

EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL PELO SEMINÁRIO

Alberto Nobre Mendes

Analzita Müller

Carlos Artur Krüger Passos

Herbert Otto Schubart

Ligia Aparecida de Arruda Camargo Lacerda

Nazaré Lima Soares

Vanessa Fleischfresser (Coordenação Geral)

EQUIPE DE APOIO

Simone Maria Azevedo

Regina Helena Furtado

Keloisa de Lacerda Medeiros

Warlison Leandro da Silva

Carlos Rogério Simões de Medeiros

Lorena Caroline Lyra de Oliveira

Maryara Pero de Almeida

Cláudia Dorneles

Depósito legal junto à Biblioteca Nacional, conforme decreto nº 1823,
de 20 de dezembro de 1907.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
Index Consultoria em Informação e Serviços S/C Ltda.
Curitiba - PR

Brasil. Ministério do Meio Ambiente	
B823	Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia / Ministério do Meio Ambiente. – Brasília : MMA, 2001. 436 p.
1. Desmatamento – Amazônia. I. Título.	
CDD (20. ed.)	634.96
CDU (2.ed.)	630*4(811)

IMPRESSO NO BRASIL / PRINTED IN BRAZIL

Conceitos emitidos e informações prestadas
nesta publicação são de inteira responsabilidade dos autores.

AMAZÔNIA: FONTE OU SUMIDOURO DE CARBONO?

*Carlos A. Nobre**

1 INTRODUÇÃO

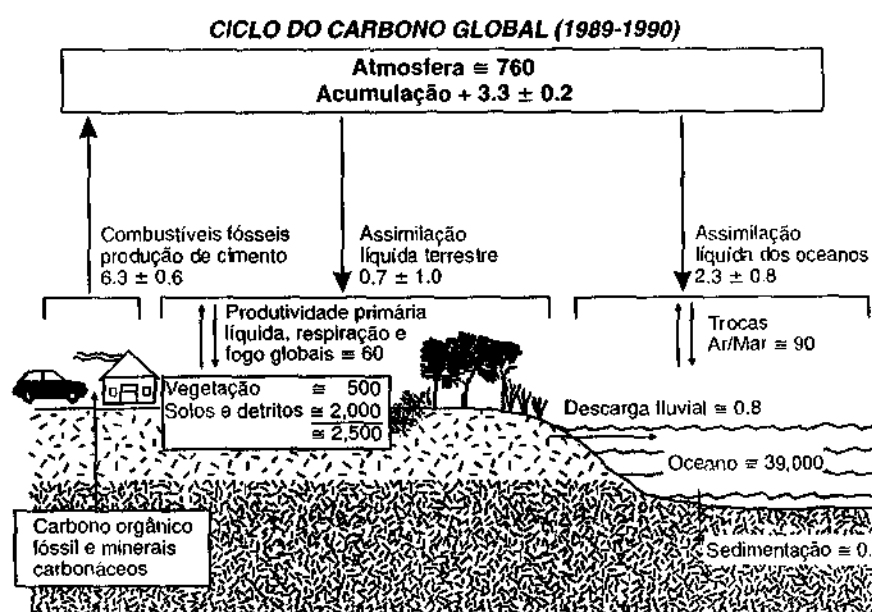
A Amazônia é fonte ou sumidouro de dióxido de carbono para a atmosfera global? Esta importante questão científica ainda permanece em aberto. Por muitas décadas, imaginou-se que a emissão devida aos desmatamentos e queimadas de crescentes áreas da floresta tropical inevitavelmente significaria que a região deveria ser fonte de CO₂ para a atmosfera. Entretanto, uma série de estudos recentes sobre o balanço de carbono da floresta não perturbada tem mostrado que estas florestas tropicais da América do Sul podem estar acumulando carbono por fotossíntese mais do que perdendo por respiração das plantas e decomposição da matéria orgânica, isto é, poderiam estar retirando (“seqüestrando”) carbono da atmosfera.

Isso pode ter implicações globais, como fica claro analisando a figura 1, que demonstra o balanço global de carbono para a década 1989-1998. (BOLIN et al., 2000) A figura mostra que há uma assimilação líquida da biota terrestre de $0,7 \pm 1,0$ Gton C/ano. Como, durante este período, estima-se que as emissões por mudanças dos usos da terra,

Engenheiro Eletrônico. Doutor em Meteorologia. Chefe do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ INPE. Coordenador geral do Experimento de grande escala sobre a Biosfera e a Atmosfera na Amazônia (LBA).

principalmente o desmatamento das florestas tropicais, tenham atingido $1,6 \pm 0,8$ Gton C/ano (HOUGHTON et al., 1999 e 2000, baseado em emissões médias anuais para o período 1989-95), a assimilação (seqüestro) total da biota terrestre foi de $2,3 \pm 1,3$ Gton C/ano. Portanto, é plausível admitir-se que as florestas tropicais, ao lado de florestas temperadas, estejam desempenhando um papel importante para o seqüestro de carbono, entre elas, as florestas tropicais da América do Sul.

FIGURA 1 - BALANÇO GLOBAL DE CARBONO



FONTE: Watson et al. (eds.), 2000.

Nota: Números em vermelho representam estoques nos reservatórios em Gton C (10^9 g de C) e números em azul representam fluxos em Gton C/ano.

Ainda que o inventário nacional de emissões não esteja concluído, o Brasil certamente está entre os 10 maiores emissores de gases de efeito estufa (é o sexto ou sétimo maior emissor de CO_2 e, possivelmente, o terceiro de CH_4 devido principalmente a mudanças dos usos da terra e pecuária) por ações antrópicas.

A questão da emissão dos gases de efeito estufa nos remete diretamente para a problemática das mudanças climáticas que poderiam resultar do aumento do efeito estufa da atmosfera terrestre. Os vários

cenários de mudanças climáticas para o país, em função dos diversos cenários de emissões para os próximos 100 anos, indicam a possibilidade de impactos climáticos significativos. No cenário “business as usual”¹ de crescimento das emissões dos gases de efeito estufa, os modelos climáticos indicam que poderá ocorrer aquecimento de 4 a 6 °C em partes do país (principalmente na Amazônia) até o final do século. Há ainda muita incerteza com relação às possíveis mudanças na precipitação pluviométrica e quanto às modificações na frequência de extremos climáticos (secas, inundações, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo etc.). De qualquer maneira, parece certo que o país estará sujeito a impactos climáticos adversos. Grande parte da população do país, em função da baixa renda e nível educacional, está especialmente vulnerável às mudanças climáticas, como já o está à variabilidade natural do clima atual, sendo exatamente aquela população com menores possibilidades de adaptação. Também as mudanças climáticas podem afetar o balanço de carbono na Amazônia.

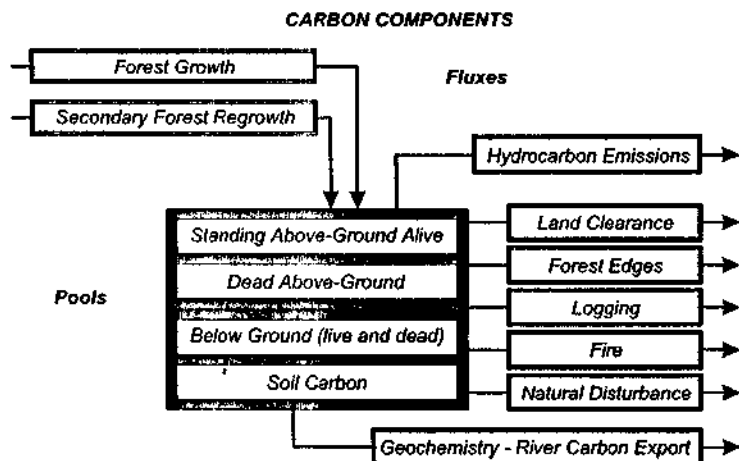
2 O BALANÇO DE CARBONO NA AMAZÔNIA

Os diversos componente do balanço de carbono para a Amazônia levando em conta processos naturais e efeitos da ação antrópica sobre o balanço é apresentado de forma esquemática na figura 2. Ainda que haja quantificação de apenas poucos dos termos do balanços de carbono para os ecossistemas amazônicos, uma primeira visão deste balanço já começa a emergir. De forma resumida, nosso conhecimento parcial sobre o ciclo de carbono na Amazônia é apresentado na figura 3: dispõe-se de uma primeira quantificação do efeito das mudanças dos usos da terra, principalmente o desmatamento de corte raso, ainda que com grande incerteza, detectou-se que a floresta não perturbada pode estar funcionando como sumidouro de carbono e busca-se quantificar e comprovar este importante efeito, e, por último, registra-se que não há quantificação das emissões devido à

¹ Refere-se à continuidade dos padrões de emissão dos gases do efeito estufa como observados nas últimas décadas, isto é, aumento exponencial das emissões da maioria dos gases.

fragmentação e degradação das florestas e incêndios florestais, fenômenos estes que se tornam a cada dia mais freqüentes dado o avanço da fronteira ocupação sobre a floresta.

FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO COM OS COMPONENTES DO BALANÇO DE CARBONO NA AMAZÔNIA



Nota: Blocos em verde e em marrom representam os reservatórios (estoques) de carbono acima e abaixo do solo, respectivamente. Blocos em azul e vermelho representam os fluxos de entrada e saída, respectivamente, de carbono nos ecossistemas.

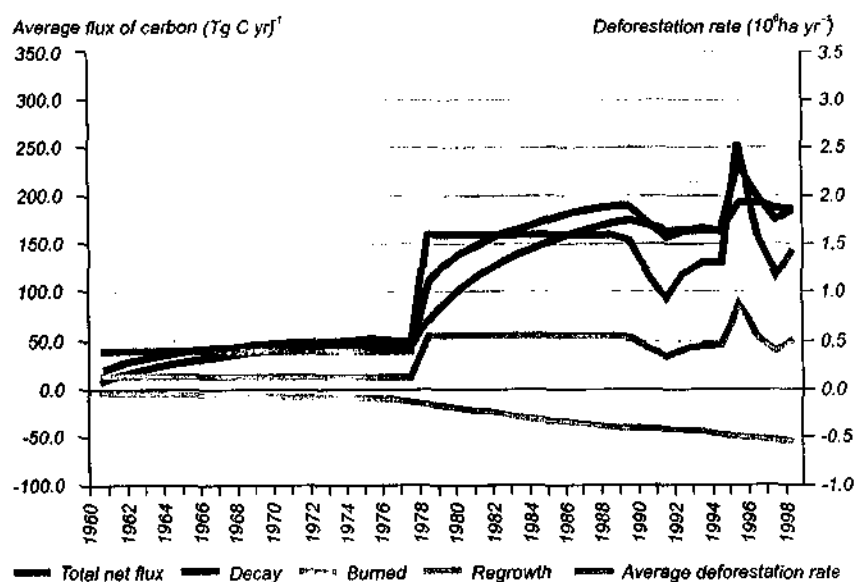
FIGURA 3 - SUMÁRIO DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES SOBRE O CICLO DE CARBONO NA AMAZÔNIA

- **Ciclo de Carbono na Amazônia: Fonte ou Sumidouro?**
- **Mudança do Uso da Terra**
 - Fonte (Queima de Biomassa + Decomposição + Extração Madeireira) –
 - Sumidouro (Rebrota) \cong
 - + (200 \pm 100) Mton C/ano (Média 1988-1998)**
- **Florestas não perturbadas aparentemente estão acumulando carbono a altas taxas \cong**
 - 1 a 6 ton C/ha/ano**
- **Fragmentação e degradação florestal e incêndios florestais acidentais:**
 - + Quantificação das emissões?**

2. 1 Emissões de Dióxido de Carbono por Mudanças nos Usos da Terra

Anualmente enormes extensões na Amazônia são desmatadas para dar lugar, principalmente, à agricultura de subsistência e à pecuária extensiva. Estima-se que a área desmatada situa-se, nos últimos anos, entre 15 e 20 mil km² por ano na Amazônia brasileira (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2000) O balanço de carbono para a Amazônia brasileira na década de 1990 devido a mudanças dos usos da terra é apresentada na figura 4. (HOUGHTON et al., 2000) Desmatamentos e queimadas representam emissões médias na década de 1990 de cerca de (200 ± 100) Mton C/ano.²

FIGURA 4 - ESTIMATIVAS DO BALANÇO DE CARBONO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA DEVIDO A MUDANÇAS DOS USOS DA TERRA



FONTE: Houghton et al., 2000.

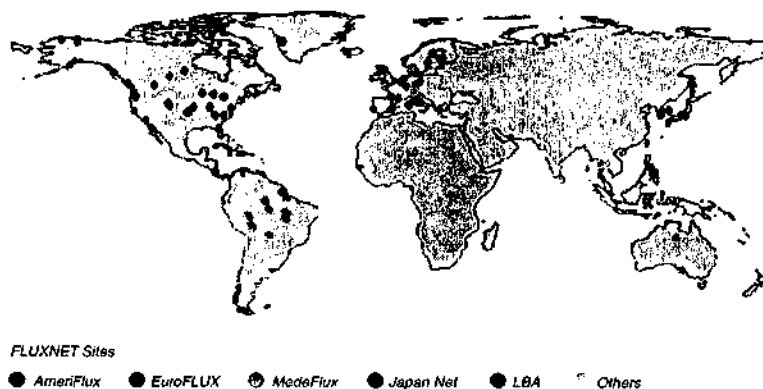
² O alto valor da incerteza associada a essa estimativa (± 100 Gton C/ano) deve-se, em primeiro lugar, às incertezas na estimativa da biomassa em toda Amazônia. Em Houghton et al. (2000) foram utilizados três valores para a biomassa: alto (232 Mton C/ha), média (210 Mton C/ha) e baixa (145 Mton C/ha). Este trabalho utilizou 20% como taxa da biomassa que é queimada. Este valor é mais baixo do que as estimativas mais recentes de cerca 40% de taxa de queima (CARVALHO Jr. et al., 2000). Esta diferença não mudaria significativamente o total de emissões da década, mas somente a distribuição temporal das emissões, aumentando as emissões da segunda metade da década devido ao alto valor de desmatamento em 1995.

Por comparação, estima-se que o total de emissões por queima de combustíveis fósseis e produção de cimento do país em 1994 foi de (65 ± 7) Mton C/ano (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2000a), isto é, as emissões de CO₂ por mudanças dos usos da terra na Amazônia por si só são 2 a 3 vezes maiores que as emissões brasileiras de CO₂ por queima de combustíveis fósseis.

2.2 O Papel das Florestas Não Perturbadas

Por outro lado, estudos recentes baseados em medidas locais por longos períodos dos fluxos turbulentos de CO₂ acima do dossel da floresta em vários sítios experimentais de pesquisa na Amazônia (veja figura 5) indicam que a floresta tropical amazônica não perturbada tem funcionado como sumidouro de carbono a taxas entre 1 a 6 ton C/ha/ano (GRACE et al., 1996, MALHI et al., 1998; MALHI et al., 1999; NOBRE, A, et al., 2000), como ilustrado nas figuras 6, 7, 8, 9 e 10. Esta última apresenta um sumário ainda incipiente do conhecimento atual sobre o balanço de carbono na Amazônia.

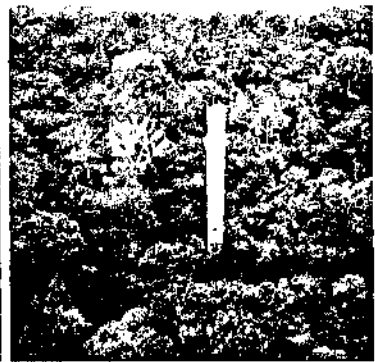
FIGURA 5 - REDE DE ESTAÇÕES DE MEDIDA DE FLUXOS DE CARBONO DE ECOSISTEMAS



NOTA: Em verde na América do Sul a rede de torres de medidas de fluxos de carbono do Experimento LBA na Amazônia.

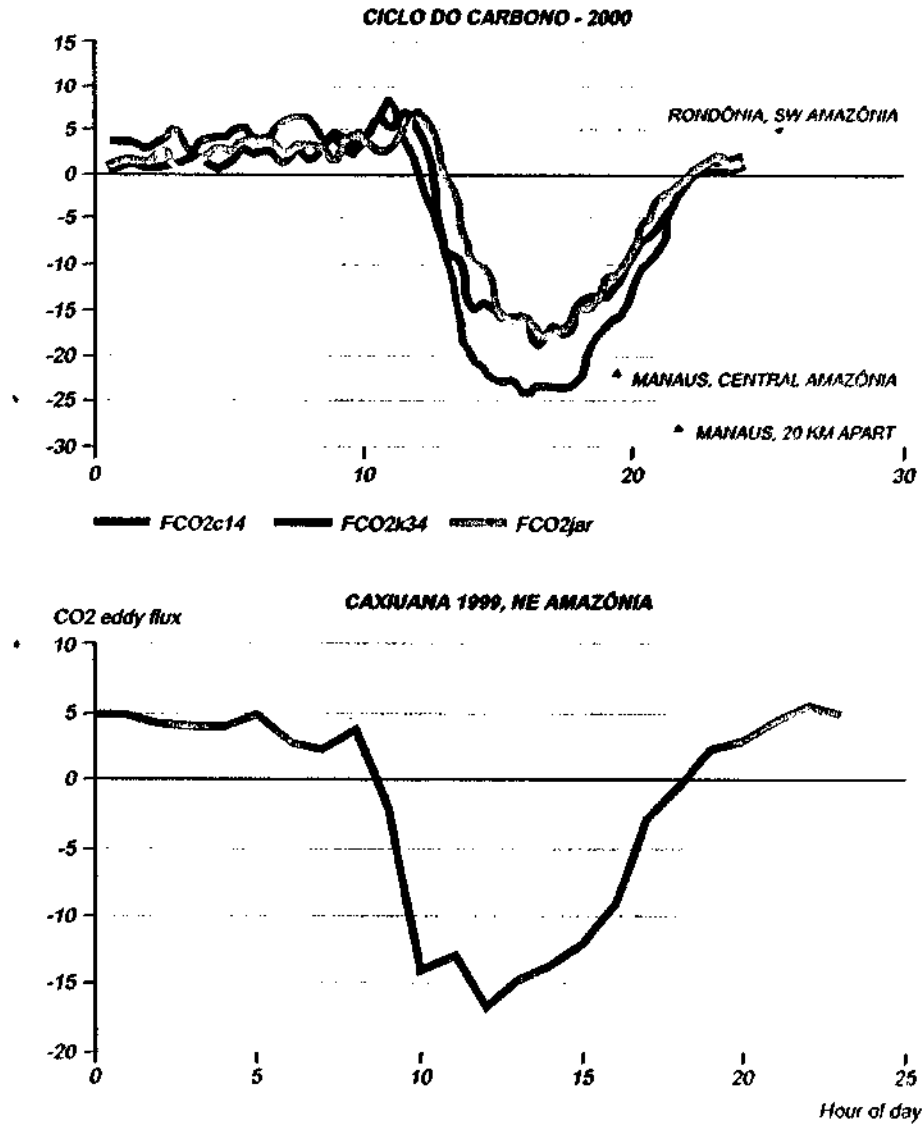
FIGURA 6 - TORRES DE MEDIDAS DE FLUXOS DE CARBONO EM DIVERSOS SÍTIOS EXPERIMENTAIS DO EXPERIMENTO LBA NA AMAZÔNIA

Torres de medida de fluxos de carbono do LBA em Manaus e Rondônia.



