

Interação entre a vegetação e a atmosfera para formação de nuvens e chuva na Amazônia: uma revisão

JOÃO PAULO NARDIN TAVARES

Introdução

OS RESULTADOS das pesquisas do Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazon (LBA) quanto à física do clima da Amazônia têm sido notáveis e chegam a explicar mecanismos complexos como o da formação de nuvens e chuvas na Amazônia. Foi comprovado que as árvores emitem Compostos Orgânicos Voláteis (COV); que na atmosfera sobre a floresta, durante a estação chuvosa, as moléculas de COV formam minúsculos cristais ou aerossóis; que na ausência de outros aerossóis, esses cristais servem como Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN), atraindo muito vapor d'água que formam grandes e pesadas gotas de chuva, que logo se precipitam na mesma região em que foram formadas, num mecanismo rápido e eficiente. A importância dessas emissões naturais de COV que formam NCN é no ciclo hidrológico: estima-se que pelo menos 20% a 30% de toda a chuva na região sejam provenientes desse processo.

O objetivo deste artigo é fazer uma revisão do conhecimento produzido a respeito do tema interação vegetação-atmosfera, sua importância se justifica pelo problema do desmatamento e mudanças climáticas.

Emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) pela vegetação

As plantas, em processos fisiológicos, emitem Compostos Orgânicos Voláteis (COV) conhecidos como terpenos para a atmosfera. Estima-se que as emissões de COV pela vegetação são comparáveis, ou excedem, as emissões de aerossóis de fontes antropogênicas, em escala regional e global. Os compostos orgânicos voláteis incluem os hidrocarbonetos não metálicos saturados e insaturados e os hidrocarbonetos oxigenados, tais como ácidos carboxílicos, aldeídos, cetonas, éteres, ésteres e álcoois. Um grande número de compostos oxigenados tem sido encontrado nas emissões de plantas. Os inventários de emissão de plantas mostram que isopreno e monoterpenos, classificados como isoprenoides, são os compostos mais abundantes, seguidos de álcoois e carbonilas. COV, tais como monoterpenos, esquiterpenos, álcoois, ácidos, aldeídos, cetonas e ésteres,

estão armazenados nas plantas em diferentes órgãos. As plantas, que durante a fotossíntese fixam de 0,5% a 2% do carbono, emitem taxas elevadas de COV, provocando a perda de até 20% do carbono fixado (Souza et al., 2002).

Ainda segundo Souza et al. (2002), os gases emitidos por *Ficus benjamina* L., uma espécie abundante na cidade de São Paulo, foram analisados quimicamente para caracterizar a emissão dos COV oxigenados. Seu estudo fez parte de um projeto de pesquisa amplo envolvendo emissões de COV provenientes da vegetação em São Paulo, os quais podem afetar a formação de oxidantes fotoquímicos na Região Metropolitana de São Paulo. Dentre os compostos identificados nas emissões de *Ficus benjamina* L., alguns são reconhecidamente importantes na química da atmosfera por serem considerados precursores de ozônio e de outros poluentes tóxicos presentes na atmosfera. Ácidos carboxílicos e aldeídos participam ativamente das reações químicas que ocorrem no *smog* fotoquímico, episódio frequente em atmosferas poluídas de grandes centros urbanos, como São Paulo. Além disso, os ácidos orgânicos são responsáveis pelo aumento da acidez atmosférica em áreas urbanas e florestais.

