Doces do Brasil: Águas Atmosféricas, Capital Ecológico, Uso e Conservação*. Editado por A.Rebouças, B. Braga e J. Tundizi. Instituto de Estudos Avançados e Academia Brasileira de Ciências, pp 65-115, 1999.
- Setzer, A. W., and M. C. Pereira. Amazonia Biomass Burnings in 1987 and an Estimate of Their Tropospheric Emissions. *Ambio*, 20, 19-22, 1991.
- Thompson, A. M., et al. Convective Transport over the Central United States and its Role in Regional CO and Ozone Budgets. *J. Geophys. Res.*, 99, D09, 18703-18711, 1994.
- Walko R., Band L., Baron J., Kittel F., Lammers R., Lee T., Ojima D., Pielke R., Taylor C., Tague C., Tremback C., Vidale P. Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling. *J Appl Meteorol.*, 39: (6) 931-944, 2000.
- Ward, D. E., R. A. Susott, J. B. Kauffman, R. E. Babbit, D. L. Cummings, B. Dias, B. N. Holben, Y. J. Kaufman, R. A. Rasmussen, A. W. Setzer. Smoke and Fire Characteristics for Cerrado and Deforestation Burns in Brazil: BASE-B Experiment. *J. Geophys. Res.*, 97, D13, 14601-14619, 1992.

**RESUMO** – AS QUEIMADAS que ocorrem majoritariamente em áreas tropicais do planeta, são fontes importantes de poluentes para a atmosfera. Na América do Sul, durante os meses de inverno, uma área, principalmente de ecossistemas de cerrado e floresta, da ordem de 40 mil km<sup>2</sup> é queimada anualmente. Estas queimadas ocorrem primariamente nas regiões Amazônica e do Brasil Central, porém, através do transporte atmosférico de suas emissões resulta uma distribuição espacial de fumaça sobre uma extensa área, ao

redor de 4-5 milhões de km<sup>2</sup>, em muito superior a área onde estão concentradas as queimadas. Durante a combustão de biomassa são emitidos para a atmosfera gases poluentes e partículas de aerossol que interagem eficientemente com a radiação solar e afetam os processos de microfísica e dinâmica de formação de nuvens e a qualidade do ar. Os efeitos destas emissões excedem, portanto, a escala local e afetam regionalmente a composição e propriedades físicas e químicas da atmosfera na América do Sul e áreas oceânicas vizinhas, com potencial impacto em escala global.

**ABSTRACT** – THE VEGETATION fires in tropical areas of the Earth are important sources of pollutants to the atmosphere. In South America, during the winter months, an area, mainly of cerrado and forest ecosystems, of approximately 40 thousand square kilometers is burned annually. The biomass burning occurs primarily in Amazon and Central of Brazil regions, but through atmospheric transport these emissions results in a spatial distribution of smoke over an extent area, of about 4-5 millions of square kilometers, much higher than the area where the fires are concentrated. During the combustion process are emitted to the atmosphere gases pollutants and aerosol particles that interact efficiently with radiation, microphysics process, dynamic of cloud formation and the air quality. The effects of these emissions exceed, therefore, the local scale and affect regionally the composition and physical and chemical properties of the South America atmosphere and neighborhood oceanic areas, with potential impact in a global scale.

**Palavras-chave:** Queimadas, Mudanças climáticas, Modelagem numérica da atmosfera.

**Keywords:** Biomass burning, Climate change, Atmospheric numerical modeling.

*Saulo R. Freitas* é pesquisador do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; *Karla M. Longo* é pesquisadora do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; *M. A. F. Silva Dias* é pesquisadora do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo e *P. L. Silva Dias* é pesquisador do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Autor correspondente: [sfreitas@cptec.inpe.br](mailto:sfreitas@cptec.inpe.br)

Texto recebido em 14 de fevereiro de 2005 e aceito para publicação em 26 de fevereiro de 2005.