Torres de medida de fluxos de carbono do LBA em operação na Reserva Ecológica REBIO Jaru, em Rondônia.

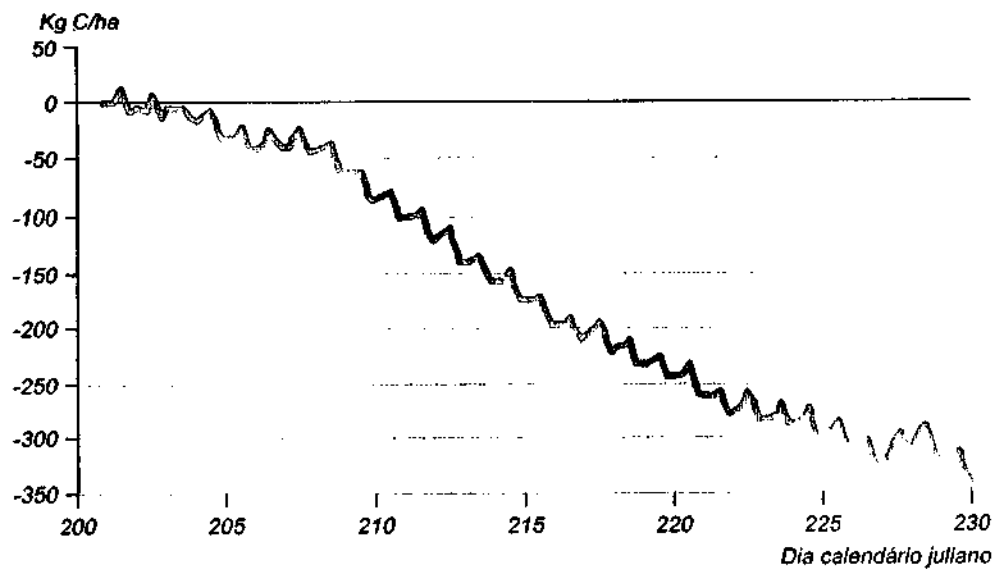
FIGURA 7 - CICLO DIURNO MÉDIO DO FLUXO DE CARBONO PARA FLORESTAS NÃO PERTURBADAS NA AMAZÔNIA



FONTE: Projeto LBA, cortesia de Antonio Nobre (dados de Manaus), Consórcio Brasil-Europa (dados de Rondônia e Caxiuana).

NOTA: Unidade: mmol/m²/s. Diagrama superior: dados de torres em Rondônia (Reserva Biológica do Jarú) e duas torres na Reserva Biológica do Cueiras, 100 km ao norte de Manaus. Note que estas duas torres encontram-se separadas por distância de somente 20 km, mas apresentam comportamento bem diferente durante o horário de máxima assimilação. Diagrama inferior: dados da torre em Caxiuana, a oeste da Ilha de Marajó.

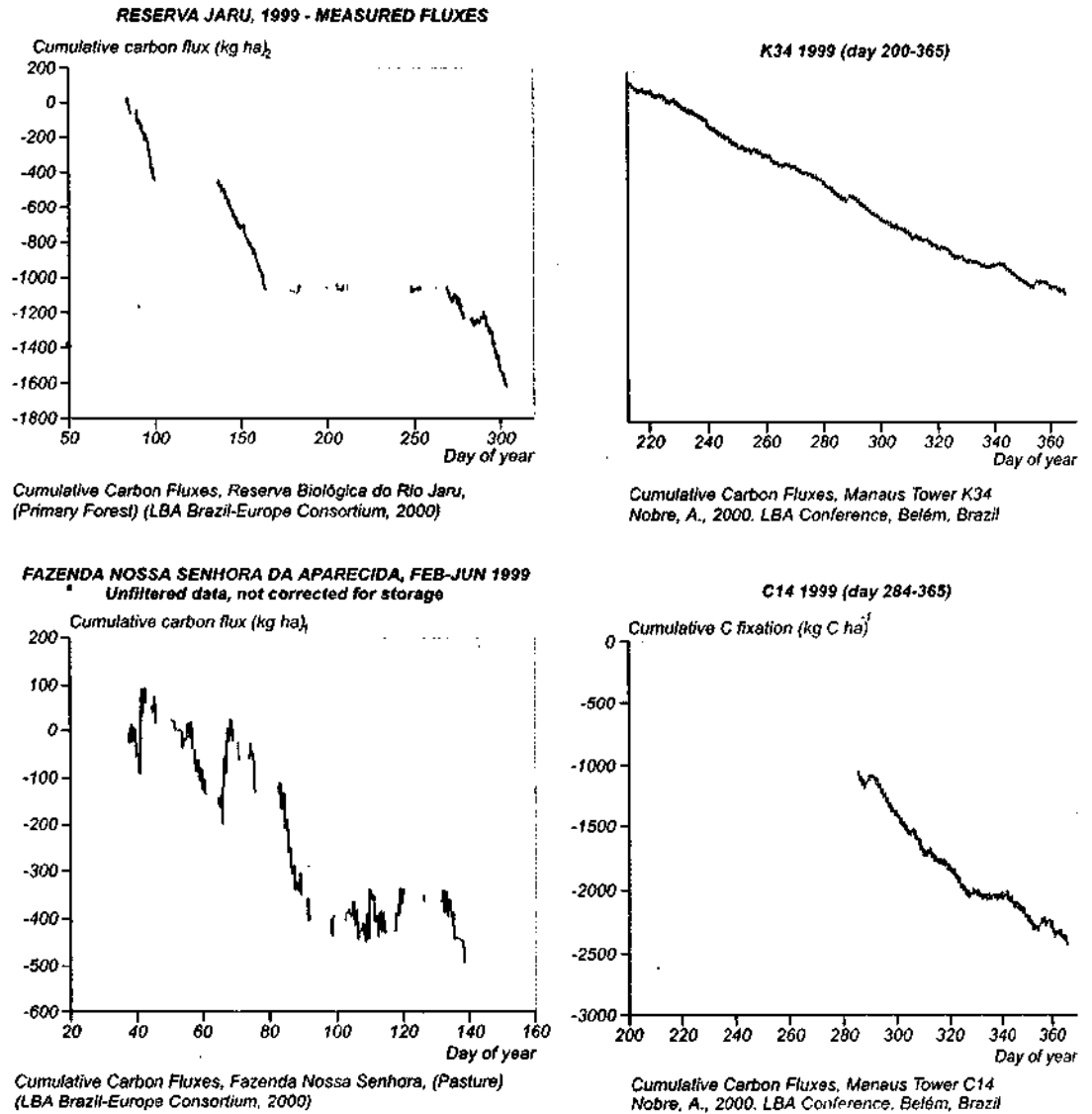
FIGURA 8 - ACUMULAÇÃO DE CARBONO MEDIDA EM TORRE ACIMA DA FLORESTA NÃO PERTURBADA NA RESERVA BIOLÓGICA DO CUEIRAS*, NO PERÍODO DE 30 DIAS A PARTIR DE 19 DE JULHO DE 1999



FONTE: Projeto LBA.

* Reserva Biológica do Cueiras - 100 km ao norte de Manaus. Unidade: Kg C/ha.

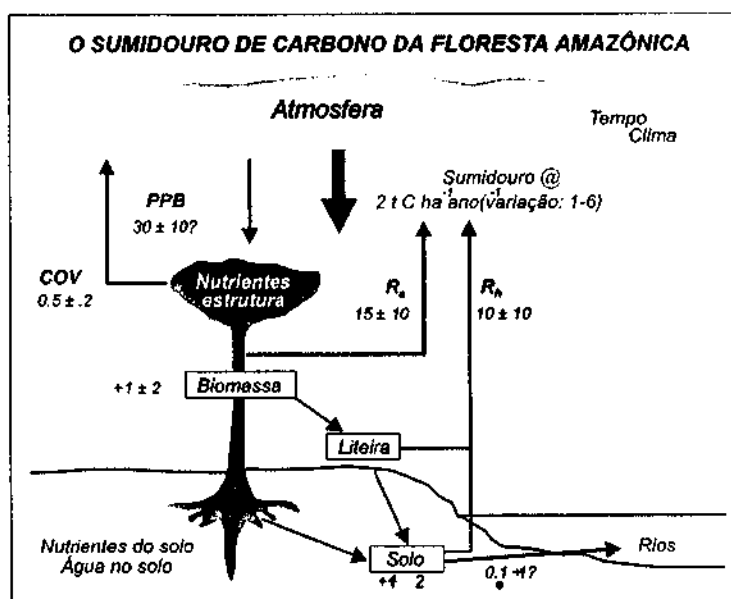
FIGURA 9 - COMPARAÇÃO DE FLUXOS DE CARBONO CUMULATIVOS PARA ÁREAS DE PASTAGEM¹ E FLORESTA EM RONDÔNIA² E PARA DUAS ÁREAS DE FLORESTA EM MANAUS³



FONTES: Projeto LBA, cortesia de Antonio Nobre (dados de Manaus), Consórcio Brasil-Europa (dados de Rondônia). Números negativos indicam fluxos para a vegetação, isto é, acumulação de carbono.

NOTAS: (1) Canto inferior esquerdo
 (2) Canto superior esquerdo
 (3) Lado direito.

FIGURA 10 - SÍNTESE PRELIMINAR DO CICLO DE CARBONO DA FLORESTA TROPICAL NA AMAZÔNIA



FONTE: Projeto LBA, Consórcio Brasil-Europa.

Unidades: $\text{t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. PPB= produtividade primária bruta; R_a = respiração autotrófica; R_h = respiração heterotrófica; COV= compostos orgânicos voláteis.

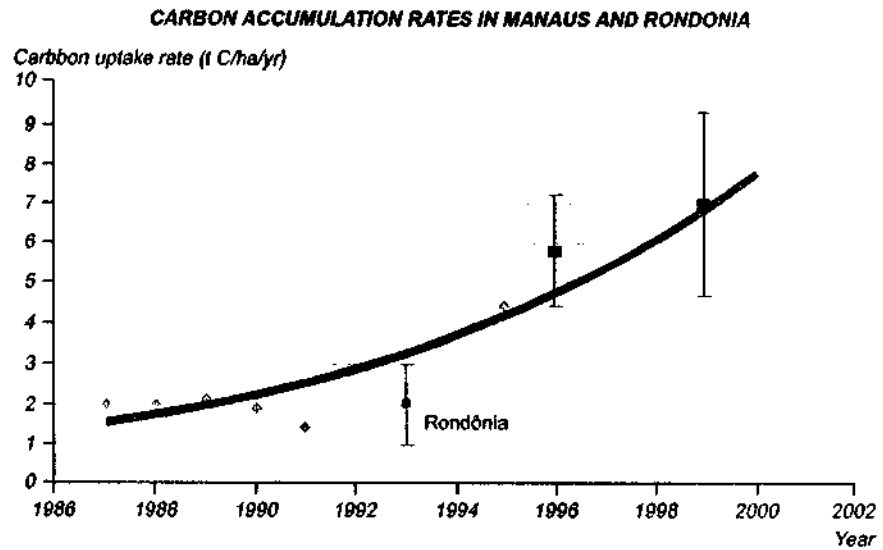
Nos últimos anos, surgiram estudos independentes que corroboram as medidas diretas de fluxos de carbono sobre florestas. Estudos baseados em inventários florestais (figura 11a de MALHI et al., 1998, e figura 11b de PHILLIPS et al., 1998) e baseados no cálculo de inversão dos transportes atmosféricos de CO_2 (CIAIS et al., 1995; REYNER et al., 2000), apresentados nas figuras 12 e 13,³ também colocam a Amazônia

³ A figura 12 mostra a rede global dos locais onde se coletam amostras de ar (frascos) para medidas precisas (precisão de 0,1 ppmv) de concentração atmosférica de CO_2 . Munido da informação de concentração, a partir dos ventos globais, é factível o cálculo dos transportes globais de CO_2 . Em geral, dados as fontes e os sumidouros de uma espécie na atmosfera e os ventos tridimensionais globais, é possível calcular as concentrações por meio da equação de conservação da espécie. Se, ao invés da distribuição de fontes e sumidouros, forem conhecidas as concentrações da espécie, pode-se inverter a equação de conservação e calcular a distribuição de fontes e sumidouros. O uso de modelos oceânicos contendo o ciclo de carbono permite especificar as fontes e sumidouros sobre os oceanos, portanto, do cálculo descrito acima, pode-se extrair as fontes e sumidouros sobre os continentes. Um exemplo deste cálculo é apresentado na figura 13. (REYNER et al., 2000)

como sumidouro de parte do excesso de CO₂ na atmosfera com totais entre 0,2 e 0,5 Gton C/ano (lembrando que a biota terrestre re-assimila cerca de $(2,3 \pm 1,3)$ Gton C/ano das cercas de $(7,9 \pm 1,3)$ Gton C/ano lançadas na atmosfera por queima de combustíveis fósseis $(6,3 \pm 0,6)$ e mudanças nos usos da terra $(1,6 \pm 1,0)$, como em Bolin et al., 2000), isto é, a Amazônia poderia responder por 10 a 20% do sumidouro global de carbono da biota terrestre.

Retornemos à figura 10 com um sumário sobre o conhecimento atual dos termos do balanço de carbono na Amazônia. Há ainda muitos aspectos biogeoquímicos do ciclo de carbono na Amazônia que necessitam ser entendidos para explicar os mecanismos que fazem com que aparentemente a floresta comporte-se como sumidouro. Este efeito aparente de sumidouro se deve ao aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, o chamado efeito de “fertilização” de CO₂, tornando as espécies vegetais mais eficientes na assimilação fotossintética de carbono? Ou seria somente parte da variabilidade climática natural na qual a floresta estaria somente se recuperando de mortalidade resultante de seca no passado recente (KELLER et al., 1997), ou de outras perturbações como fogo, pestes ou derrubadas por ventos (“blowdowns”)? Há um debate técnico em andamento sobre se as medidas de fluxos de CO₂ em torres sobre a floresta teriam um viés para assimilação de carbono pelo fato de que o sensor, que é localizado normalmente 20 a 30 m acima do dossel, poderia não estar registrando parte do CO₂ respirado pelo ecossistema. É a chamada “perda por drenagem lateral a noite”, isto é, em noites sem vento o CO₂ chegaria até o nível do topo do dossel e drenaria seguindo a inclinação do terreno, não sendo, portanto, registrada pelo sensor. Apesar de este mecanismo, mesmo que estiver ocorrendo, ser incapaz de explicar os altos valores de assimilação medidos, no Experimento LBA, ele está sendo investigado em detalhes.

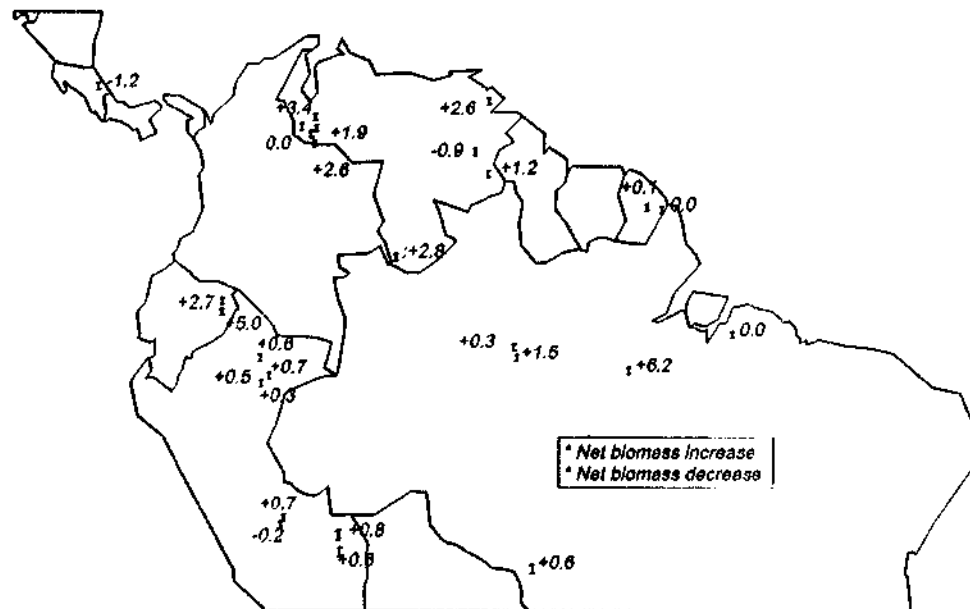
FIGURA 11A - ACUMULAÇÃO DE CARBONO MEDIDO EM INVENTÁRIO FLORESTAL NA RESERVA BIOLÓGICA DO CUEIRAS DOS ANOS 80 ATÉ 1995



FONTE: Malhi et al., 1998.

NOTA: Anos 80 até 1995 (losângulos azuis e curva com melhor ajuste aos pontos) e, para comparação, medidas de acumulação de fluxos em torres em Rondônia e Manaus (quadrados vermelhos com barras verticais indicando incerteza destas medidas).

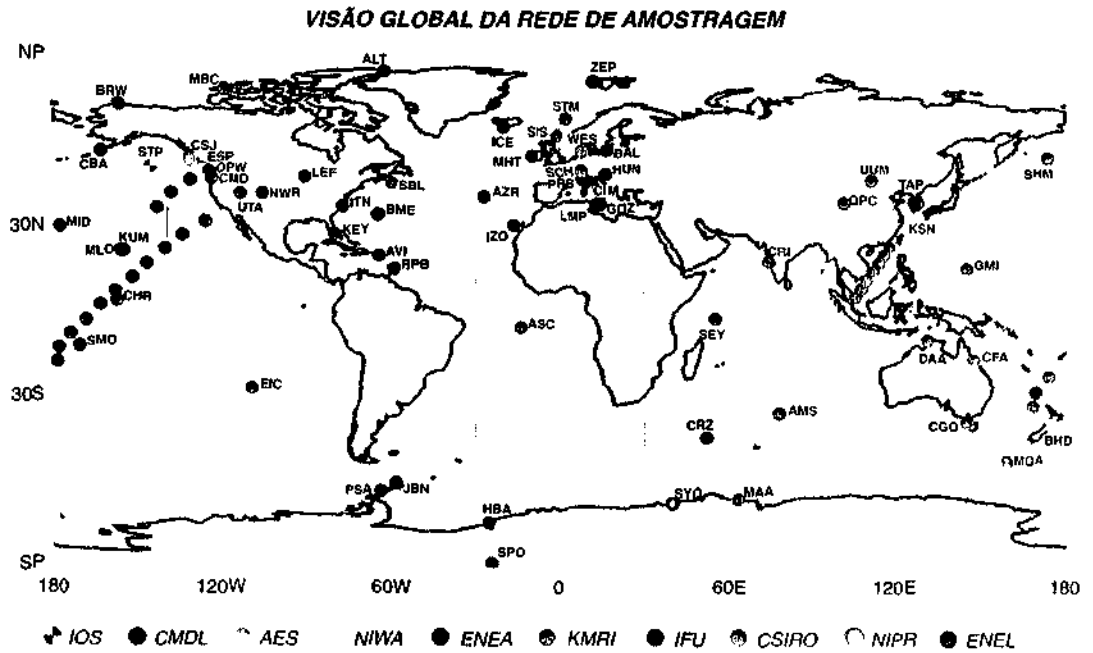
FIGURA 11B - SUMÁRIO DE MEDIDAS DE ACUMULAÇÃO OU PERDA DE CARBONO DERIVADAS A PARTIR DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS PARA A AMÉRICA DO SUL TROPICAL



FONTE: Phillips et al., 1998.