Na Amazônia, uma significativa fração de carbono emitido da biosfera para a atmosfera é emitida na forma de COV. Aquino (2006) analisou as emissões de COV associados a condições naturais e emissões de queimadas na Região Amazônica e ambiente de pastagem. Foram estudados dois ambientes distintos: floresta primária, na Reserva Biológica do Jarú, e uma área de pastagem, na Fazenda Nossa Senhora, ambas no Estado de Rondônia. A caracterização das emissões de COV requer, muitas vezes, não só a quantificação dos COV totais, como também a determinação de cada composto que faz parte da complexa mistura na atmosfera. Aquino (2006) dividiu os COV em duas classes: a primeira, de compostos orgânicos não metano (CONM), na qual se incluem os compostos orgânicos oxigenados, os halogenados e os hidrocarbonetos, e a segunda classe, na qual o metano faz parte. Observaram-se altas concentrações de aerossóis de natureza orgânica na Amazônia, tanto na estação seca quanto na chuvosa. A abundância de partículas orgânicas em suspensão durante a estação chuvosa certamente está relacionada à produção biogênica, mediante a conversão gás-partícula de precursores orgânicos. A emissão de COV para a atmosfera pode ter origem tanto em processos naturais como em processos antropogênicos. As queimadas são fontes muito importantes na emissão de COV nas regiões estudadas. A vegetação é responsável por aproximadamente 90% de todos os compostos orgânicos voláteis na atmosfera global, junto com o vapor d'água e o gás carbônico, emitidos em processos fisiológicos, algo em torno de meia tonelada por ha/ano. Esses compostos são formados por grandes moléculas que favorecem a ocorrência de um fenômeno típico das atmosferas limpas, ou seja, a cristalização dos compostos orgânicos voláteis em minúsculos cristais.

Química da atmosfera

As principais fontes de aerossóis biogênicos são a emissão de dimetil sulfi-

do (DMS) dos oceanos e dos hidrocarbonos não metanos (NMHC) da vegetação terrestre, seguidos por sua oxidação na troposfera. A quantidade e a composição dos terpenos e outros hidrocarbonos biogênicos dependem de parâmetros climáticos, tais como temperatura e radiação solar, e podem mudar radicalmente em resultado de mudanças no tipo de cobertura vegetativa em razão do uso da terra ou mudanças climáticas. Finalmente, a produção de aerossóis de gases precursores depende dos oxidantes presentes na atmosfera, e sua remoção é influenciada pela dinâmica de nuvens e precipitação. Consequentemente, a oxidação química fundamental da atmosfera é um importante fator na produção de aerossóis atmosféricos. Por sua vez, os aerossóis podem também desenvolver um importante papel nos processos de oxidação atmosférica (Andreae & Crutzen, 1997).

Enquanto o sulfato domina a composição dos aerossóis marinhos e estratosféricos, a matéria orgânica frequentemente é a maior fração sobre regiões continentais, especialmente em áreas remotas. Um dos resultados surpreendentes do Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE-2) foi a similaridade nas concentrações de partículas de carbono orgânico e carbono grafitico sobre a Bacia Amazônica central entre as estações chuvosa e seca. Em ambas as estações, a matéria orgânica foi contabilizada em aproximadamente 90% da massa de aerossol. Durante a época seca, a emissão de enormes quantidades de fumaça de queimadas explicou a abundância dessas partículas de carbono. A abundância de aerossóis orgânicos durante a época chuvosa foi atribuída à produção biogênica, mas sem uma especificação clara de como esse mecanismo de fonte opera. Assumindo uma variação entre 5% e 40%, obtém-se uma estimativa de 30 a 270 Tg/ano para a produção de aerossóis orgânicos secundários, uma magnitude comparável à produção de aerossóis de sulfato biogênicos e antropogênicos (90 e 140 Tg / ano, respectivamente) (Andreae & Crutzen, 1997).

Esses mecanismos de produção não satisfazem a presença de carbono grafitico (usualmente tratado como carbono proveniente da combustão), durante a época de queimadas, assim como de K e Zn nas frações de aerossóis amazônicos. Esses componentes devem representar aerossol biogênico primário, os quais consistem de partículas microbianas (bactérias, fungos, algas e esporos), partes de plantas (fragmentos de folhas e cutículas) e matéria do húmus. Tal origem primária biogênica pode explicar a presença de K e Zn, ambos abundantes em plantas (ibidem).

