



Emissões de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais em Roraima: fontes e sumidouros¹

Greenhouse gas emissions from deforestation and forest fires in Roraima: sources and sinks

Philip Martin Fearnside^{2*}, Reinaldo Imbrozio Barbosa³, Vaneza Barreto Pereira⁴

Resumo - Emissões de gases do efeito estufa (GEE) em Roraima – Brasil estão relacionadas diretamente à ocupação humana e as alterações do uso do solo nos sistemas florestais. Características geoeconômicas e políticas foram as bases do fomento e da sedimentação de áreas de colonização para pequenos produtores rurais e grandes projetos de desenvolvimento regional em Roraima desde o final da década de 1970. Isso incrementou a demanda por terras e intensificou o desmatamento por toda a região florestal situada ao longo dos principais eixos rodoviários (BRs 174 e 210). Este modelo de desenvolvimento implicou na emissão de grandes somas de GEE para a atmosfera, além de aumentar a frequência de incêndios florestais nos principais eixos de assentamento humano. Objetivou-se com este trabalho revisar os estudos feitos para quantificar as emissões de GEE provenientes das alterações do uso da terra e incêndios florestais, indicando fontes e sumidouros, além de contextualizar o estado de Roraima no cenário amazônico das mudanças climáticas. O entendimento desta dinâmica é uma das bases do planejamento estratégico para alteração das atuais políticas públicas locais, invertendo a lógica de valoração dos usos não sustentáveis da terra em detrimento dos serviços ambientais provenientes da floresta.

Palavras-chave - Uso da Terra. Queimada. Impactos Ambientais. Serviços Ambientais. Carbono. Aquecimento Global

Abstract - Greenhouse gas (GHG) emissions from Roraima State - Brazil are directly related to human occupation and to land-use changes in forest ecosystems. Geo-economic and political considerations were the basis for the development and consolidation of settlement areas for small farmers and for implanting large regional development projects in Roraima since the late 1970s. This increased demand for land intensified deforestation across the forest region situated along the main highways (BR-174 and BR-210). This development model resulted in the emission of large amounts of GHG to the atmosphere and increased the frequency of forest fires on the main axes of human settlement. The aim of this paper is to review the studies done to quantify GHG emissions from land-use changes and forest fires, indicating the sources and sinks, and to place Roraima in the context of climate change in Amazonia. Understanding this dynamic provides a foundation for strategic planning to change local public policies, reversing the current logic that gives greater value to unsustainable land uses as compared to forest environmental services.

Key words - Land Use. Burning. Environmental Impacts. Environmental Services. Carbon. Global Warming

*Autor para correspondência

¹Enviado para publicação em 17/09/2012 e aprovado em 02/04/2013

Estudo de revisão temática baseado nas investigações de Barbosa e Fearnside (1999), Barbosa *et al.* (2003) e Fearnside (2010).

²Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Coordenação de Dinâmica Ambiental, pmfearn@inpa.gov.br

³Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Coordenação de Dinâmica Ambiental, Núcleo de Roraima, reinaldo@inpa.gov.br

⁴Universidade Federal de Roraima, Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, vaneza1970@hotmail.com