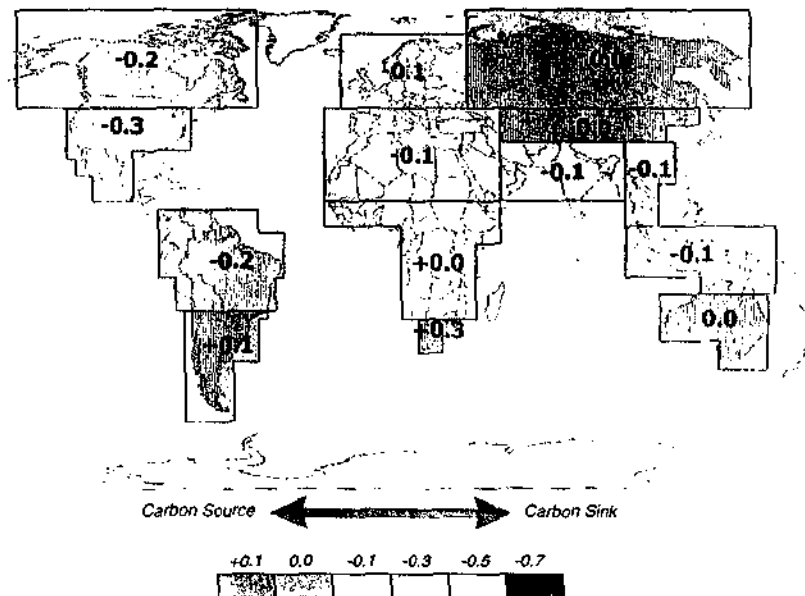
NOTA: Total uptake in South American forest biomass: 0.5 Gt C yr⁻¹

FIGURA 12 - REDE GLOBAL DE FRASCOS DE COLETAS DE AR PARA OBSERVAÇÕES PRECISAS DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO



NOTA: Várias estações têm mais de um grupo de medidas.

FIGURA 13 - ESTIMATIVA DE BALANÇO LÍQUIDO DE CARBONO DA BIOSFERA TERRESTRE (Gto C/ano) CALCULADO A PARTIR DOS REGISTROS DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO OBTIDOS NAS ESTAÇÕES DA FIGURA 12 - 1980-89



FONTE: Derivado de Rayner et al., 2000.

Entretanto, com as mudanças climáticas (aquecimento global) este sumidouro poderá saturar, isto é, as florestas tropicais passariam de sumidouros a fontes uma vez que o aquecimento do solo poderia acelerar a taxa de decomposição da matéria orgânica na liteira e no solo. Há ainda enorme incerteza sobre a escala de tempo em que esta possível saturação dos sumidouros que seqüestram carbono ocorrerá, se em meados do Século XXI ou se em prazos mais longos. (BOLIN et al., 2000) Em resumo, o balanço de evidências impede que seja descartada a possibilidade de que a floresta tropical amazônica esteja, de fato, funcionando como um sumidouro de carbono para a atmosfera, mas também parece evidente que não continuará a desempenhar este papel indefinidamente.

3 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A AMAZÔNIA E IMPACTOS NOS ECOSISTEMAS⁴

A continuar o padrão atual de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera resultantes de ações antrópicas, há altíssima probabilidade de que haverá mudanças climáticas globais de grande magnitude ocorrendo nos próximos 100 anos.⁵ Entre elas, as mais significativas para o país são o aumento de temperatura, modificações nos padrões de chuvas e alterações na distribuição de extremos climáticos, tais como secas, inundações, penetração de frentes frias, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo etc.

⁴ Esta seção é baseada parcialmente na contribuição do autor a documento elaborado pela SBPC sobre mudanças climáticas para o Brasil e conseqüências para posição brasileira nas negociações do Protocolo de Kioto.

⁵ A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, estabelecida no Rio de Janeiro em 1992 e, decorrente da Convenção, o Protocolo de Quito, de 1997, prevêem a estabilização e mesmo redução dos gases de efeito estufa em nível mundial. Entretanto, a Convenção previa a estabilização das emissões em 2000 aos níveis de 1990, porém isto não somente não aconteceu, como, ao contrário, as emissões continuaram a crescer tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento, exceção feita às repúblicas que compõem a ex-URSS onde as emissões foram reduzidas devido ao colapso econômico.

Evidências científicas recentes apontam para uma intensificação da variabilidade climática associada a eventos El Niño/La Niña em função do aumento do efeito estufa.⁶ O previsto aumento do nível médio do mar poderá trazer conseqüências para os ecossistemas e populações humanas nas áreas costeiras e nas áreas ribeirinhas que sofrem a influência das marés.

Dado um cenário de emissões de GEE do presente até, digamos, 2100, usualmente utilizam-se modelos climáticos globais⁷ para se estimar as mudanças climáticas globais que possam ocorrer. Desta maneira, geram-se cenários de alterações climáticas globais consistentes com um dado cenário de emissões de GEE. Vários centros meteorológicos avançados, que dispõem de modelos climáticos complexos, rotineiramente realizam este tipo de simulação. Recentemente o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate*

⁶ Os impactos climáticos dos episódios de El Niño e La Niña de aquecimento e resfriamento, respectivamente, das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial são bastante significativos na Amazônia. Há uma tendência para chuvas deficientes no centro, norte e leste da Amazônia em anos de El Niño e aproximadamente o oposto, isto é, chuvas abundantes, em anos de La Niña. O avanço do conhecimento destes fenômenos já permite sua previsão com muitos meses de antecedência.

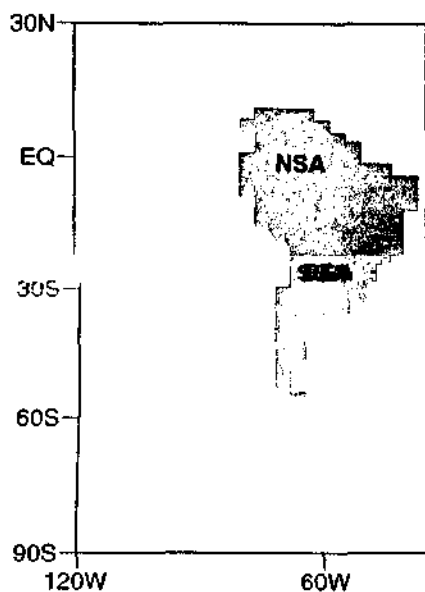
⁷ Modelos climáticos globais nada mais são do que longos programas de computador ("código computacional") onde se resolvem numericamente aproximações das equações matemáticas que representam as Leis Físicas (leis de conservação da quantidade de movimento, de massa, de energia, de água na atmosfera e de sal no oceano, lei do gás ideal para a atmosfera). Estas Leis regem os movimentos na atmosfera e as correntes nos oceanos, a interação entre estes dois fluidos e a interação da atmosfera com a vegetação. Os cálculos são feitos dividindo-se a atmosfera e os oceanos em "volumes elementares" ("discretização"), normalmente da ordem de algumas centenas de quilômetros na horizontal para a atmosfera e de 50 a 200 km para os oceanos e de centenas de metros a poucos quilômetros na vertical tanto no oceano como na atmosfera. Os cálculos são feitos em intervalos finitos de tempo, normalmente de 30 minutos a 1 hora. Estes modelos possuem representações físicas de como a radiação visível e infravermelha (térmica) interage com as moléculas presentes na atmosfera (principalmente, N₂, O₂, O₃, H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, clorofluocarbonos, CFC) e com as nuvens (gotículas d'água) e aerossóis. Desta maneira, é possível simular o efeito de aumentar-se a concentração de GEE. Estes cálculos são realizados para simular o comportamento do sistema climático por séculos, demandando supercomputadores de altíssimo desempenho.

Change, IPCC) concluiu um estudo sobre cenários de emissões (IPCC, 2000) e, baseado nestes e em resultados de 10 simulações com modelos climáticos globais cobrindo, pelo menos, o período de 1870 a 2100, foram elaborados cenários de alterações climáticas para várias regiões do planeta, incluindo cenários para o norte da América do Sul. (CARTER and HULME, 2000)

O estudo do IPCC sobre cenários futuros de emissões elaborou várias famílias de cenários, correspondendo a possíveis e diferentes “trajetórias” socioeconômicas para evolução do planeta no século XXI. Nas projeções de Carter e Hulme, foram utilizados quatro desses muitos cenários, designados B1, B2, A1 e A2. As mudanças nas emissões de GEE em 2100, em relação às emissões em 2000, variam entre um decréscimo de 4% (cenário B1 de baixas emissões) até um máximo aumento de 320% (cenário A2 de altas emissões, que é próximo do que se convencionou chamar de *business-as-usual*, isto é, as emissões continuam a crescer como nas últimas décadas). A concentração de CO₂ na atmosfera aumenta de um valor de aproximadamente 370 partes por milhão em volume (ppmv) em 1999 para cerca de 550 ppmv em 2100 (cenário B1) e para mais de 830 ppmv (cenário A2), isto é, cerca de três vezes a concentração antes da era industrial de cerca de 280 ppmv. A concentração dos outros GEE (principalmente CH₄, N₂O, e O₃ troposférico) também aumenta neste cenários. Os demais cenários (B2 e A1) são semelhantes um ao outro e intermediários entre o cenário de baixa emissão (B1) e o cenário de alta emissão (A2).

As projeções do estudo do IPCC para a América do Sul tropical (figuras 14 e 15) mostram, de modo geral, um aumento de temperatura até 2080 de aproximadamente 1 °C (cenário B1 de baixa emissão) até mais de 6 °C (cenário A2 de alta emissão) em 2080. Com relação à precipitação, o nível de incerteza é ainda muito grande. Em primeiro lugar, as diversas simulações numéricas não concordam entre si. Para os trimestres MAM, JJA e SON no norte da América do Sul, há simulações que indicam aumento de precipitação, enquanto outras mostram redução. Somente para o trimestre DJF, há predominância de simulações indicando aumento de precipitação. Em termos de magnitudes, as mudanças de precipitação situam-se entre 0 e ±3% para o cenário B1 e entre 0 e ±10% (até + 15% para o trimestre MAM) para o cenário A2 em 2080.

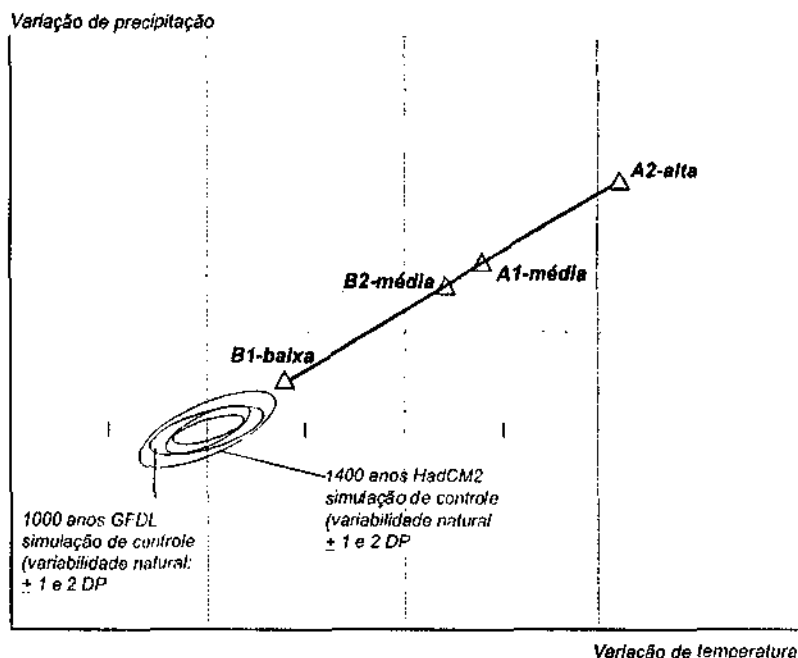
FIGURA 14A - MAPA MOSTRANDO A REGIÃO DA AMÉRICA DO SUL (NSA) APRESENTADA NA FIGURA 15



FONTE: Adaptado de Carter and Hulme, 2000

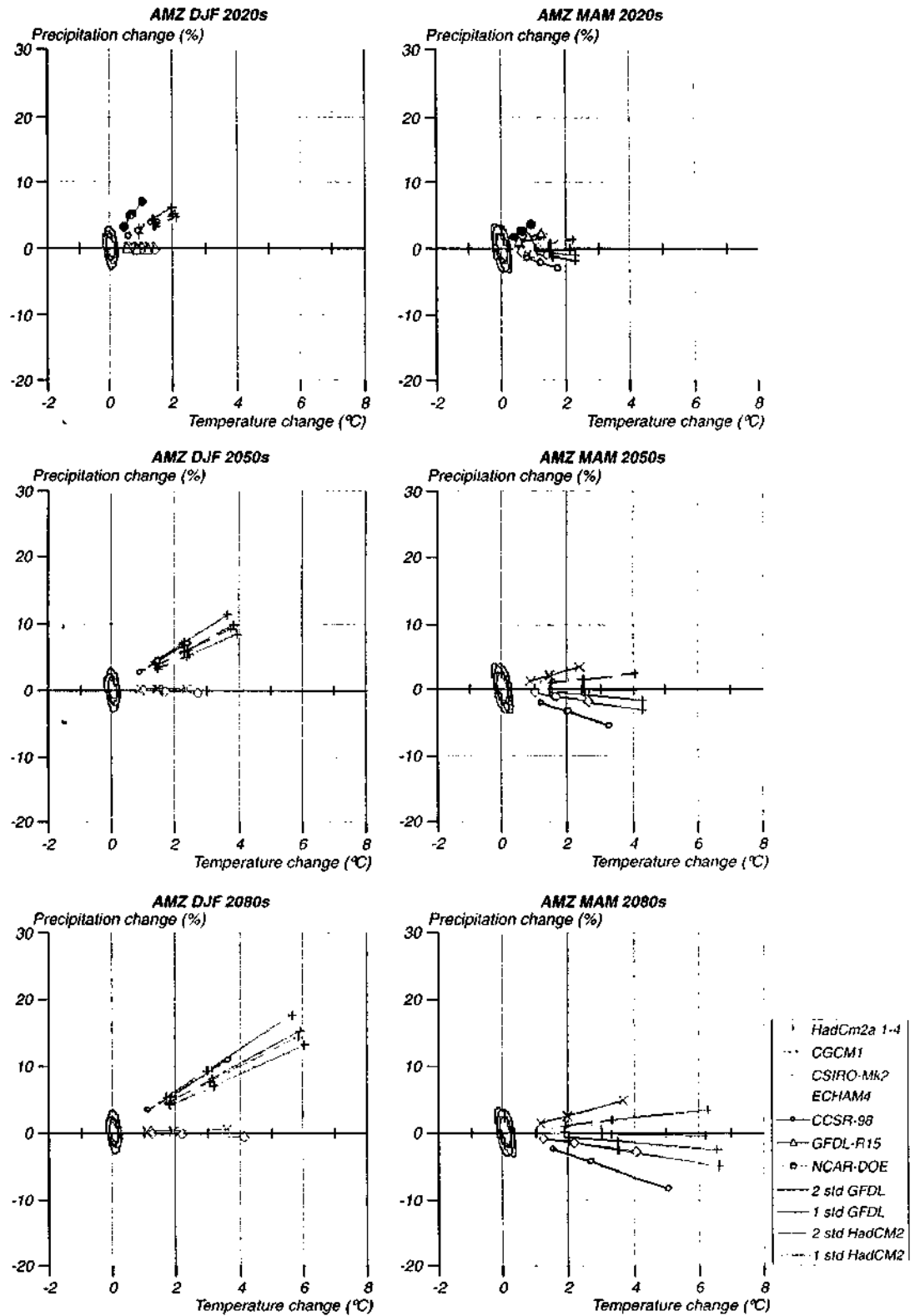
NOTA: As regiões são definidas na grade do modelo climático HadCMs. Os domínios regionais são ligeiramente diferentes para cada um dos outros modelos climáticos.