Ainda segundo esses autores, infelizmente, há pouca informação que permita uma estimativa confiável de partículas biogênicas primárias no aerossol orgânico nas regiões tropicais. Mas, pelo fato de que numa cidade em região temperada as partículas biogênicas tomam parte em 10% a 30% do número total de aerossóis e concentração de volume, sua contribuição numa floresta densa tropical deve ser substancial. Esse aerossol biogênico primário deve ser consideravelmente significativo para a química da atmosfera e o clima. Como as

partículas orgânicas primárias e secundárias são Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN) efetivos, e partículas orgânicas primárias podem ser núcleos de formação de gelo em temperaturas de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, é óbvio que as propriedades ópticas e microfísicas das nuvens tropicais continentais são fortemente influenciadas por essas partículas.

Influência dos NCN na formação de nuvens

Cerca de 60% a 80% das partículas naturais de aerossóis na Amazônia atuam como Núcleo de Condensação de Nuvem (NCN). A diferença na concentração de NCN da estação chuvosa para a estação seca (de cerca de 200 para 20.000 partículas/cm³) em grandes áreas da Amazônia altera profundamente as propriedades microfísicas de nuvens (Silva-Dias et al., 2002).

Se o ambiente é relativamente limpo, não poluído, há poucos NCN. Na disputa pelo vapor de água existente, se houver alguns NCN relativamente grandes ou solúveis em água, esses vão crescer rapidamente, colidir com os menores e cair como chuva. A nuvem não tem muito tempo para crescer, chegando no máximo a alturas de 4 ou 5 km. Caso a atmosfera esteja poluída, com um número muito grande de NCN, como na época de queimadas, a disputa pelo vapor de água disponível aumenta, as gotas crescem pouco e devagar enquanto a nuvem vai crescendo. Muitas vezes essas nuvens nem chegam a precipitar em chuva, as gotas evaporam e a água, junto com os aerossóis, não retorna ao chão, mas é levada pelos ventos a outros locais (Silva-Dias et al., 2005).

Na Amazônia, as chuvas são provocadas por dois tipos de nuvens, as rasas e as profundas, convivendo na época mais limpa do ano que é durante a estação chuvosa. Na época poluída pela fumaça das queimadas, no entanto, as chuvas de nuvens rasas desaparecem e apenas raras chuvas de nuvens profundas são observadas, com muitos relâmpagos e trovões.

Medições de NCN mostraram que os aerossóis provenientes da fumaça da queima de biomassa aumenta drasticamente a concentração de NCN. Isso deve aumentar a estabilidade coloidal e o tempo de vida da nuvem, resultando em nuvens muito desenvolvidas e não precipitantes observadas durante a época das queimadas, com o raio limite da gota abaixo do requerido para a precipitação quente (Roberts et al., 2001).

As nuvens profundas são carregadas pelos ventos mais fortes de altitude e viajam até centenas de quilômetros para longe de seu local de origem, exportando os NCN dentro das gotas. Essa supressão de precipitação pode ter impactos importantes no funcionamento do ecossistema Amazônico. Outro aspecto importante na estrutura de nuvens durante a estação seca, com forte impacto de queimadas, é a presença significativa de partículas que absorvem radiação, o chamado “carbono preto”, que consiste em fuligem das queimadas. Gotículas de nuvens ricas em fuligem absorvem radiação muito eficientemente, evaporando-se antes de precipitarem, intensificando a supressão da precipitação. Com as altas concentrações de carbono preto durante a estação seca (de 5 a 40 $\mu\text{g m}^{-3}$),

esse fenômeno é particularmente importante na Amazônia, comparada com outras regiões do globo (Artaxo et al., 2003, 2005).

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 radiação 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 aglutinar para formar as grandes gotas que caem como chuva (Freitas & Longo, 2005).

As chuvas de nuvens rasas na estação chuvosa, por sua vez, devolvem os NCN à superfície praticamente no mesmo lugar em que foram gerados pela floresta. Por essa razão, pesquisadores desenvolveram o conceito de que a Amazônia, durante a estação chuvosa, consiste em um “oceano verde”, com estrutura de nuvens que não lembram áreas continentais, mas áreas oceânicas. Convencionalmente, foi feita uma distinção nos ambientes de NCN, dividindo-os em “marítimos” e “continentais”, os quais são caracterizados por concentrações de NCN baixas e altas, respectivamente. A maior parte das medidas consideradas “continentais” foram feitas nas regiões extratropicais e moderada a altamente poluídas (Roberts et al., 2001).

Roberts et al. (2001) discutem os resultados dos primeiros experimentos de medida de NCN na Bacia Amazônica, provendo conhecimento de seu papel fundamental no clima tropical continental, assim como as propriedades físico-químicas da atmosfera que permitem a ativação e subsequente crescimento de gotículas de nuvens. Esses resultados foram utilizados para examinar a validade da distinção entre concentrações de NCN “marítimas” e “continentais”.

As medidas foram feitas durante uma campanha que fez parte do LBA, a ‘CLAIRE’, de 28/3 a 15/4 de 1998 num posto observacional a 125 km a nordeste de Manaus, no Estado do Amazonas; não influenciado por fontes de emissões antropogênicas. Os resultados encontrados foram de que as concentrações de NCN estiveram baixas, na faixa tipicamente considerada como “marítima”. Tais concentrações eram consistentes com as observações de nuvens precipitantes quentes na bacia. Observações de campo sugerem que essas nuvens exibem uma estrutura convectiva menos desenvolvida, a qual é normalmente associada com as distribuições de NCN oceânicas. A despeito da qualidade “marítima” do espectro de NCN analisado, a longa distância do posto ao oceano e a alta frequência de chuva na época chuvosa faz que os aerossóis marítimos não possam contribuir muito na concentração de NCN no posto. A análise química da massa de aerossol mostrou 80% de material orgânico, que provavelmente originou-se de uma combinação de aerossol biogênico primário e a condensação de produtos oxidados semivoláteis de Carbono Orgânico Volátil (COV, como terpenos), emitidos pela vegetação da floresta.

As baixas concentrações de NCN encontradas sobre a Bacia Amazônica

não poluída confirma as condições previamente encontradas de ambientes marítimos (Roberts et al., 2001).

Uma realimentação positiva foi proposta para a atmosfera marítima onde o chuvisco remove NCN da camada limite e mantém a baixa concentração de NCN favorável para a precipitação; um *feedback* similar pode ser aplicado ao ambiente florestal. Desde que o aerossol intersticial cresce até se tornar NCN, o processo na nuvem que o remove provê um sumidouro para manter um estado equilibrado. Estudos mostraram que a modificação de propriedades da nuvem, como sua espessura, albedo (refletividade no topo da nuvem) e duração é mais sensível a concentrações iniciais baixas de NCN. Em razão da grande espessura típica das nuvens convectivas sobre o trópico úmido, uma modificação substancial no albedo pelo aumento de NCN não é observada (Silva-Dias et al., 2005).

Na estação chuvosa, quando predominam as emissões naturais, a concentração de partículas de aerossóis é da ordem de 10 a 15 $\mu\text{g m}^{-3}$, com uma concentração da ordem de 100 a 300 partículas cm^{-3} . Na estação seca, por causa das emissões de queimadas, a concentração em massa sobe para cerca de 300 a 600 $\mu\text{g m}^{-3}$, enquanto o número de partículas sobe para 15.000 a 30.000 partículas cm^{-3} (Artaxo et al., 2005).

A maioria das partículas biogênicas encontra-se na fração grossa, com diâmetros maiores que 2 μm , e tem como constituição especialmente fungos, esporos, fragmentos de folhas, bactérias, em uma enorme variedade de partículas. A maior parte das partículas são orgânicas, com traços de potássio, cálcio, magnésio, enxofre, fósforo, zinco e outros elementos. Observam-se concentrações muito reduzidas de partículas na estação chuvosa (da ordem de 10 a 15 $\mu\text{g m}^{-3}$), enquanto no período de agosto a outubro (estação seca), concentrações altíssimas são observadas (maiores que 100 $\mu\text{g m}^{-3}$) (Andreae & Crutzen, 1997).