FIGURA 14B -CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS DIAGRAMAS DE ESPALHAMENTO ("SCATTER PLOTS") DAS MUDANÇAS SAZONAIS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO PARA OS 4 CENÁRIOS DE EMISSÕES SRES, APRESENTADOS NA FIGURA 15



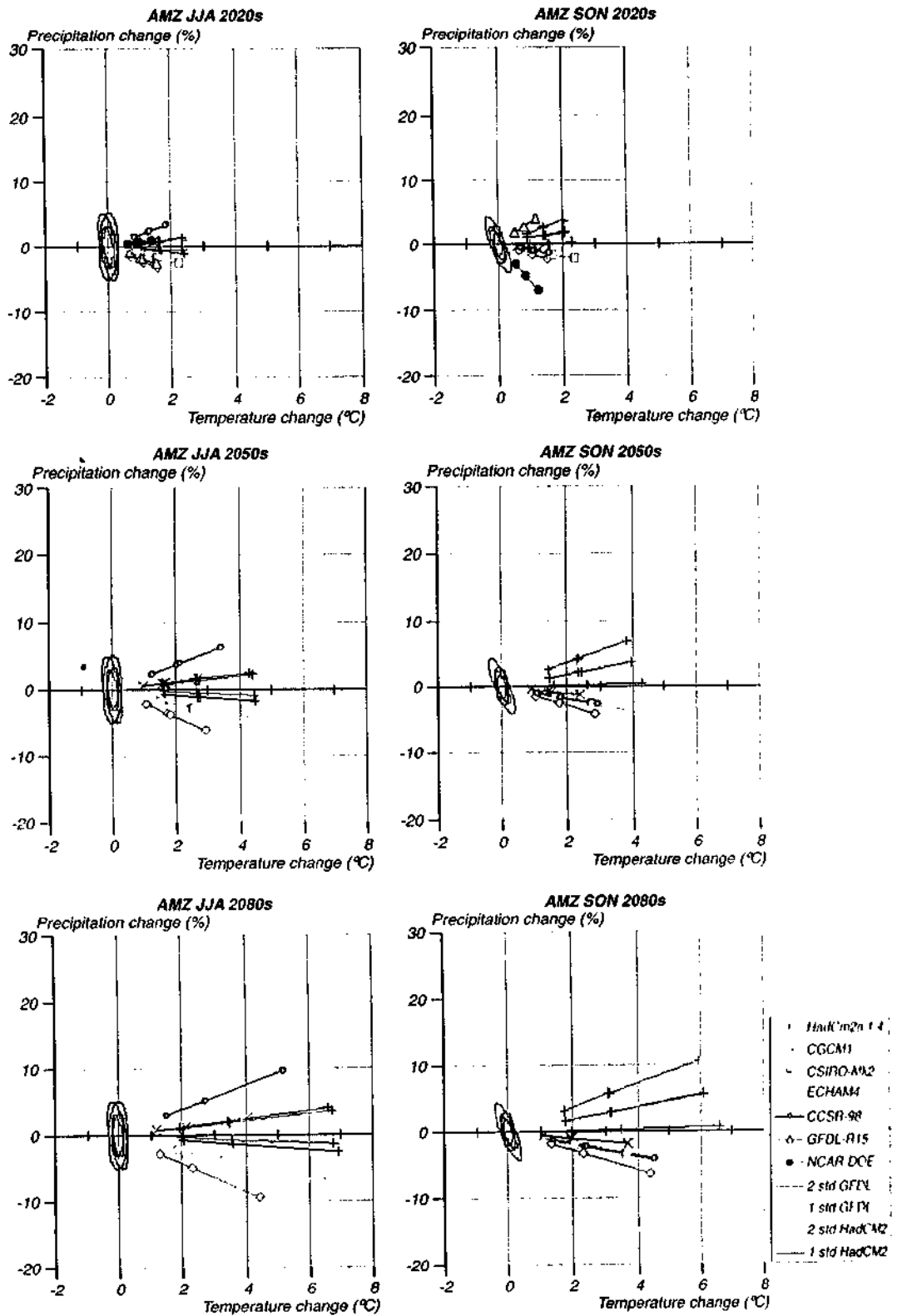
FONTE: Adaptado de Carter and Hulme, 2000

FIGURA 15A - NORTE DA AMÉRICA DO SUL (NAS) - DEZEMBRO-FEVEREIRO E MARÇO-MAIO



FONTE: Adaptado de Carter e Hulme, 2000.

FIGURA 15B - NORTE DA AMÉRICA DO SUL (NAS) - JULHO-AGOSTO E SETEMBRO-NOVEMBRO



FONTE: Adaptado de Carter e Hulme, 2000.

O nível de incerteza com relação a mudanças da frequência de ocorrência de extremos climáticos é ainda maior do que para a distribuição das precipitações pluviométricas. Espera-se, no entanto, que, devido ao aumento da temperatura nas camadas atmosféricas próximas à superfície, esta irá reter mais vapor d'água, o que poderá provocar uma "aceleração" do ciclo hidrológico,⁸ possivelmente aumentando a ocorrência de extremos como tempestades severas. Entretanto, apesar da plausibilidade desta hipótese sob o ponto de vista físico, ela necessita ainda ser comprovada.

A incerteza com relação ao sinal das mudanças de precipitação torna, no momento, impossível estabelecer categoricamente os efeitos das mudanças climáticas globais sobre os ecossistemas amazônicos e sobre a atividade agrícola, principalmente quando se considera que, estando a Amazônia situada em regiões tropicais, fora do alcance de geadas e temperaturas muito baixas, o fator climático determinante é o regime de chuvas. Como mostrado acima, há ainda grande incerteza sobre as mudanças nos regimes pluviométricos em escala regional.

Para a Amazônia, em particular, se houver redução de precipitações induzidas pelas mudanças climáticas globais, estas se somam às reduções previstas como resposta ao desmatamento (NOBRE et al., 1991), aumentando sobremaneira a suscetibilidade dos ecossistemas amazônicos ao fogo e causando a redução das espécies menos tolerantes à seca, podendo até induzir uma "savanização" de partes da Amazônia, isto é, predominariam espécies de savanas nas bordas sul, leste e norte da região, espécies estas mais tolerantes a estações secas mais prolongadas. Por outro lado, se houver tendência ao aumento

⁸ Essa possível "aceleração" do ciclo hidrológico pode ser ilustrada comparando-se, por exemplo, o clima de inverno e verão no Sudeste do país. Dificilmente ocorrem no inverno tempestades severas, vendavais, chuva de granizo. Já no verão estes são fenômenos comuns porque a temperatura do ar é maior e há muito mais vapor d'água na atmosfera. Portanto, em geral uma atmosfera mais aquecida e com mais vapor d'água irá propiciar maior quantidade destes fenômenos extremos.

das precipitações, estes atuariam para contrabalançar a redução das chuvas devido ao desmatamento e o resultado final seria mais favorável à manutenção dos ecossistemas e espécies. Paradoxalmente, a agricultura tradicional e pecuária extensiva poderiam se beneficiar de condições mais secas na Amazônia uma vez que o excesso de umidade tem sido apontado, ao lado da baixa fertilidade dos solos, como um dos responsáveis pela baixíssima produtividade de quase todas as iniciativas agropecuárias ensejadas até hoje na região tropical úmida. (IMAZON & BANCO MUNDIAL, 2000)

Ainda para a Amazônia, com respeito às modificações de temperatura, nota-se que a projeção de aumento de temperatura global segue a mesma tendência de aumento de temperatura à superfície devido ao desmatamento. (NOBRE, 1991) As várias simulações dos efeitos climáticos da substituição da floresta por pastagens na Amazônia e as observações dos projetos Abracos (GASH et al., 1996; GASH and NOBRE, 1998) e LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) indicam que há um aumento entre 1 e 2 °C devido à mudança de vegetação de floresta para pastagem. Este aumento é maior do que aquele projetado pelo cenário B1, mas bem inferior àquele previsto pelo cenário A2 para o final do século. Provavelmente os efeitos de aumento de temperatura induzido pelas mudanças globais e aquele advindo do desmatamento se somariam, aumentando o risco de incêndios florestais porque o secamento da vegetação na estação seca e sua flamabilidade são maiores com temperaturas mais altas. (NEPSTAD et al., 1999) Em resumo, para a Amazônia os aumentos projetados de temperatura atuariam como *feedback* positivo e aumentariam a suscetibilidade dos ecossistemas amazônicos às mudanças climáticas globais devido ao aumento do efeito estufa e regionais devido ao desmatamento. Entretanto, a incerteza sobre como serão as alterações dos regimes de precipitação impede que se avalie se o *feedback* climático será positivo ou negativo com relação a este parâmetro climático.

De modo geral, os aumentos previstos de temperatura para a Amazônia (1 a 6 °C dependendo do cenário de emissões) causariam aumento de evaporação⁹ à superfície, provocando alterações nos balanços hídricos da vegetação natural e de culturas agrícolas. Em regiões onde a agricultura predominante é de sequeiro e a insuficiência e irregularidade das chuvas já a torna marginal, como na maior parte do semi-árido e em partes do Cerrado, um quadro de maior evaporação, principalmente para aumentos de temperatura acima de 3 °C, resultaria em menor quantidade de água no solo e poderia tornar a prática agrícola ainda mais marginal, a não ser que esta alteração climática fosse acompanhada de aumento e/ou maior regularidade das chuvas.

As próprias mudanças climáticas podem induzir a modificações importantes nos estoques e fluxos de carbono dos ecossistemas. O potencial líquido de emissão de CO₂ através da conversão de toda a floresta amazônica em outra paisagem que a substitua é muito alto: aproximadamente 77 Gton C. (FEARNSIDE, 2000) Se houver redução da precipitação na Amazônia, somada ao aumento de temperatura, poderá haver substituição em grande escala da floresta por savanas, que contém menor quantidade de biomassa. Haveria, nesse caso, um “pulso” de emissão de CO₂ para a atmosfera, aumentando ainda mais o efeito estufa, isto é, um *feedback* positivo para o sistema climático.

Enfatiza-se que a confiabilidade é baixa com respeito às previsões de mudanças da frequência de ocorrência de extremos do tempo e do clima, além da previsão de mudanças dos regimes pluviométricos. Espera-se que a incerteza na estimativa regional das alterações da precipitação e na estimativa do comportamento dos extremos seja reduzida substancialmente nesta próxima década mediante o uso de modelos climáticos mais complexos e que levem em conta explicitamente o clima regional.

⁹ Quanto mais alta a temperatura do ar, mais vapor d'água a atmosfera poderá reter na forma de vapor, portanto, aumentando a demanda evaporativa da superfície.

4 VULNERABILIDADE A MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Teceremos aqui algumas considerações sobre vulnerabilidade às mudanças climáticas globais e capacidade de adaptação. Há no Brasil uma enorme carência de estudos sobre a vulnerabilidade da sociedade, da economia e do ambiente às mudanças climáticas globais. Em parte isso se deve à falsa expectativa de que, por ser o Brasil um país tropical, os efeitos do aumento de temperatura seriam menores e a adaptação a eles, mais fácil. Uma outra explicação para a relativa “despreocupação” nacional com respeito à problemática de mudanças globais era centrada na percepção de que os países tem problemas muito mais graves e prementes a resolver no que concerne a um desenvolvimento com equidade e justiça social visando à eliminação da pobreza. Entretanto, são justamente os países em desenvolvimento aqueles mais vulneráveis às mudanças climáticas e ambientais de modo geral e dentro do país serão as populações mais pobres as mais atingidas, haja vista que a degradação ambiental sempre afeta mais profundamente os mais pobres e os excluídos. É difícil imaginar que isto não se repetiria com as mudanças climáticas globais.

Portanto, faz-se imperativa a identificação das vulnerabilidades da sociedade, inclusive, aquelas das atividades agrícolas, vulnerabilidades que possam colocar em risco a produção de alimentos. Estes exercícios podem e devem ser iniciados antes mesmo de termos certeza sobre como e quando ocorrerão mudanças climáticas de grande magnitude no país. A conhecida vulnerabilidade da produção agrícola de grande parte do país à variabilidade dos regimes de chuvas é um excelente laboratório para se conhecer em detalhes os impactos do clima na agricultura.

Detectadas as potenciais vulnerabilidades, deve-se iniciar a busca de estratégias e tecnologias para a adaptação, inclusive tirando proveito de eventuais mudanças climáticas que sejam benéficas. No campo da agricultura e silvicultura isso passará pelo estabelecimento de cenários de zoneamentos agrícolas e florestais possíveis em função dos cenários de mudanças climáticas e torna-se imprescindível acentuada modernização das práticas agrícolas e florestais, com disseminação no campo de educação básica e tecnológica de modo a tornar factível

a adaptação às mudanças climáticas da agricultura familiar em pequenas e médias propriedades, já que é nesta escala que as respostas a mudanças climáticas podem ser mais rápidas e eficientes.

5 CONCLUSÕES

No balanço global de carbono na atmosfera de nosso planeta, das 7,0 a 8,5 bilhões de toneladas de carbono emitidos anualmente na forma de dióxido de carbono (CO₂) pela queima de combustíveis fósseis, produção de cimento e queima de biomassa, somente 3,3 bilhões permanecem na atmosfera, provocando o aumento do efeito estufa (aumento do aquecimento da superfície e da baixa troposfera devido à absorção de calor pelas moléculas de vários gases minoritários da atmosfera, principalmente o vapor d'água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e ozônio). O restante é reabsorvido pelos oceanos e pela biota terrestre, estima-se que em partes aproximadamente iguais. Há evidências apontando que tanto as florestas temperadas como as florestas tropicais estão re-assimilando parte deste excesso de CO₂ atmosférico.

À primeira vista, a Amazônia aparenta ser uma fonte de CO₂ para a atmosfera. Em média, a emissão líquida de carbono da Amazônia brasileira aproxima-se de 200 milhões de toneladas por ano, levando-se em conta a emissão por queima de biomassa dos desmatamentos, pela relativamente rápida decomposição tanto da biomassa que resta após as queimadas como da matéria orgânica no solo e pela retirada de madeira e ainda a re-assimilação de carbono pela rebrota da floresta em áreas abandonadas. Este total representa entre cerca de 10% das emissões globais devido a mudanças dos usos da terra e da cobertura vegetal. Esta emissão de carbono para a atmosfera pode ser ainda maior pois, no cálculo acima, não foram computadas as emissões resultantes das queimadas de florestas em pé, como, por exemplo, o mega-incêndio florestal de Roraima no primeiros meses de 1998. Normalmente a floresta úmida é impenetrável ao fogo pois a alta umidade torna a madeira pouco inflamável. Entretanto, a lenta degradação e fragmentação que a floresta vem sofrendo ao longo das últimas décadas, que se acelera com o aumento da extração seletiva de madeira por métodos não sustentáveis,

torna-a suscetível ao fogo pois a radiação solar pode penetrar mais facilmente, causando o secamento da madeira e aumentando sua flamabilidade. Esta situação é potencializada nas áreas da Amazônia sujeitas a secas prolongadas, como aquelas provocadas pelo fenômeno El Niño no norte e leste da região.

Por outro lado, medições no projeto LBA do fluxo líquido de CO₂ em áreas de floresta não perturbada (isto é, a diferença entre o fluxo de CO₂ da atmosfera para a floresta utilizado no processo de assimilação de carbono através da fotossíntese durante o dia e o fluxo de CO₂ da floresta para atmosfera emitido pela respiração das plantas e devido à decomposição da matéria orgânica no chão da floresta e no solo), realizadas no leste, centro e sudoeste da região, têm mostrado que a floresta aparentemente funciona como um sumidouro de parte do excesso de CO₂ atmosférico, assimilando valores bastante expressivos, não inferiores a 2 toneladas de carbono por hectare por ano. Estes resultados são corroborados por duas outras estimativas independentes do balanço de carbono na Amazônia: inventários florestais em vários locais na América do Sul tropical e estimativas de fontes e sumidouros continentais de carbono pela inversão do cálculo do transporte atmosférico de CO₂. Também estes dois outros métodos apontam que a América do Sul tropical é sumidouro de CO₂ atmosférico. Durante o LBA, o longo período de amostragem e o maior número de pontos de medição irão permitir esclarecer se e até que ponto a floresta Amazônica está desempenhando este importante papel de sumidouro de carbono para a atmosfera global.

Em resumo, pode-se afirmar que o balanço de evidências observacionais atuais impede que seja descartada a possibilidade de que a floresta tropical amazônica esteja, de fato, funcionando como um sumidouro de carbono para a atmosfera, mas também parece evidente que não continuará a desempenhar este papel indefinidamente, principalmente no caso de aumento das temperaturas devido ao aquecimento global.

REFERÊNCIAS

- BOLIN, B., SUKUMAR, R., CIAIS, P., CRAMER, W., JARVIS, P., KHESHGI, H., NOBRE, C., SEMENOV, S., STEFFEN, W., LINDER, S., and JOOS, F., Global Perspective. In: WATSON, R. T., NOBLE, I. R., BOLIN, B., RAVINDRANATH, VERARDO D. J., DOKKEN, D.J. **Land Use, Land-Use Change and Forestry – A Special Report of the IPCC**. Cambridge University Press, 377 pp. 2000.
- CARTER, T., and M. Hulme. **Interim Characterizations of Regional Climate and Related Changes up to 2100 Associates with the Provisional SRES Marker Emissions Scenarios**. IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland. 2000.
- CARVALHO, J. A., COSTA, F. S., GIELOW, R., SANDBERG, D. V. ALVARADO, E. C., VERAS, C. A. G., SERRA JR., A. M., SANTOS, J. C. **Biomass combustion experiments conducted in Fazenda Caiabi, near Alta Floresta, MT, Brazil**. Primeira Conferência Científica do Projeto LBA, 25-30 Junho de 2000, Belém, PA, Brasil. Disponível em: <http://sauva.cptec.inpe.br/posters/2000>.
- CIAIS, P., P. P. Tans, J.W. White, M. Troler, R. Francey, J. Berry, D. Randall, P. Sellers, J. Collatz, and D.S. Schimel. Partitioning of the ocean and land uptake of CO₂ from delta ¹³C measurements from the NOAA/CMDL global air sampling network. **Journal of Geophysical Research**, 100 (D3), 5051-5057. 1995.
- FEARNSIDE, P. O Potencial do Setor Florestal Brasileiro para a Mitigação do Efeito Estufa sob o “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo” do Protocolo de Kyoto. In “”, Ed. A.G. Moreira & S. Schwartzman, UNB, **As Mudanças Climáticas Globais e os Ecossistemas Brasileiros** Brasília, 59-74. 2000.
- GASH, J.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R., eds. **Amazonian deforestation and climate**. New York. John Wiley and Sons, 1996. 611p.
- GASH, J. H. C.; NOBRE, C.A. Climatic effects of Amazonian deforestation: Some results from ABRACOS. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.78, n.5, p.823-830. 1997.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H; NOBRE, C. A.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in Southwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science**, v. 270, n.5237, p.778-780. 1995.
- HOUGHTON, R. A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. **Tellus**, 50B, 298-313. 1999.
- HOUGHTON, R. A., SKOLE, D., NOBRE, C. A., HACKLER, J., LAWRENCE, K., CHOMENTOWSKI, W. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon”. **Nature**, v.403, 301-304.
- INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA (IMAZON) e BANCO MUNDIAL. **Amazônia Florestal: oportunidades para uma economia sustentável. Série Parceria**, No 01. 82 p. Brasília. 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite: 1998–2000. São José dos Campos, SP, Brasil. 2000. (disponível em http://www.inpe.br/Informacoes_Eventos/amazonia.htm)

IPCC. **Emissions Scenarios – IPCC Special Report**. IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland. 2000.

KELLER, M, CLARK, D. A., CLARK, D. B., WEITZ, A. M. and VELDKAMP, E. If a tree falls in the forest... **Science**, 273:201. 1996.

MALHI, Y., A. D. Nobre, J. Grace, B. Kruijt, M. G. P. Pereira, A. Culf, and S. Scott. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, D24, 31593-31612. 1998.

MALHI, Y., D. D. Baldochi, and P. G. Jarvis. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell and Environment**, 22, 715-740. 1999.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Setor Energético. In: **Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. Setor Agropecuário. MCT, Brasília, DF, Brasil. 2000a. (disponível em http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/energia.htm).

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Emissão de Metano Proveniente da Pecuária. In: **Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. Setor Agropecuário. MCT, Brasília, DF, Brasil. 2000b. (disponível em http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/pecuaria.htm).

NEPSTAD, D. C.; VERISSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C. A.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDONZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v.398, n.6727, p. 505-508. 1999.