Ciclo hidrológico

Estudos preliminares do balanço de água na bacia central da Amazônia indicaram que mais da metade da água que precipita retorna à atmosfera por meio da evapotranspiração, enquanto aproximadamente 45% é drenada pelos rios (Molion [1975] e Villa Nova et al. [1976] apud Salati et al., 1979). A entrada de ventos carregados de umidade do Oceano Atlântico é responsável por 52% da precipitação na região entre Belém e Manaus, enquanto o restante das chuvas origina-se da reciclagem de vapor d'água da própria área (Marques et al [1977] apud Salati et al., 1979). Assim, a bacia atua não somente como fonte de sua própria umidade, como dispara os processos de produção de chuva dinamicamente.

Usando uma metodologia de conteúdo de composição de isótopos estáveis de oxigênio-18 na chuva em uma rede de estações na Amazônia, no período de 1972 a 1973, Salati et al. (1979) chegaram à conclusão de que a fração líquida de umidade varia de 15% a 20% durante a época chuvosa a perto de 100% em outubro e novembro, quando a evapotranspiração mais ou menos compensa as perdas de água pela chuva.

Já Eltahir & Bras (1994) refutam a teoria de Salati et al. (1979) ao afirmarem que a precipitação em uma dada região é diretamente proporcional ao calor latente transportado verticalmente da camada limite para a alta troposfera. O aquecimento diabático associado com a condensação de vapor d'água é um importante mecanismo de transporte de energia e está fortemente acoplado à dinâmica da atmosfera tropical. A razão de reciclagem da precipitação é uma medida da quantidade de energia que provém da evaporação da Bacia Amazônica. Um quarto do calor latente emitido sobre a bacia resulta da reciclagem da energia líquida de superfície, a qual é consumida na evaporação pela floresta, enquanto o restante (três quartos) vem de advecção (transporte horizontal) de energia do Oceano Atlântico. A reciclagem de vapor d'água na Bacia Amazônica possui variabilidade sazonal e espacial significativa. A conclusão é que a atmosfera sobre a bacia não é um sistema fechado, sugerindo que o fluxo de ventos que sai da bacia carregando umidade tem importância nas regiões vizinhas.

Conclusão

Em vários dos artigos lidos, os autores afirmaram que “Infelizmente, há pouca informação que permite uma estimativa confiável de partículas biogênicas primárias no aerossol orgânico nas regiões tropicais” (Andreae & Crutzen, 1997);

Estudos para avaliar a liberação de COVs por plantas são ainda insuficientes frente ao elevado número de espécies de plantas e à grande diversidade das espécies químicas emitidas para a atmosfera. A estimativa do fluxo de vários compostos de uma dada região requer um conhecimento detalhado da composição química dos gases emitidos pela vegetação que contém. Apesar de pouco conhecida, as emissões pela vegetação nas regiões tropicais devem ter um papel importante no comportamento atmosférico, uma vez que nessas regiões existe uma ampla diversidade de espécies de plantas e uma grande complexidade da vegetação. (Souza et al., 2002)

Ou ainda, que

Os dados existentes sobre COVs e COSVs (compostos orgânicos semi-voláteis) na atmosfera, principalmente de áreas remotas, são insuficientes para a construção de cenários que se aproximem da realidade. Particularmente, poucas medidas têm sido feitas dos COVs oxigenados. Embora se estime que as florestas e savanas tropicais contribuam com metade da emissão de COVs no mundo, poucos dados de campo existem sobre estes compostos na Amazônia. (Aquino, 2006)

Então, os próprios autores reconhecem que existem dados insuficientes para afirmar que a floresta emita COV suficientes para atuarem como NCN.