NOBRE, A.; MALHI, Y.; ARAUJO, A. C.; CULF, A. D.; DOLMAN, A. D.; ELBERS, J.; KRUIJT, B.; RANDOW, C.; MANZI, A. O.; GRACE, J.; KABAT, P. **Multiyear comparative analysis of NEP and environmental factors for Manaus rainforest: “La Niña” influence on CO₂ uptake**. Primeira Conferência Científica do Projeto LBA, 25-30 Junho de 2000, Belém, PA, Brasil. Disponível em: <http://sauva.cptec.inpe.br/posters/>

NOBRE, C. A.; SELLEERS, P.; SHUKLA, J. Regional climate change and amazonian deforestation model. **Journal of Climate**, v.4, n.10, p.957-988. 1991.

PHILLIPS, O. L., Y. Malhi, N. Higuchi, W. F. Laurance, R.M. Núñez, D. J. D. Vázquez, L. V. Laurance, S. G., Ferreira, M. Stern, S. Brown, and J. Grace. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. **Science**, 282, 439-442. 1998.

RAYNER, P. J., I. G. Enting, R. J. Francey, and R. Langefelds. Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, D¹³ C and O₂/N₂ observations, **Tellus**, (in press). 2000.

WATSON, R. T., NOBRE, I. R., BOLIN, B., RAVINDRANATH, N. H., VERARDO, D. J., and DOKKEN, D. J. **Land Use, Land-Use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC**. Cambridge University Press, 377 pp. 2000.

CPTEC

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

causas e dinâmica
do desmatamento
na amazonia

EX. 2 BRASIL - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
CAUSAS E DINÂMICA DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA.



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
Presidente: Fernando Henrique Cardoso
Vice-Presidente: Marco Antonio de Oliveira Maciel

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
Ministro: José Sarney Filho
Secretário-Executivo: José Carlos Carvalho

SECRETARIA DE COORDENAÇÃO DA AMAZÔNIA
Secretária: Mary Helena Allegretti

DIRETORIA DO PROGRAMA DE
GESTÃO AMBIENTAL DA AMAZÔNIA
Diretora: Vanessa Fleischfresser

EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL PELO SEMINÁRIO

Alberto Nobre Mendes

Analizita Müller

Carlos Artur Krüger Passos

Herbert Otto Schubart

Ligia Aparecida de Arruda Camargo Lacerda

Nazaré Lima Soares

Vanessa Fleischfresser (Coordenação Geral)

EQUIPE DE APOIO

Simone Maria Azevedo

Regina Helena Furtado

Keloisa de Lacerda Medeiros

Warlison Leandro da Silva

Carlos Rogério Simões de Medeiros

Lorena Caroline Lyra de Oliveira

Maryara Pero de Almeida

Cláudia Dorneles

Depósito legal junto à Biblioteca Nacional, conforme decreto nº 1823,
de 20 de dezembro de 1907.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
Index Consultoria em Informação e Serviços S/C Ltda.
Curitiba - PR

Brasil, Ministério do Meio Ambiente
B823 Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia / Ministério do Meio Ambiente. - Brasília : MMA, 2001. 436 p.
1. Desmatamento - Amazônia. I. Título.
CDD (20. ed.) 634.96
CDU (2.ed.) 630*4(811)

IMPRESSO NO BRASIL / PRINTED IN BRAZIL

ISBN 85-87166-27-1

Conceitos emitidos e informações prestadas
nesta publicação são de inteira responsabilidade dos autores.

SUMÁRIO

MENSAGEM DO MINISTRO DO MEIO AMBIENTE	
<i>José Sarney Filho</i>	
APRESENTAÇÃO	
<i>Vanessa Fleischfresser</i>	
ABERTURA DO SEMINÁRIO	
<i>Mary Helena Allegretti</i>	
SÍNTESE DO PROCESSO DE OCUPAÇÃO DA AMAZÔNIA - LIÇÕES DO PASSADO E DESAFIOS DO PRESENTE	
<i>Bertha K. Becker</i>	
IMPACTOS DO CRESCIMENTO ECONÔMICO NO DESMATAMENTO DA AMAZÔNIA	2:
<i>Aristides Monteiro Neto</i>	
INDICADORES PARA A COMPREENSÃO DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA	5:
<i>Francisco de Assis Costa</i>	
INDICADORES DA AMAZÔNIA LEGAL	6:
<i>Marcelo Afonso Silva</i>	
EVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA, QUALIDADE DE VIDA E DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA	7:
<i>Donald Sawyer</i>	
O QUADRO DO DESFLORESTAMENTO DA AMAZÔNIA	9:
<i>Theima Krug</i>	
A EXPERIÊNCIA DO PROARCO	9:
<i>Humberto Candeias Cavalcanti</i>	
O CONTROLE QUALIFICADO DO DESMATAMENTO E O ORDENAMENTO TERRITORIAL NA REGIÃO AMAZÔNICA	10:
<i>Mario A. Menezes</i>	
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O CICLO HIDROLÓGICO NA AMAZÔNIA	15:
<i>Eneas Salati</i>	

EFEITOS DO USO DA TERRA E MANEJO FLORESTAL NO CICLO DE CARBONO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	173
<i>Philip M. Fearnside</i>	
AMAZÔNIA: FONTE OU SUMIDOURO DE CARBONO	197
<i>Carlos A. Nobre</i>	
DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA E CONSEQÜÊNCIAS PARA A BIODIVERSIDADE	225
<i>Ricardo Bomfim Machado e Ludmilla Moura de Souza Aguiar</i>	
DESMATAMENTO, SOLOS E AGRICULTURA NA AMAZÔNIA LEGAL	235
<i>Emeleocípio Botelho de Andrade</i>	
DESMATAMENTO E ECONOMIA LOCAL E POLÍTICAS PÚBLICAS	259
<i>Eugênio Arima</i>	
A REPARTIÇÃO DE COMPETÊNCIAS EM MATÉRIA AMBIENTAL	277
<i>Francisco Ubiracy Craveiro de Araújo</i>	
DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DOS PACTOS FEDERATIVOS	303
<i>Alisson José Coutinho</i>	
SISTEMA DE FISCALIZAÇÃO, LICENCIAMENTO E MONITORAMENTO DE PROPRIEDADES RURAIS DE MATO GROSSO	307
<i>Frederico de Moura Müller</i>	
SOLUÇÕES LOCAIS INTEGRADAS SOBRE FOGO NA AMAZÔNIA	343
<i>Roberto Smeraldi</i>	
EIXOS NACIONAIS DE INTEGRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO	351
<i>Yolanda Maria de Mello Ramalho e Pedro Bara Neto</i>	
ESTRATÉGIAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA	369
<i>Eliana Zacca</i>	
PROGRAMA NACIONAL DE FLORESTAS	389
<i>Raimundo Deusdará Filho</i>	
AS OPORTUNIDADES BRASILEIRAS COM O MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO	397
<i>Ronaldo Serôa da Motta</i>	
ENCERRAMENTO DO SEMINÁRIO	427
<i>Mary Helena Allegretti</i>	

AMAZÔNIA: FONTE OU SUMIDOURO DE CARBONO?

*Carlos A. Nobre**

1 INTRODUÇÃO

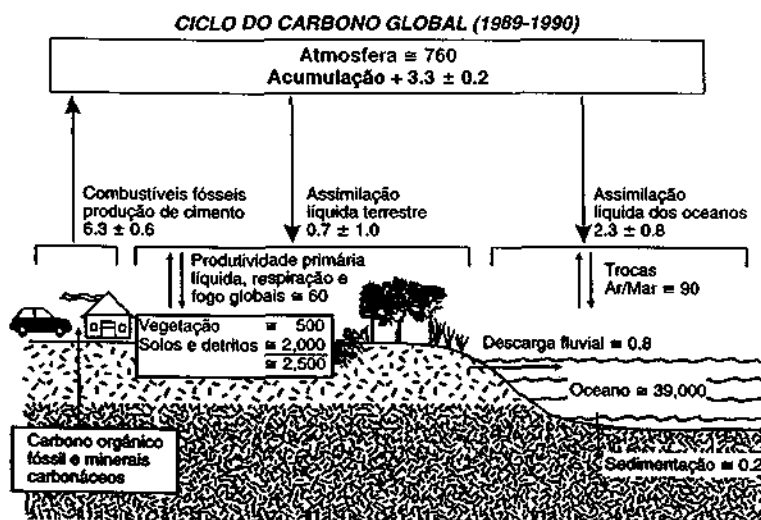
A Amazônia é fonte ou sumidouro de dióxido de carbono para a atmosfera global? Esta importante questão científica ainda permanece em aberto. Por muitas décadas, imaginou-se que a emissão devida aos desmatamentos e queimadas de crescentes áreas da floresta tropical inevitavelmente significaria que a região deveria ser fonte de CO₂ para a atmosfera. Entretanto, uma série de estudos recentes sobre o balanço de carbono da floresta não perturbada tem mostrado que estas florestas tropicais da América do Sul podem estar acumulando carbono por fotossíntese mais do que perdendo por respiração das plantas e decomposição da matéria orgânica, isto é, poderiam estar retirando (“seqüestrando”) carbono da atmosfera.

Isso pode ter implicações globais, como fica claro analisando a figura 1, que demonstra o balanço global de carbono para a década 1989-1998. (BOLIN et al., 2000) A figura mostra que há uma assimilação líquida da biota terrestre de $0,7 \pm 1,0$ Gton C/ano. Como, durante este período, estima-se que as emissões por mudanças dos usos da terra,

* Engenheiro Eletrônico. Doutor em Meteorologia. Chefe do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ INPE. Coordenador geral do Experimento de grande escala sobre a Biosfera e a Atmosfera na Amazônia (LBA).

principalmente o desmatamento das florestas tropicais, tenham atingido $1,6 \pm 0,8$ Gton C/ano (HOUGHTON et al., 1999 e 2000, baseado em emissões médias anuais para o período 1989-95), a assimilação (seqüestro) total da biota terrestre foi de $2,3 \pm 1,3$ Gton C/ano. Portanto, é plausível admitir-se que as florestas tropicais, ao lado de florestas temperadas, estejam desempenhando um papel importante para o seqüestro de carbono, entre elas, as florestas tropicais da América do Sul.

FIGURA 1 - BALANÇO GLOBAL DE CARBONO



FONTE: Watson et al. (eds.), 2000.

Nota: Números em vermelho representam estoques nos reservatórios em Gton C (10^{12} g de C) e números em azul representam fluxos em Gton C/ano.

Ainda que o inventário nacional de emissões não esteja concluído, o Brasil certamente está entre os 10 maiores emissores de gases de efeito estufa (é o sexto ou sétimo maior emissor de CO_2 e, possivelmente, o terceiro de CH_4 devido principalmente a mudanças dos usos da terra e pecuária) por ações antrópicas.

A questão da emissão dos gases de efeito estufa nos remete diretamente para a problemática das mudanças climáticas que poderiam resultar do aumento do efeito estufa da atmosfera terrestre. Os vários

cenários de mudanças climáticas para o país, em função dos diversos cenários de emissões para os próximos 100 anos, indicam a possibilidade de impactos climáticos significativos. No cenário “business as usual”¹ de crescimento das emissões dos gases de efeito estufa, os modelos climáticos indicam que poderá ocorrer aquecimento de 4 a 6 °C em partes do país (principalmente na Amazônia) até o final do século. Há ainda muita incerteza com relação às possíveis mudanças na precipitação pluviométrica e quanto às modificações na frequência de extremos climáticos (secas, inundações, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo etc.). De qualquer maneira, parece certo que o país estará sujeito a impactos climáticos adversos. Grande parte da população do país, em função da baixa renda e nível educacional, está especialmente vulnerável às mudanças climáticas, como já o está à variabilidade natural do clima atual, sendo exatamente aquela população com menores possibilidades de adaptação. Também as mudanças climáticas podem afetar o balanço de carbono na Amazônia.

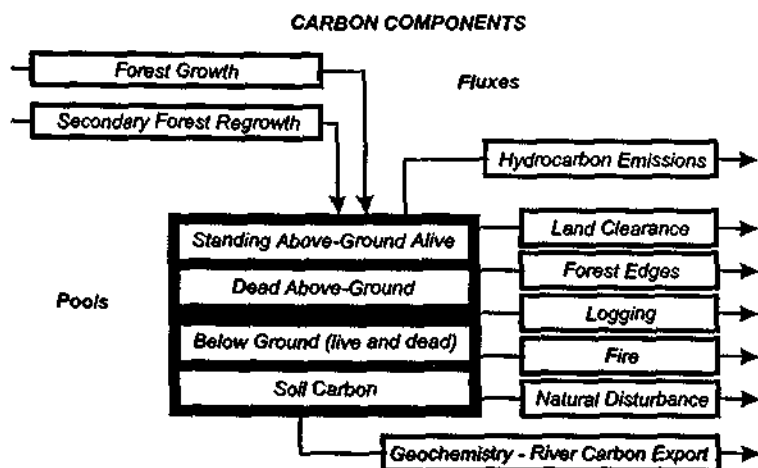
2 O BALANÇO DE CARBONO NA AMAZÔNIA

Os diversos componentes do balanço de carbono para a Amazônia levando em conta processos naturais e efeitos da ação antrópica sobre o balanço é apresentado de forma esquemática na figura 2. Ainda que haja quantificação de apenas poucos dos termos do balanços de carbono para os ecossistemas amazônicos, uma primeira visão deste balanço já começa a emergir. De forma resumida, nosso conhecimento parcial sobre o ciclo de carbono na Amazônia é apresentado na figura 3: dispõe-se de uma primeira quantificação do efeito das mudanças dos usos da terra, principalmente o desmatamento de corte raso, ainda que com grande incerteza, detectou-se que a floresta não perturbada pode estar funcionando como sumidouro de carbono e busca-se quantificar e comprovar este importante efeito, e, por último, registra-se que não há quantificação das emissões devido à

¹ Refere-se à continuidade dos padrões de emissão dos gases do efeito estufa como observados nas últimas décadas, isto é, aumento exponencial das emissões da maioria dos gases.

fragmentação e degradação das florestas e incêndios florestais, fenômenos estes que se tornam a cada dia mais freqüentes dado o avanço da fronteira ocupação sobre a floresta.

FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO COM OS COMPONENTES DO BALANÇO DE CARBONO NA AMAZÔNIA



Nota: Blocos em verde e em marrom representam os reservatórios (estoques) de carbono acima e abaixo do solo, respectivamente. Blocos em azul e vermelho representam os fluxos de entrada e saída, respectivamente, de carbono nos ecossistemas.

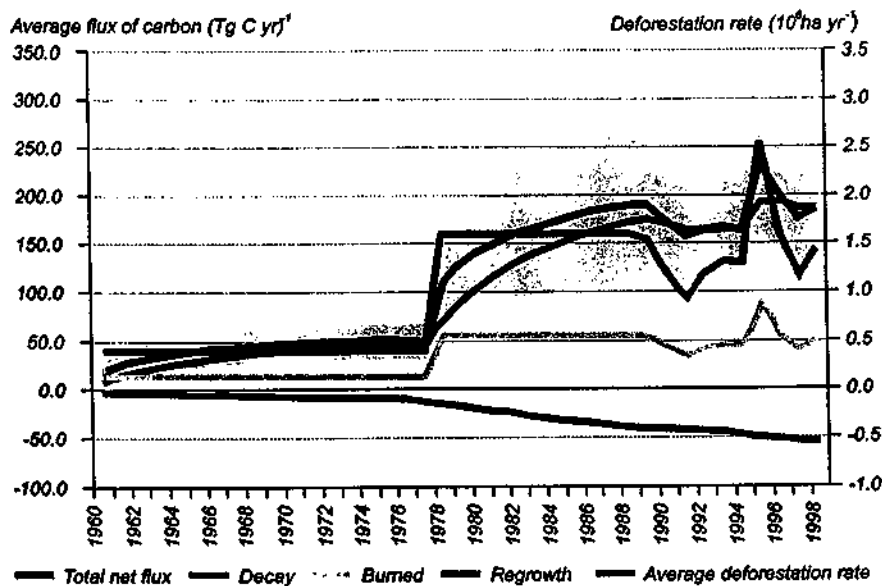
FIGURA 3 - SUMÁRIO DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES SOBRE O CICLO DE CARBONO NA AMAZÔNIA

- ↪ **Ciclo de Carbono na Amazônia: Fonte ou Sumidouro?**
- **Mudança do Uso da Terra**
 Fonte (Queima de Biomassa + Decomposição + Extração Madeireira) –
 Sumidouro (Rebrota) ≅
+ (200 ± 100) Mton C/ano (Média 1988-1998)
- **Florestas não perturbadas aparentemente estão acumulando carbono a altas taxas ≅**
- 1 a 6 ton C/ha/ano
- **Fragmentação e degradação florestal e incêndios florestais acidentais:**
+ Quantificação das emissões?

2. 1 Emissões de Dióxido de Carbono por Mudanças nos Usos da Terra

Anualmente enormes extensões na Amazônia são desmatadas para dar lugar, principalmente, à agricultura de subsistência e à pecuária extensiva. Estima-se que a área desmatada situa-se, nos últimos anos, entre 15 e 20 mil km² por ano na Amazônia brasileira (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2000) O balanço de carbono para a Amazônia brasileira na década de 1990 devido a mudanças dos usos da terra é apresentada na figura 4. (HOUGHTON et al., 2000) Desmatamentos e queimadas representam emissões médias na década de 1990 de cerca de (200 ± 100) Mton C/ano.²

FIGURA 4 - ESTIMATIVAS DO BALANÇO DE CARBONO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA DEVIDO A MUDANÇAS DOS USOS DA TERRA



FONTE: Houghton et al., 2000.

² O alto valor da incerteza associada a essa estimativa (± 100 Gton C/ano) deve-se, em primeiro lugar, às incertezas na estimativa da biomassa em toda Amazônia. Em Houghton et al. (2000) foram utilizados três valores para a biomassa: alto (232 Mton C/ha), média (210 Mton C/ha) e baixa (145 Mton C/ha). Este trabalho utilizou 20% como taxa da biomassa que é queimada. Este valor é mais baixo do que as estimativas mais recentes de cerca 40% de taxa de queima (CARVALHO Jr. et al., 2000). Esta diferença não mudaria significativamente o total de emissões da década, mas somente a distribuição temporal das emissões, aumentando as emissões da segunda metade da década devido ao alto valor de desmatamento em 1995.

Por comparação, estima-se que o total de emissões por queima de combustíveis fósseis e produção de cimento do país em 1994 foi de (65 ± 7) Mton C/ano (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2000a), isto é, as emissões de CO₂ por mudanças dos usos da terra na Amazônia por si só são 2 a 3 vezes maiores que as emissões brasileiras de CO₂ por queima de combustíveis fósseis.

2.2 O Papel das Florestas Não Perturbadas

Por outro lado, estudos recentes baseados em medidas locais por longos períodos dos fluxos turbulentos de CO₂ acima do dossel da floresta em vários sítios experimentais de pesquisa na Amazônia (veja figura 5) indicam que a floresta tropical amazônica não perturbada tem funcionado como sumidouro de carbono a taxas entre 1 a 6 ton C/ha/ano (GRACE et al., 1996, MALHI et al., 1998; MALHI et al., 1999; NOBRE, A, et al., 2000), como ilustrado nas figuras 6, 7, 8, 9 e 10. Esta última apresenta um sumário ainda incipiente do conhecimento atual sobre o balanço de carbono na Amazônia.

FIGURA 5 - REDE DE ESTAÇÕES DE MEDIDA DE FLUXOS DE CARBONO DE ECOSISTEMAS



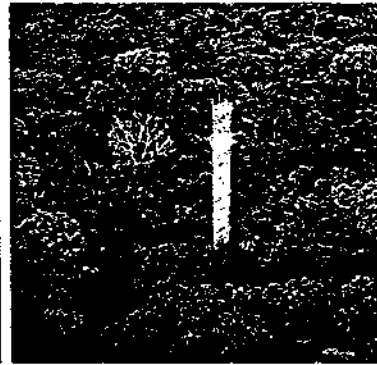
FLUXNET Sites

● AmeriFlux ● EuroFLUX ● MedeFlux ● Japan Net ● LBA ● Others

NOTA: Em verde na América do Sul a rede de torres de medidas de fluxos de carbono do Experimento LBA na Amazônia.

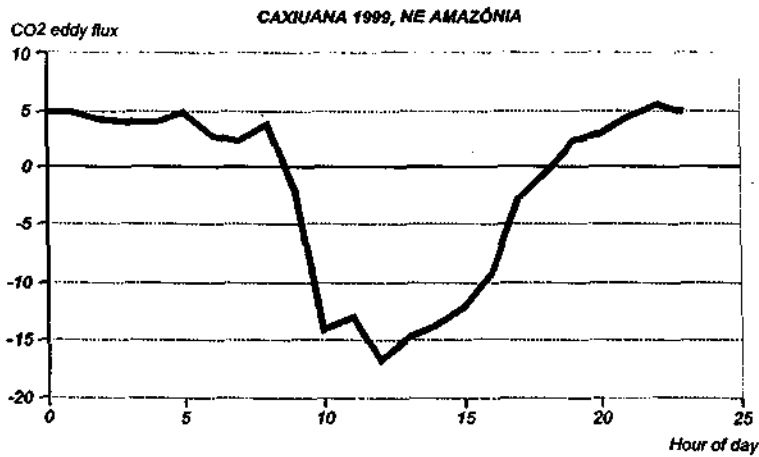
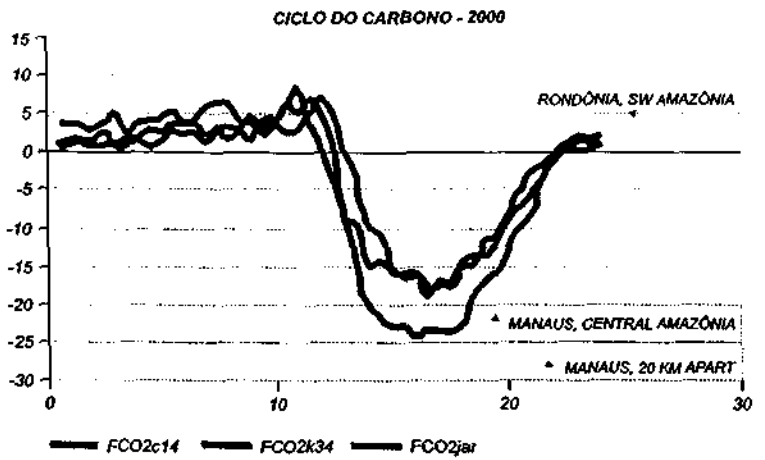
FIGURA 6 - TORRES DE MEDIDAS DE FLUXOS DE CARBONO EM DIVERSOS SÍTIOS EXPERIMENTAIS DO EXPERIMENTO LBA NA AMAZÔNIA

Torres de medida de fluxos de carbono do LBA em Manaus e Rondônia.



Torres de medida de fluxos de carbono do LBA em operação na Reserva Ecológica REBIO Jaru, em Rondônia.

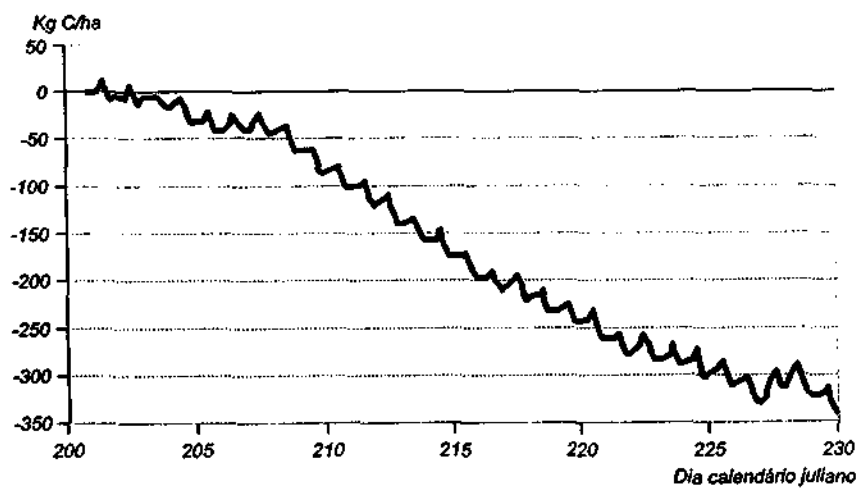
FIGURA 7 - CICLO DIURNO MÉDIO DO FLUXO DE CARBONO PARA FLORESTAS NÃO PERTURBADAS NA AMAZÔNIA



FONTE: Projeto LBA, cortesia de Antonio Nobre (dados de Manaus), Consórcio Brasil-Europe (dados de Rondônia e Caxiuanã).

NOTA: Unidade: $\text{mmol/m}^2/\text{s}$. Diagrama superior: dados de torres em Rondônia (Reserva Ecológica do Jarú) e duas torres na Reserva Biológica do Cueltras, 100 km ao norte de Manaus. Note que estas duas torres encontram-se separadas por distância de somente 20 km, mas apresentam comportamento bem diferente durante o horário de máxima assimilação. Diagrama inferior: dados da torre em Caxiuna, a oeste da Ilha de Marajó.

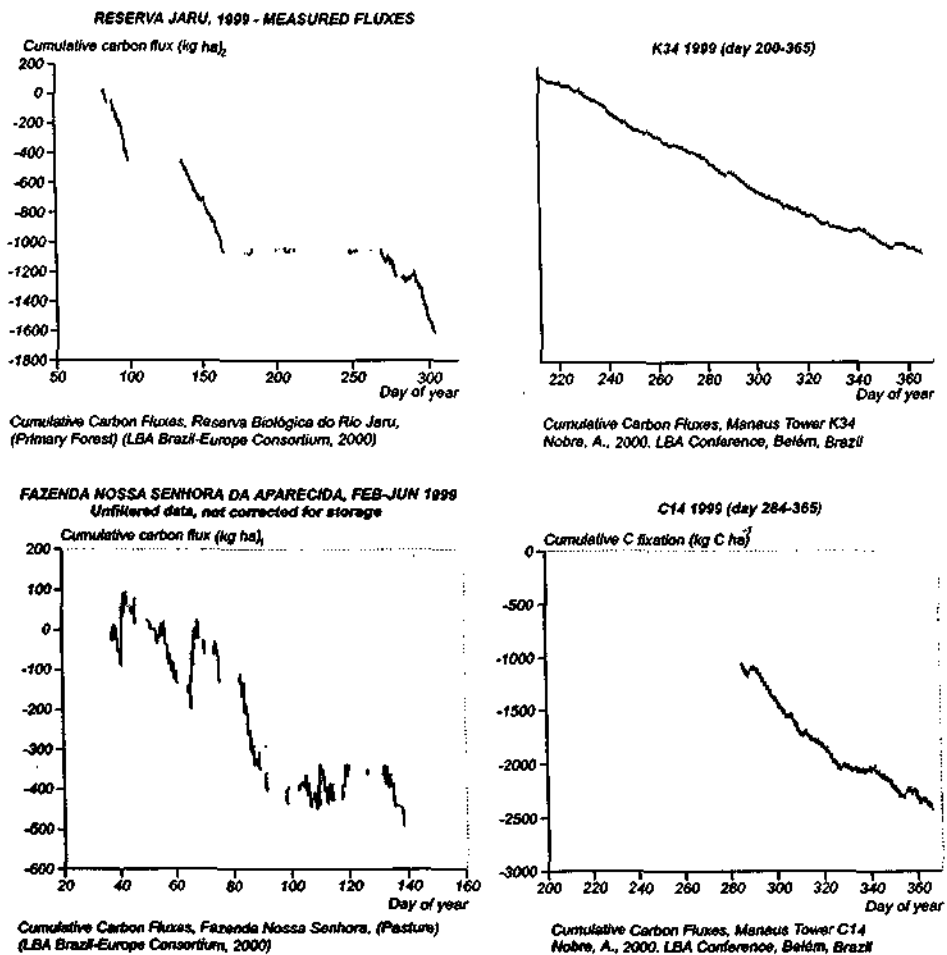
FIGURA 8 - ACUMULAÇÃO DE CARBONO MEDIDA EM TORRE ACIMA DA FLORESTA NÃO PERTURBADA NA RESERVA BIOLÓGICA DO CUEIRAS*, NO PERÍODO DE 30 DIAS A PARTIR DE 19 DE JULHO DE 1999



FONTE: Projeto LBA.

* Reserva Biológica do Cueiras - 100 km ao norte de Manaus. Unidade: Kg C/ha.

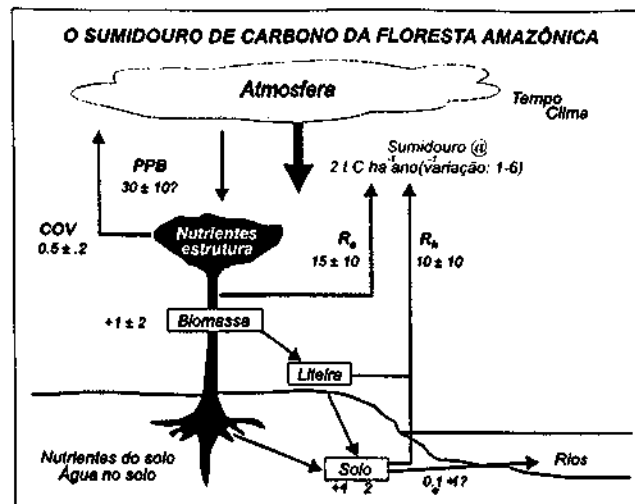
FIGURA 9 - COMPARAÇÃO DE FLUXOS DE CARBONO CUMULATIVOS PARA ÁREAS DE PASTAGEM¹ E FLORESTA EM RONDÔNIA² E PARA DUAS ÁREAS DE FLORESTA EM MANAUS³



FORNTE: Projeto LBA, cortesia de Antonio Nobre (dados de Manaus), Consórcio Brasil-Europa (dados de Rondônia). Números negativos indicam fluxos para a vegetação, isto é, acumulação de carbono.

NOTAS: (1) Canto inferior esquerdo
 (2) Canto superior esquerdo
 (3) Lado direito.

FIGURA 10 - SÍNTESE PRELIMINAR DO CICLO DE CARBONO DA FLORESTA TROPICAL NA AMAZÔNIA



FONTE: Projeto LBA, Consórcio Brasil-Europa.
 Unidades: t C ha⁻¹ ano⁻¹. PPB= produtividade primária bruta; R= respiração autotrófica;
 R_h respiração heterotrófica; COV= compostos orgânicos voláteis.

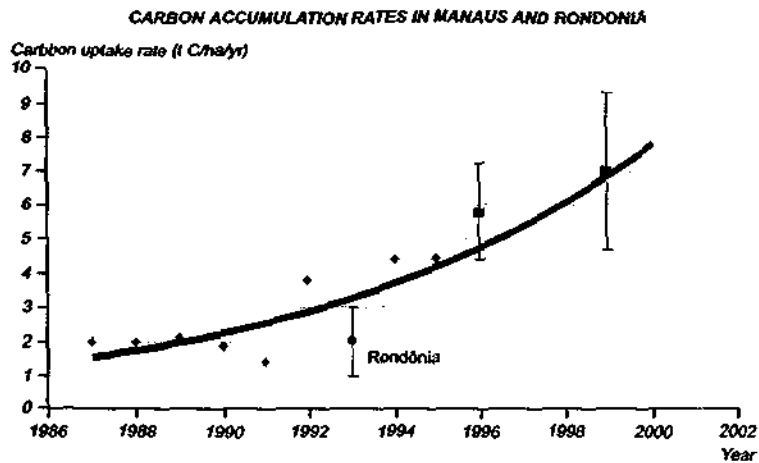
Nos últimos anos, surgiram estudos independentes que corroboram as medidas diretas de fluxos de carbono sobre florestas. Estudos baseados em inventários florestais (figura 11a de MALHI et al., 1998, e figura 11b de PHILLIPS et al., 1998) e baseados no cálculo de inversão dos transportes atmosféricos de CO₂ (CIAIS et al., 1995; REYNER et al., 2000), apresentados nas figuras 12 e 13,³ também colocam a Amazônia

³ A figura 12 mostra a rede global dos locais onde se coletam amostras de ar (frascos) para medidas precisas (precisão de 0,1 ppmv) de concentração atmosférica de CO₂. Munido da informação de concentração, a partir dos ventos globais, é factível o cálculo dos transportes globais de CO₂. Em geral, dados as fontes e os sumidouros de uma espécie na atmosfera e os ventos tridimensionais globais, é possível calcular as concentrações por meio da equação de conservação da espécie. Se, ao invés da distribuição de fontes e sumidouros, forem conhecidas as concentrações da espécie, pode-se inverter a equação de conservação e calcular a distribuição de fontes e sumidouros. O uso de modelos oceânicos contendo o ciclo de carbono permite especificar as fontes e sumidouros sobre os oceanos, portanto, do cálculo descrito acima, pode-se extrair as fontes e sumidouros sobre os continentes. Um exemplo deste cálculo é apresentado na figura 13. (REYNER et al., 2000)

como sumidouro de parte do excesso de CO₂ na atmosfera com totais entre 0,2 e 0,5 Gton C/ano (lembrando que a biota terrestre re-assimila cerca de $(2,3 \pm 1,3)$ Gton C/ano das cercas de $(7,9 \pm 1,3)$ Gton C/ano lançadas na atmosfera por queima de combustíveis fósseis $(6,3 \pm 0,6)$ e mudanças nos usos da terra $(1,6 \pm 1,0)$, como em Bolin et al., 2000), isto é, a Amazônia poderia responder por 10 a 20% do sumidouro global de carbono da biota terrestre.

Retornemos à figura 10 com um sumário sobre o conhecimento atual dos termos do balanço de carbono na Amazônia. Há ainda muitos aspectos biogeoquímicos do ciclo de carbono na Amazônia que necessitam ser entendidos para explicar os mecanismos que fazem com que aparentemente a floresta comporte-se como sumidouro. Este efeito aparente de sumidouro se deve ao aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, o chamado efeito de “fertilização” de CO₂, tornando as espécies vegetais mais eficientes na assimilação fotossintética de carbono? Ou seria somente parte da variabilidade climática natural na qual a floresta estaria somente se recuperando de mortalidade resultante de seca no passado recente (KELLER et al., 1997), ou de outras perturbações como fogo, pestes ou derrubadas por ventos (“blowdowns”)? Há um debate técnico em andamento sobre se as medidas de fluxos de CO₂ em torres sobre a floresta teriam um viés para assimilação de carbono pelo fato de que o sensor, que é localizado normalmente 20 a 30 m acima do dossel, poderia não estar registrando parte do CO₂ respirado pelo ecossistema. É a chamada “perda por drenagem lateral a noite”, isto é, em noites sem vento o CO₂ chegaria até o nível do topo do dossel e drenaria seguindo a inclinação do terreno, não sendo, portanto, registrada pelo sensor. Apesar de este mecanismo, mesmo que estiver ocorrendo, ser incapaz de explicar os altos valores de assimilação medidos, no Experimento LBA, ele está sendo investigado em detalhes.

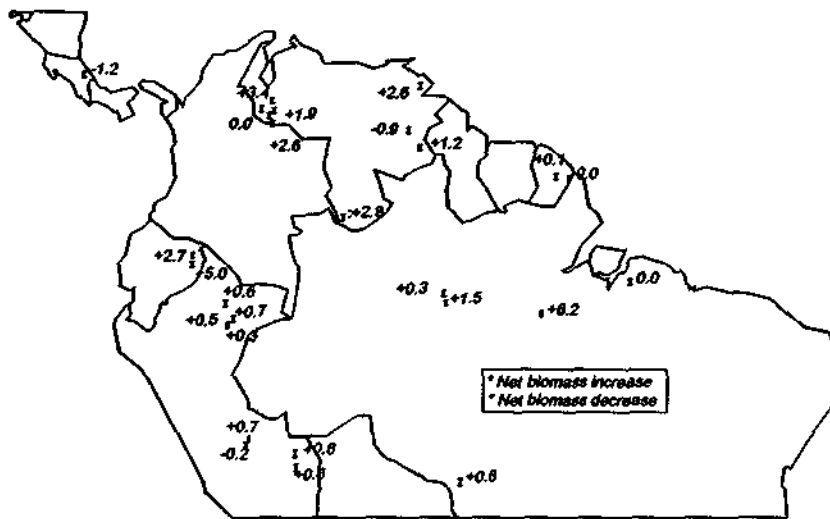
FIGURA 11A - ACUMULAÇÃO DE CARBONO MEDIDO EM INVENTÁRIO FLORESTAL NA RESERVA BIOLÓGICA DO CUEIRAS DOS ANOS 80 ATÉ 1995



FONTE: Malhi et al., 1998.

NOTA: Anos 80 até 1995 (losângulos azuis e curva com melhor ajuste aos pontos) e, para comparação, medidas de acumulação de fluxos em torres em Rondonia e Manaus (quadrados vermelhos com barras verticais indicando incerteza destas medidas).