Além disso, não se pode afirmar que “a Amazônia durante a estação chuvosa, consiste em um ‘oceano verde’, com estrutura de nuvens que não lembram áreas continentais, mas áreas oceânicas, onde na época poluída pela fumaça das queimadas, as chuvas de nuvens rasas desaparecem e apenas raras chuvas de nuvens profundas são observadas, com muitos relâmpagos e trovões” (Artaxo et al., 2003, 2005; Silva-Dias et al., 2002, 2005), porque, na época chuvosa, a for-

çante de grande escala (Zona de Convergência Intertropical) está atuando sobre a região, com formação de muitas nuvens de trovoadas. De fato, as queimadas podem ajudar como fonte de calor (forçante termodinâmica) e de aerossóis que irão atuar como NCN, mas isso não quer dizer que tais nuvens serão formadas só pelas queimadas.

Sem dúvidas, esforços para estudar e aprofundar os conhecimentos sobre a interação entre a floresta e a formação de nuvens e chuva são importantes por causa da relação entre esses processos e o ciclo hidrológico. Como pelo menos 20% a 30% das chuvas na região são originadas da própria floresta, a remoção dessa floresta para outros tipos de uso da terra com certeza causará impactos no clima local e regional, podendo até levar à diminuição da precipitação em regiões vizinhas onde a exportação da umidade da Amazônia é importante.

Referências

ANDREAE, M. O.; CRUTZEN, P. J. Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, v.276, 16 May 1997.

AQUINO, C.A.B. *Identificação de compostos orgânicos voláteis (NCNs) emitidos por florestas na Região Amazônica*. Cuiabá, 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Mato Grosso.

ARTAXO, P. et al. O mecanismo da floresta para fazer chover. *Scientific American Brasil*, v.11, p.40-5, abr. 2003.

_____. et al. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazônica*, v.35, n.2, p.185-96, 2005.

ELTAHIR, E. A. B.; BRAS, R. L. Precipitation recycling in the Amazon Basin. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, v.120, p.861-80, 1994.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. *Estudos Avançados*, v.19, n.53, p.167-85, 2005.

ROBERTS, G. C. et al. Cloud condensation nuclei in the Amazon Basin: “Marine” conditions over a Continent? *Geophysical Research Letters*, v.28, n.14, p.2807-10, 15 jul. 2001.

SALATI, E. et al. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. *Water Resources Research*, v.15, n.5, p.1250-8, out.1979.

SILVA-DIAS, M. A. F. et al. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region. *Journal of Geophysical Research*, v.107, n.D20, p.8072, 2002.

_____. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera da Amazônia. *Acta Amazônica*, v.35, n.2, p.215-22, 2005.

SOUZA, S. R. et al. Emissão por folhas de *Ficus benjamina* L. (Moraceae) de compostos orgânicos voláteis oxigenados. *Revista Brasil. Botânica*, v.25, n.4, p.413-18, dez. 2002.

RESUMO – Vários estudos para identificar as emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) na Amazônia sugerem que a atmosfera sobre a floresta, livre de poluentes, possui baixas concentrações de Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN), concentrações típicas da atmosfera marítima. Em tais condições, as propriedades microfísicas das nuvens são mais sensíveis ao acréscimo de NCN. Na Amazônia, a fonte primária biogênica é a própria vegetação da floresta. Então, um aumento nas emissões de NCN por atividades antropogênicas pode ter um forte impacto no clima local. Esses resultados são discutidos neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Compostos orgânicos voláteis, Nuvens, Precipitação.

ABSTRACT – Several studies showed that the atmosphere on the forest, free of pollutants, have low concentrations of Condensation Nuclei of the clouds, concentrations typical of the atmosphere at sea. In low concentrations of NCN, microphysics properties of clouds are more sensitive to the increase of NCN. In Amazon, the master source is the vegetation cover of the forest. Then, an increase in emissions of NCN by anthropogenic activities can have a strong impact on local weather. These results are discussed in this paper.

KEYWORDS: Volatil organic compound, Clouds, Precipitation.

João Paulo Nardin Tavares é mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do Pará / Embrapa Amazônia Oriental / Museu Paraense Emilio Goeldi.
@ – jpnt25@gmail.com

O autor agradece ao CNPq/Finep a bolsa DTI-III, e agradece a Steel Vasconcelos a revisão deste artigo.

Recebido em 17.6.2009 e aceito em 10.9.2010.