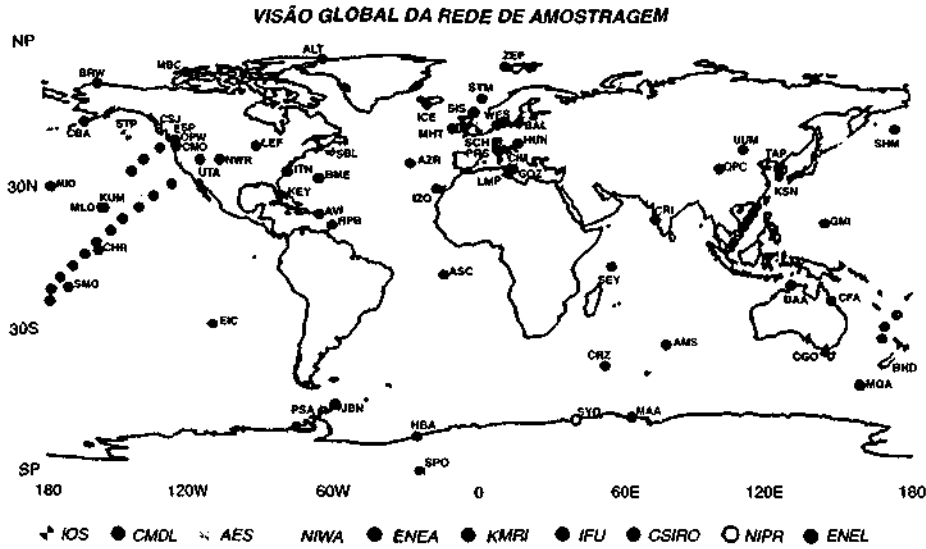
FIGURA 11B - SUMÁRIO DE MEDIDAS DE ACUMULAÇÃO OU PERDA DE CARBONO DERIVADAS A PARTIR DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS PARA A AMÉRICA DO SUL TROPICAL



FONTE: Phillips et al., 1998.

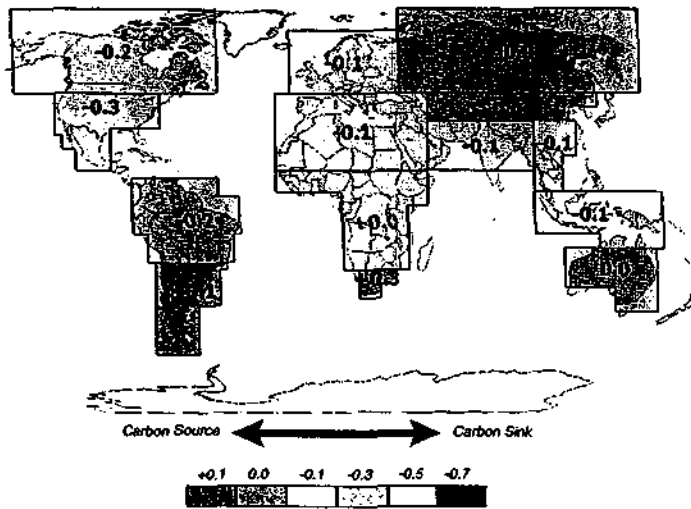
NOTA: Total uptake in South American forest biomass: 0.5 Gt C yr⁻¹

FIGURA 12 - REDE GLOBAL DE FRASCOS DE COLETAS DE AR PARA OBSERVAÇÕES PRECISAS DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO



NOTA: Várias estações têm mais de um grupo de medidas.

FIGURA 13 - ESTIMATIVA DE BALANÇO LÍQUIDO DE CARBONO DA BIOSFERA TERRESTRE (Gto C/ano) CALCULADO A PARTIR DOS REGISTROS DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO OBTIDOS NAS ESTAÇÕES DA FIGURA 12 - 1980-89



FONTE: Derivado de Rayner et al., 2000.

Entretanto, com as mudanças climáticas (aquecimento global) este sumidouro poderá saturar, isto é, as florestas tropicais passariam de sumidouros a fontes uma vez que o aquecimento do solo poderia acelerar a taxa de decomposição da matéria orgânica na liteira e no solo. Há ainda enorme incerteza sobre a escala de tempo em que esta possível saturação dos sumidouros que seqüestram carbono ocorrerá, se em meados do Século XXI ou se em prazos mais longos. (BOLIN et al., 2000) Em resumo, o balanço de evidências impede que seja descartada a possibilidade de que a floresta tropical amazônica esteja, de fato, funcionando como um sumidouro de carbono para a atmosfera, mas também parece evidente que não continuará a desempenhar este papel indefinidamente.

3 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A AMAZÔNIA E IMPACTOS NOS ECOSISTEMAS⁴

A continuar o padrão atual de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera resultantes de ações antrópicas, há altíssima probabilidade que haverá mudanças climáticas globais de grande magnitude ocorrendo nos próximos 100 anos.⁵ Entre elas, as mais significativas para o país são o aumento de temperatura, modificações nos padrões de chuvas e alterações na distribuição de extremos climáticos, tais como secas, inundações, penetração de frentes frias, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo etc.

⁴ Esta seção é baseada parcialmente na contribuição do autor a documento elaborado pela SBPC sobre mudanças climáticas para o Brasil e conseqüências para posição brasileira nas negociações do Protocolo de Kioto.

⁵ A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, estabelecida no Rio de Janeiro em 1992 e, decorrente da Convenção, o Protocolo de Quito, de 1997, prevêem a estabilização e mesmo redução dos gases de efeito estufa em nível mundial. Entretanto, a Convenção previa a estabilização das emissões em 2000 aos níveis de 1990, porém isto não somente não aconteceu, como, ao contrário, as emissões continuaram a crescer tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento, exceção feita às repúblicas que compõem a ex-URSS onde as emissões foram reduzidas devido ao colapso econômico.

Evidências científicas recentes apontam para uma intensificação da variabilidade climática associada a eventos El Niño/La Niña em função do aumento do efeito estufa.⁶ O previsto aumento do nível médio do mar poderá trazer conseqüências para os ecossistemas e populações humanas nas áreas costeiras e nas áreas ribeirinhas que sofrem a influência das marés.

Dado um cenário de emissões de GEE do presente até, digamos, 2100, usualmente utilizam-se modelos climáticos globais⁷ para se estimar as mudanças climáticas globais que possam ocorrer. Desta maneira, geram-se cenários de alterações climáticas globais consistentes com um dado cenário de emissões de GEE. Vários centros meteorológicos avançados, que dispõem de modelos climáticos complexos, rotineiramente realizam este tipo de simulação. Recentemente o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate*

Os impactos climáticos dos episódios de El Niño e La Niña de aquecimento e resfriamento, respectivamente, das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial são bastante significativos na Amazônia. Há uma tendência para chuvas deficientes no centro, norte e leste da Amazônia em anos de El Niño e aproximadamente o oposto, isto é, chuvas abundantes, em anos de La Niña. O avanço do conhecimento destes fenômenos já permite sua previsão com muitos meses de antecedência.

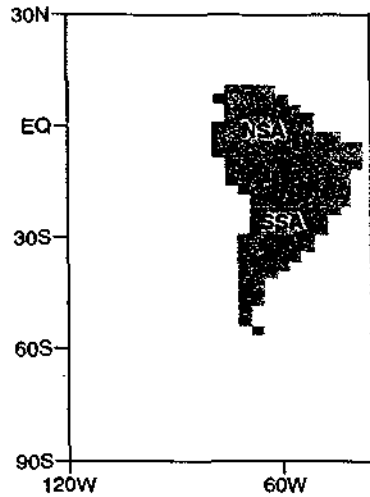
Modelos climáticos globais nada mais são do que longos programas de computador ("código computacional") onde se resolvem numericamente aproximações das equações matemáticas que representam as Leis Físicas (leis de conservação da quantidade de movimento, de massa, de energia, de água na atmosfera e de sal no oceano, lei do gás ideal para a atmosfera). Estas Leis regem os movimentos na atmosfera e as correntes nos oceanos, a interação entre estes dois fluidos e a interação da atmosfera com a vegetação. Os cálculos são feitos dividindo-se a atmosfera e os oceanos em "volumes elementares" ("discretização"), normalmente da ordem de algumas centenas de quilômetros na horizontal para a atmosfera e de 50 a 200 km para os oceanos e de centenas de metros a poucos quilômetros na vertical tanto no oceano como na atmosfera. Os cálculos são feitos em intervalos finitos de tempo, normalmente de 30 minutos a 1 hora. Estes modelos possuem representações físicas de como a radiação visível e infravermelha (térmica) interage com as moléculas presentes na atmosfera (principalmente, N₂, O₂, O₃, H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, clorofluocarbonos, CFC) e com as nuvens (gotículas d'água) e aerossóis. Desta maneira, é possível simular o efeito de aumentar-se a concentração de GEE. Estes cálculos são realizados para simular o comportamento do sistema climático por séculos, demandando supercomputadores de altíssimo desempenho.

Change, IPCC) concluiu um estudo sobre cenários de emissões (IPCC, 2000) e, baseado nestes e em resultados de 10 simulações com modelos climáticos globais cobrindo, pelo menos, o período de 1870 a 2100, foram elaborados cenários de alterações climáticas para várias regiões do planeta, incluindo cenários para o norte da América do Sul. (CARTER and HULME, 2000)

O estudo do IPCC sobre cenários futuros de emissões elaborou várias famílias de cenários, correspondendo a possíveis e diferentes “trajetórias” socioeconômicas para evolução do planeta no século XXI. Nas projeções de Carter e Hulme, foram utilizados quatro desses muitos cenários, designados B1, B2, A1 e A2. As mudanças nas emissões de GEE em 2100, em relação às emissões em 2000, variam entre um decréscimo de 4% (cenário B1 de baixas emissões) até um máximo aumento de 320% (cenário A2 de altas emissões, que é próximo do que se convencionou chamar de *business-as-usual*, isto é, as emissões continuam a crescer como nas últimas décadas). A concentração de CO₂ na atmosfera aumenta de um valor de aproximadamente 370 partes por milhão em volume (ppmv) em 1999 para cerca de 550 ppmv em 2100 (cenário B1) e para mais de 830 ppmv (cenário A2), isto é, cerca de três vezes a concentração antes da era industrial de cerca de 280 ppmv. A concentração dos outros GEE (principalmente CH₄, N₂O, e O₃ troposférico) também aumenta neste cenários. Os demais cenários (B2 e A1) são semelhantes um ao outro e intermediários entre o cenário de baixa emissão (B1) e o cenário de alta emissão (A2).

As projeções do estudo do IPCC para a América do Sul tropical (figuras 14 e 15) mostram, de modo geral, um aumento de temperatura até 2080 de aproximadamente 1 °C (cenário B1 de baixa emissão) até mais de 6 °C (cenário A2 de alta emissão) em 2080. Com relação à precipitação, o nível de incerteza é ainda muito grande. Em primeiro lugar, as diversas simulações numéricas não concordam entre si. Para os trimestres MAM, JJA e SON no norte da América do Sul, há simulações que indicam aumento de precipitação, enquanto outras mostram redução. Somente para o trimestre DJF, há predominância de simulações indicando aumento de precipitação. Em termos de magnitudes, as mudanças de precipitação situam-se entre 0 e ±3% para o cenário B1 e entre 0 e ±10% (até + 15% para o trimestre MAM) para o cenário A2 em 2080.

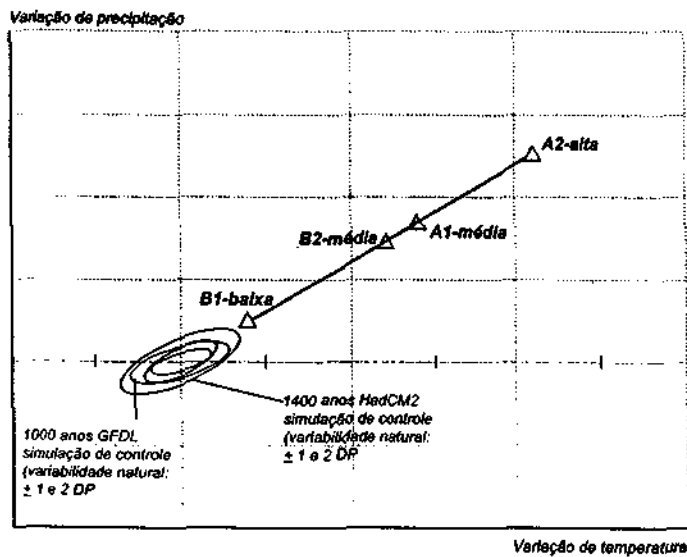
FIGURA 14A - MAPA MOSTRANDO A REGIÃO DA AMÉRICA DO SUL (NSA) APRESENTADA NA FIGURA 15



FONTE: Adaptado de Carter and Hulme, 2000

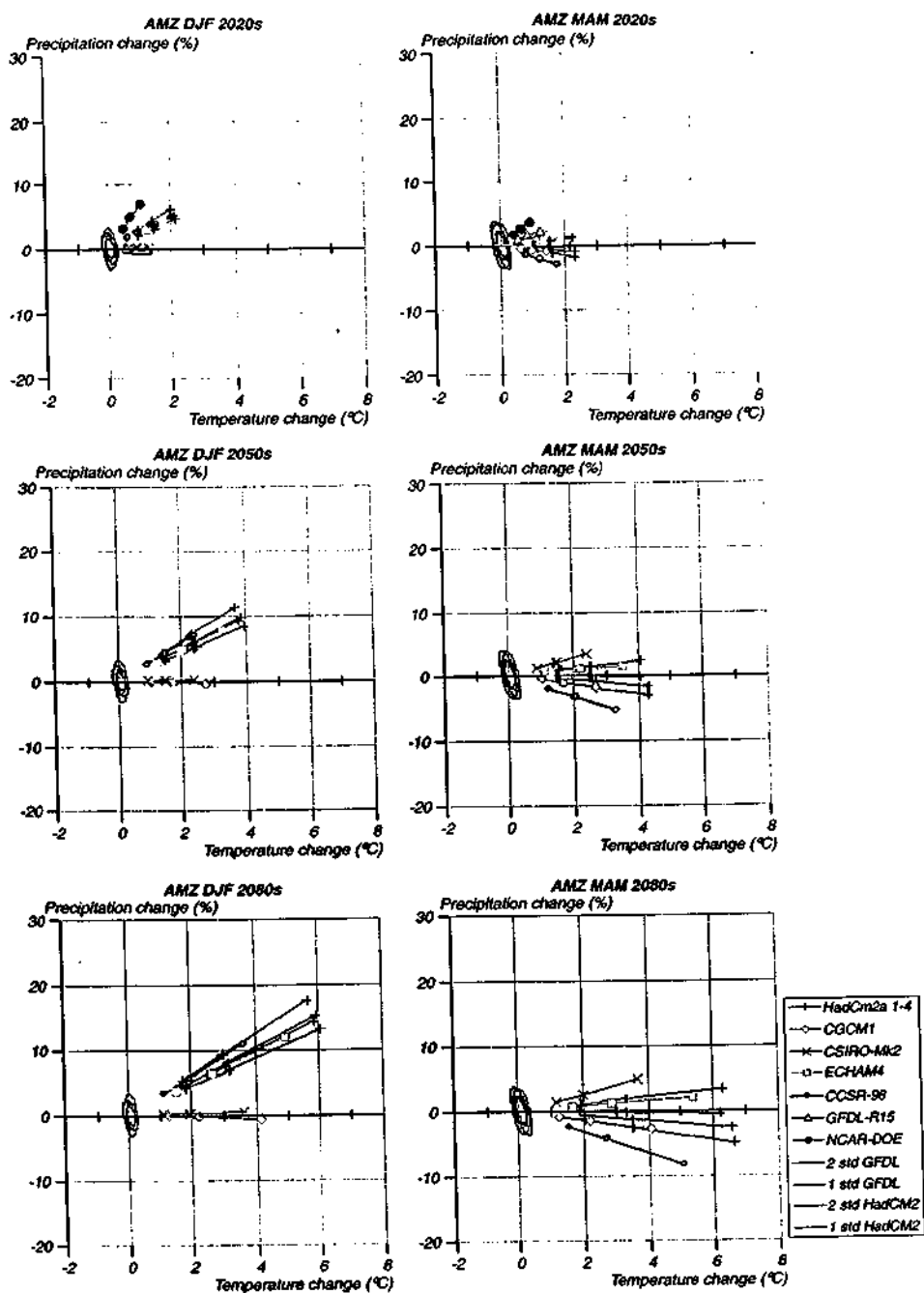
NOTA: As regiões são definidas na grade do modelo climático HadCMs. Os domínios regionais são ligeiramente diferentes para cada um dos outros modelos climáticos.

FIGURA 14B - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS DIAGRAMAS DE ESPALHAMENTO ("SCATTER PLOTS") DAS MUDANÇAS SAZONAIS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO PARA OS 4 CENÁRIOS DE EMISSÕES SRES, APRESENTADOS NA FIGURA 15



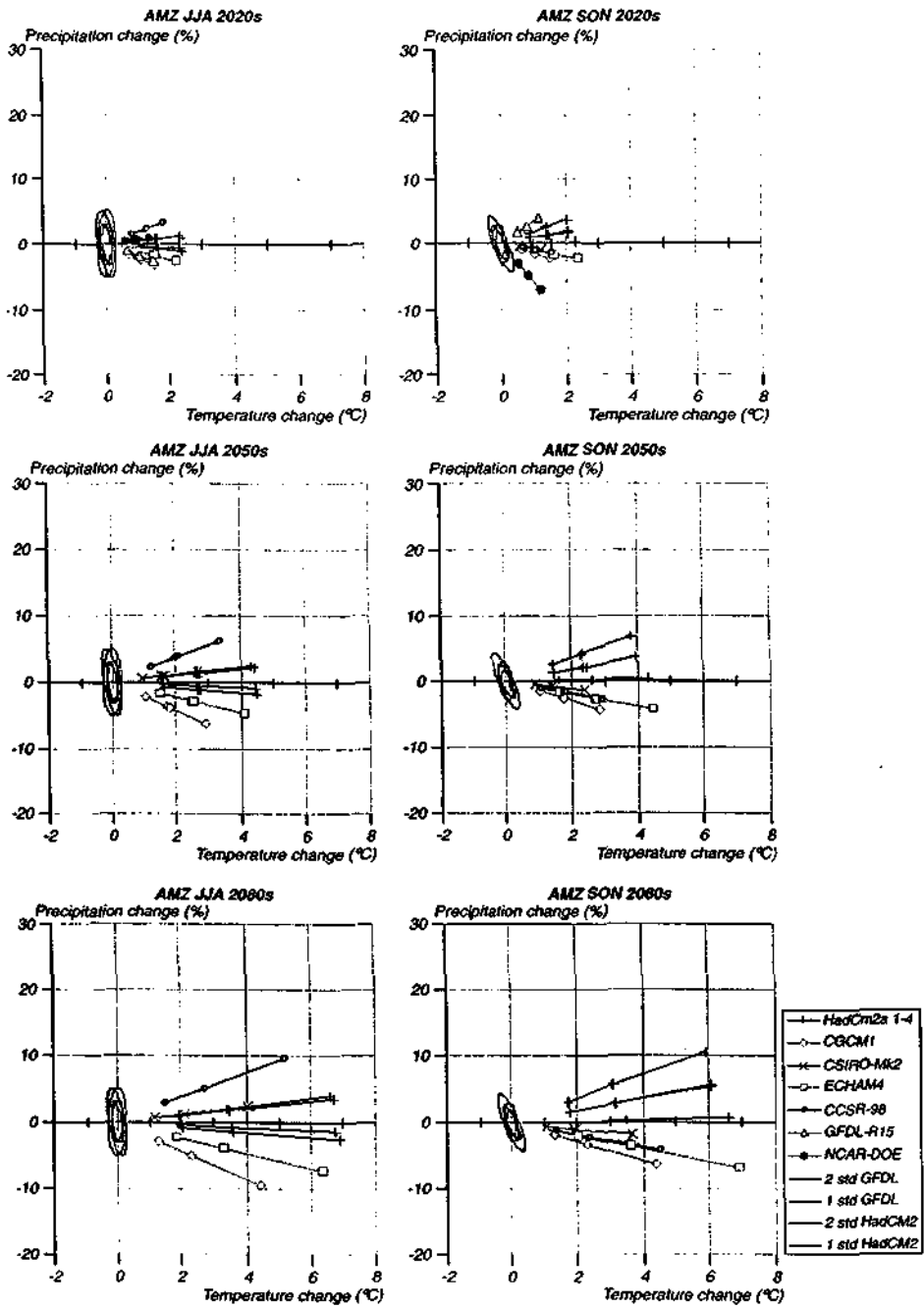
FONTE: Adaptado de Carter and Hulme, 2000

FIGURA 15A - NORTE DA AMÉRICA DO SUL (NAS) - DEZEMBRO-FEVEREIRO E MARÇO-MAIO



FONTE: Adaptado de Carter e Hulme, 2000.

FIGURA 15B - NORTE DA AMÉRICA DO SUL (NAS) - JULHO-AGOSTO E SETEMBRO-NOVEMBRO



FONTE: Adaptado de Carter e Hulme, 2000.

O nível de incerteza com relação a mudanças da frequência de ocorrência de extremos climáticos é ainda maior do que para a distribuição das precipitações pluviométricas. Espera-se, no entanto, que, devido ao aumento da temperatura nas camadas atmosféricas próximas à superfície, esta irá reter mais vapor d'água, o que poderá provocar uma "aceleração" do ciclo hidrológico,⁸ possivelmente aumentando a ocorrência de extremos como tempestades severas. Entretanto, apesar da plausibilidade desta hipótese sob o ponto de vista físico, ela necessita ainda ser comprovada.

A incerteza com relação ao sinal das mudanças de precipitação torna, no momento, impossível estabelecer categoricamente os efeitos das mudanças climáticas globais sobre os ecossistemas amazônicos e sobre a atividade agrícola, principalmente quando se considera que, estando a Amazônia situada em regiões tropicais, fora do alcance de geadas e temperaturas muito baixas, o fator climático determinante é o regime de chuvas. Como mostrado acima, há ainda grande incerteza sobre as mudanças nos regimes pluviométricos em escala regional.

Para a Amazônia, em particular, se houver redução de precipitações induzidas pelas mudanças climáticas globais, estas se somam às reduções previstas como resposta ao desmatamento (NOBRE et al., 1991), aumentando sobremaneira a suscetibilidade dos ecossistemas amazônicos ao fogo e causando a redução das espécies menos tolerantes à seca, podendo até induzir uma "savanização" de partes da Amazônia, isto é, predominariam espécies de savanas nas bordas sul, leste e norte da região, espécies estas mais tolerantes a estações secas mais prolongadas. Por outro lado, se houver tendência ao aumento

⁸ Essa possível "aceleração" do ciclo hidrológico pode ser ilustrada comparando-se, por exemplo, o clima de inverno e verão no Sudeste do país. Dificilmente ocorrem no inverno tempestades severas, vendavais, chuva de granizo. Já no verão estes são fenômenos comuns porque a temperatura do ar é maior e há muito mais vapor d'água na atmosfera. Portanto, em geral uma atmosfera mais aquecida e com mais vapor d'água irá propiciar maior quantidade destes fenômenos extremos.

das precipitações, estes atuariam para contrabalançar a redução das chuvas devido ao desmatamento e o resultado final seria mais favorável à manutenção dos ecossistemas e espécies. Paradoxalmente, a agricultura tradicional e pecuária extensiva poderiam se beneficiar de condições mais secas na Amazônia uma vez que o excesso de umidade tem sido apontado, ao lado da baixa fertilidade dos solos, como um dos responsáveis pela baixíssima produtividade de quase todas as iniciativas agropecuárias ensejadas até hoje na região tropical úmida. (IMAZON & BANCO MUNDIAL, 2000)

Ainda para a Amazônia, com respeito às modificações de temperatura, nota-se que a projeção de aumento de temperatura global segue a mesma tendência de aumento de temperatura à superfície devido ao desmatamento. (NOBRE, 1991) As várias simulações dos efeitos climáticos da substituição da floresta por pastagens na Amazônia e as observações dos projetos Abracos (GASH et al., 1996; GASH and NOBRE, 1998) e LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) indicam que há um aumento entre 1 e 2 °C devido à mudança de vegetação de floresta para pastagem. Este aumento é maior do que aquele projetado pelo cenário B1, mas bem inferior àquele previsto pelo cenário A2 para o final do século. Provavelmente os efeitos de aumento de temperatura induzido pelas mudanças globais e aquele advindo do desmatamento se somariam, aumentando o risco de incêndios florestais porque o secamento da vegetação na estação seca e sua flamabilidade são maiores com temperaturas mais altas. (NEPSTAD et al., 1999) Em resumo, para a Amazônia os aumentos projetados de temperatura atuariam como *feedback* positivo e aumentariam a suscetibilidade dos ecossistemas amazônicos às mudanças climáticas globais devido ao aumento do efeito estufa e regionais devido ao desmatamento. Entretanto, a incerteza sobre como serão as alterações dos regimes de precipitação impede que se avalie se o *feedback* climático será positivo ou negativo com relação a este parâmetro climático.

De modo geral, os aumentos previstos de temperatura para a Amazônia (1 a 6 °C dependendo do cenário de emissões) causariam aumento de evaporação⁹ à superfície, provocando alterações nos balanços hídricos da vegetação natural e de culturas agrícolas. Em regiões onde a agricultura predominante é de sequeiro e a insuficiência e irregularidade das chuvas já a torna marginal, como na maior parte do semi-árido e em partes do Cerrado, um quadro de maior evaporação, principalmente para aumentos de temperatura acima de 3 °C, resultaria em menor quantidade de água no solo e poderia tornar a prática agrícola ainda mais marginal, a não ser que esta alteração climática fosse acompanhada de aumento e/ou maior regularidade das chuvas.

As próprias mudanças climáticas podem induzir a modificações importantes nos estoques e fluxos de carbono dos ecossistemas. O potencial líquido de emissão de CO₂ através da conversão de toda a floresta amazônica em outra paisagem que a substitua é muito alto: aproximadamente 77 Gton C. (FEARNSIDE, 2000) Se houver redução da precipitação na Amazônia, somada ao aumento de temperatura, poderá haver substituição em grande escala da floresta por savanas, que contém menor quantidade de biomassa. Haveria, nesse caso, um “pulso” de emissão de CO₂ para a atmosfera, aumentando ainda mais o efeito estufa, isto é, um *feedback* positivo para o sistema climático.

Enfatiza-se que a confiabilidade é baixa com respeito às previsões de mudanças da frequência de ocorrência de extremos do tempo e do clima, além da previsão de mudanças dos regimes pluviométricos. Espera-se que a incerteza na estimativa regional das alterações da precipitação e na estimativa do comportamento dos extremos seja reduzida substancialmente nesta próxima década mediante o uso de modelos climáticos mais complexos e que levem em conta explicitamente o clima regional.

⁹ Quanto mais alta a temperatura do ar, mais vapor d'água a atmosfera poderá reter na forma de vapor, portanto, aumentando a demanda evaporativa da superfície.

4 VULNERABILIDADE A MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Teceremos aqui algumas considerações sobre vulnerabilidade às mudanças climáticas globais e capacidade de adaptação. Há no Brasil uma enorme carência de estudos sobre a vulnerabilidade da sociedade, da economia e do ambiente às mudanças climáticas globais. Em parte isso se deve à falsa expectativa de que, por ser o Brasil um país tropical, os efeitos do aumento de temperatura seriam menores e a adaptação a eles, mais fácil. Uma outra explicação para a relativa “despreocupação” nacional com respeito à problemática de mudanças globais era centrada na percepção de que os países têm problemas muito mais graves e prementes a resolver no que concerne a um desenvolvimento com equidade e justiça social visando à eliminação da pobreza. Entretanto, são justamente os países em desenvolvimento aqueles mais vulneráveis às mudanças climáticas e ambientais de modo geral e dentro do país serão as populações mais pobres as mais atingidas, haja vista que a degradação ambiental sempre afeta mais profundamente os mais pobres e os excluídos. É difícil imaginar que isto não se repetiria com as mudanças climáticas globais.

Portanto, faz-se imperativa a identificação das vulnerabilidades da sociedade, inclusive, aquelas das atividades agrícolas, vulnerabilidades que possam colocar em risco a produção de alimentos. Estes exercícios podem e devem ser iniciados antes mesmo de termos certeza sobre como e quando ocorrerão mudanças climáticas de grande magnitude no país. A conhecida vulnerabilidade da produção agrícola de grande parte do país à variabilidade dos regimes de chuvas é um excelente laboratório para se conhecer em detalhes os impactos do clima na agricultura.

Detectadas as potenciais vulnerabilidades, deve-se iniciar a busca de estratégias e tecnologias para a adaptação, inclusive tirando proveito de eventuais mudanças climáticas que sejam benéficas. No campo da agricultura e silvicultura isso passará pelo estabelecimento de cenários de zoneamentos agrícolas e florestais possíveis em função dos cenários de mudanças climáticas e torna-se imprescindível acentuada modernização das práticas agrícolas e florestais, com disseminação no campo de educação básica e tecnológica de modo a tornar factível

a adaptação às mudanças climáticas da agricultura familiar em pequenas e médias propriedades, já que é nesta escala que as respostas a mudanças climáticas podem ser mais rápidas e eficientes.

5 CONCLUSÕES

No balanço global de carbono na atmosfera de nosso planeta, das 7,0 a 8,5 bilhões de toneladas de carbono emitidos anualmente na forma de dióxido de carbono (CO₂) pela queima de combustíveis fósseis, produção de cimento e queima de biomassa, somente 3,3 bilhões permanecem na atmosfera, provocando o aumento do efeito estufa (aumento do aquecimento da superfície e da baixa troposfera devido à absorção de calor pelas moléculas de vários gases minoritários da atmosfera, principalmente o vapor d'água, dióxido de carbono, metano, óxido nítrico e ozônio). O restante é reabsorvido pelos oceanos e pela biota terrestre, estima-se que em partes aproximadamente iguais. Há evidências apontando que tanto as florestas temperadas como as florestas tropicais estão re-assimilando parte deste excesso de CO₂ atmosférico.

À primeira vista, a Amazônia aparenta ser uma fonte de CO₂ para a atmosfera. Em média, a emissão líquida de carbono da Amazônia brasileira aproxima-se de 200 milhões de toneladas por ano, levando-se em conta a emissão por queima de biomassa dos desmatamentos, pela relativamente rápida decomposição tanto da biomassa que resta após as queimadas como da matéria orgânica no solo e pela retirada de madeira e ainda a re-assimilação de carbono pela rebrota da floresta em áreas abandonadas. Este total representa entre cerca de 10% das emissões globais devido a mudanças dos usos da terra e da cobertura vegetal. Esta emissão de carbono para a atmosfera pode ser ainda maior pois, no cálculo acima, não foram computadas as emissões resultantes das queimadas de florestas em pé, como, por exemplo, o mega-incêndio florestal de Roraima no primeiros meses de 1998. Normalmente a floresta úmida é impenetrável ao fogo pois a alta umidade torna a madeira pouco inflamável. Entretanto, a lenta degradação e fragmentação que a floresta vem sofrendo ao longo das últimas décadas, que se acelera com o aumento da extração seletiva de madeira por métodos não sustentáveis,

torna-a suscetível ao fogo pois a radiação solar pode penetrar mais facilmente, causando o secamento da madeira e aumentando sua flamabilidade. Esta situação é potencializada nas áreas da Amazônia sujeitas a secas prolongadas, como aquelas provocadas pelo fenômeno El Niño no norte e leste da região.

Por outro lado, medições no projeto LBA do fluxo líquido de CO₂ em áreas de floresta não perturbada (isto é, a diferença entre o fluxo de CO₂ da atmosfera para a floresta utilizado no processo de assimilação de carbono através da fotossíntese durante o dia e o fluxo de CO₂ da floresta para atmosfera emitido pela respiração das plantas e devido à decomposição da matéria orgânica no chão da floresta e no solo), realizadas no leste, centro e sudoeste da região, têm mostrado que a floresta aparentemente funciona como um sumidouro de parte do excesso de CO₂ atmosférico, assimilando valores bastante expressivos, não inferiores a 2 toneladas de carbono por hectare por ano. Estes resultados são corroborados por duas outras estimativas independentes do balanço de carbono na Amazônia: inventários florestais em vários locais na América do Sul tropical e estimativas de fontes e sumidouros continentais de carbono pela inversão do cálculo do transporte atmosférico de CO₂. Também estes dois outros métodos apontam que a América do Sul tropical é sumidouro de CO₂ atmosférico. Durante o LBA, o longo período de amostragem e o maior número de pontos de medição irão permitir esclarecer se e até que ponto a floresta Amazônica está desempenhando este importante papel de sumidouro de carbono para a atmosfera global.

Em resumo, pode-se afirmar que o balanço de evidências observacionais atuais impede que seja descartada a possibilidade de que a floresta tropical amazônica esteja, de fato, funcionando como um sumidouro de carbono para a atmosfera, mas também parece evidente que não continuará a desempenhar este papel indefinidamente, principalmente no caso de aumento das temperaturas devido ao aquecimento global.

REFERÊNCIAS

- BOLIN, B., SUKUMAR, R., CIAIS, P., CRAMER, W., JARVIS, P., KHESHGI, H., NOBRE, C., SEMENOV, S., STEFFEN, W., LINDER, S., and JOOS, F., Global Perspective. In: WATSON, R. T., NOBLE, I. R., BOLIN, B., RAVINDRANATH, VERARDO D. J., DOKKEN, D.J. **Land Use, Land-Use Change and Forestry – A Special Report of the IPCC**. Cambridge University Press, 377 pp. 2000.
- CARTER, T., and M. Hulme. **Interim Characterizations of Regional Climate and Related Changes up do 2100 Associates with the Provisional SRES Marker Emissions Scenarios**. IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland. 2000.
- CARVALHO, J. A., COSTA, F. S., GIELOW, R., SANDBERG, D. V. ALVARADO, E. C., VERAS, C. A. G., SERRA JR., A. M., SANTOS, J. C. **Biomass combustion experiments conducted in Fazenda Caiabi, near Alta Floresta, MT, Brazil**. Primeira Conferência Científica do Projeto LBA, 25-30 Junho de 2000, Belém, PA, Brasil. Disponível em: <http://sauva.cptec.inpe.br/posters/2000>.
- CIAIS, P., P. P. Tans, J.W. White, M. Trolier, R. Francey, J. Berry, D. Randall, P. Sellers, J. Collatz, and D.S. Schimel. Partitioning of the ocean and land uptake of CO₂ from delta ¹³C measurements from the NOAA/CMDL global air sampling network. **Journal of Geophysical Research**, 100 (D3), 5051-5057. 1995.
- FEARNSIDE, P. O Potencial do Setor Florestal Brasileiro para a Mitigação do Efeito Estufa sob o "Mecanismo de Desenvolvimento Limpo" do Protocolo de Kyoto. In " " Ed. A.G. Moreira & S. Schwartzman, UNB, **As Mudanças Climáticas Globais e os Ecossistemas Brasileiros** Brasília, 59-74. 2000.
- GASH, J.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R., eds. **Amazonian deforestation and climate**. New York, John Wiley and Sons, 1996. 611p.
- GASH, J. H. C.; NOBRE, C.A. Climatic effects of Amazonian deforestation: Some results from ABRACOS. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.78, n.5, p.823-830. 1997.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H; NOBRE, C. A.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in Sothwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science**, v. 270, n.5237, p.778-780. 1995.
- HOUGHTON, R. A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. **Tellus**, 50B, 298-313. 1999.
- HOUGHTON, R. A., SKOLE, D., NOBRE, C. A., HACKLER, J., LAWRENCE, K., CHOMENTOWSKI, W. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon". **Nature**, v.403, 301-304.
- INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA (IMAZON) e BANCO MUNDIAL. **Amazônia Florestal: oportunidades para uma economia sustentável. Série Parceria**, No 01. 82 p. Brasília. 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite: 1998–2000. São José dos Campos, SP, Brasil. 2000. (disponível em http://www.inpe.br/Informacoes_Eventos/amazonia.htm)

IPCC. **Emissions Scenarios – IPCC Special Report**. IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland. 2000.

KELLER, M., CLARK, D. A., CLARK, D. B., WEITZ, A. M. and VELDKAMP, E. If a tree falls in the forest... **Science**, 273:201. 1996.

MALHI, Y., A. D. Nobre, J. Grace, B. Kruijt, M. G. P. Pereira, A. Culf, and S. Scott. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, D24, 31593-31612. 1998.

MALHI, Y., D. D. Baldochi, and P. G. Jarvis. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell and Environment**, 22, 715-740. 1999.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Setor Energético. In: **Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. Setor Agropecuário. MCT, Brasília, DF, Brasil. 2000a. (disponível em http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/energia.htm).

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Emissão de Metano Proveniente da Pecuária. In: **Inventário Brasileiro das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. Setor Agropecuário. MCT, Brasília, DF, Brasil. 2000b. (disponível em http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/pecuaria.htm).

NEPSTAD, D. C.; VERISSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C. A.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDONZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v.398, n.6727, p. 505-508. 1999.

NOBRE, A.; MALHI, Y.; ARAUJO, A. C.; CULF, A. D.; DOLMAN, A. D.; ELBERS, J.; KRUIJT, B.; RANDOW, C.; MANZI, A. O.; GRACE, J.; KABAT, P. **Multiyear comparative analysis of NEP and environmental factors for Manaus rainforest: “La Niña” influence on CO₂ uptake**. Primeira Conferência Científica do Projeto LBA, 25-30 Junho de 2000, Belém, PA, Brasil. Disponível em: <http://sauva.cptec.inpe.br/posters/>

NOBRE, C. A.; SELLERS, P.; SHUKLA, J. Regional climate change and amazonian deforestation model. **Journal of Climate**, v.4, n.10, p.957-988. 1991.

PHILLIPS, O. L., Y. Malhi, N. Higuchi, W. F. Laurance, R.M. Núñez, D. J. D. Vázquez, L. V. Laurance, S. G., Ferreira, M. Stern, S. Brown, and J. Grace. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. **Science**, 282, 439-442. 1998.

RAYNER, P. J., I. G. Enting, R. J. Francey, and R. Langfelds. Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, D¹³ C and O₂/N₂ observations, **Tellus**, (in press). 2000.

WATSON, R. T., NOBRE, I. R., BOLIN, B., RAVINDRANATH, N. H., VERARDO, D. J., and DOKKEN, D. J. **Land Use, Land-Use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC**. Cambridge University Press, 377 pp. 2000.