Introdução

Em Roraima, e por toda a Amazônia, o manejo tradicional das áreas florestais para introdução de pastagens, cultivos agrícolas temporários ou perenes é calcado no sistema de corte e queima (PERZ; WALKER, 2002; NEPSTAD *et al.*, 2008; BARNI *et al.*, 2012). Ou seja, a floresta é derrubada e queimada, sendo o fogo o instrumento que desobstrui os resíduos (biomassa de troncos e grandes galhos) da área para uso agropecuário. Quando as queimadas fogem do controle se transformam em incêndios florestais que podem atingir grandes extensões de terra, como foi o caso do grande incêndio de Roraima em 1998 e 2003 (BARBOSA; FEARNSIDE, 1999; NEPSTAD *et al.*, 1999; VASCONCELOS *et al.*, 2013; XAUD *et al.*, 2013). Tanto nas queimadas quanto nos incêndios, a eliminação do material orgânico por fogo gera a emissão de gases poluentes para a atmosfera, com destaque para o gás carbônico ou dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). São os chamados gases de efeito estufa ou bloqueadores de calor (IPCC, 2006). O acúmulo destes poluentes na atmosfera provoca mudanças climáticas globais, com efeitos diretos na elevação da temperatura, troca no regime de chuvas e elevação do nível do mar (MEEHL *et al.*, 2007a). A principal consequência econômica destas mudanças são as alterações na cadeia produtiva agropecuária dos principais países produtores de grãos e carne (EASTERLING *et al.*, 2007; BRANDÃO *et al.*, 2012).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC; sigla em inglês) avalia que cerca de um quarto de todas as emissões globais de gases do efeito estufa são derivadas do desmatamento e da queima de seus resíduos. A estimativa da Segunda Comunicação Nacional do Brasil é de que 77% das emissões de CO₂ e 61% das de metano de todo o país foram derivadas das mudanças do uso da terra no ano de 2005; quase todas provenientes da Amazônia (BRASIL, 2010). A Amazônia brasileira, por ser a maior área contínua de florestas tropicais do planeta, possui um papel fundamental no controle destas emissões por dois motivos contraditórios: (i) pode mitigar os efeitos negativos do aquecimento global devido ao enorme potencial de estoque de carbono (NEPSTAD *et al.*, 2008) e, ao mesmo tempo, (ii) possui grandes áreas desmatadas anualmente que contribuem com o aumento da concentração de gases poluentes na atmosfera (FEARNSIDE; LAURANCE, 2004).

Embora Roraima ainda possua área (9.577 km²) e taxa (266 km² ano⁻¹) de desmatamento (1977-2012) que podem ser consideradas pequenas em relação aos demais estados amazônicos, é razoável imaginar que as políticas públicas locais de incentivo ao desenvolvimento possuam efeitos deletérios nos sistemas florestais. Por exemplo, a

expansão de áreas de colonização impeliu o município de Mucajaí a ter mais de 26% de sua área não institucional comprometida por desmatamentos até 2006, levando o município a ter problemas com o repasse de verbas federais. Entender a dinâmica das emissões de gases poluentes por desmatamentos e incêndios florestais em Roraima é uma das bases do planejamento estratégico para alteração das atuais políticas públicas locais, invertendo a lógica de valoração dos usos não sustentáveis do solo em detrimento dos serviços ambientais provenientes da floresta. Sendo assim, objetivou-se com este trabalho revisar os estudos feitos para quantificar as emissões de GEE provenientes das alterações do uso da terra e incêndios florestais, indicando fontes e sumidouros, além de contextualizar o estado de Roraima no cenário amazônico das mudanças climáticas.

Emissões por desmatamento

Os métodos utilizados para cálculo das emissões por desmatamento são os preconizados pelo IPCC para todo o planeta (IPCC, 2006). No estado de Roraima, o desmatamento libera quantidades de gases do efeito estufa significativas em termos do impacto atual e do potencial implicado para a contribuição da região Amazônica ao aquecimento global. O modo de calcular as emissões pode ter um grande efeito no impacto atribuído ao desmatamento. Uma forma de cálculo enfoca as **emissões líquidas comprometidas**, que expressam a contribuição da transformação final da paisagem florestal em uma nova, utilizando como base de comparação o mosaico dos usos da terra que resultariam de uma condição de equilíbrio criada pela projeção das tendências atuais. Isto inclui emissões de decomposição e de requeimas dos troncos que permanecem sem queimar quando a floresta é inicialmente derrubada, e absorção de carbono pelas florestas secundárias crescendo em locais abandonados após o uso por agricultura e pecuária (absorção comprometida), assim resultando na estimativa das emissões líquidas comprometidas (FEARNSIDE, 1997a; FEARNSIDE *et al.*, 2009).

Outra forma de cálculo é o **balanço anual** de liberação e absorção dos gases do efeito estufa em um determinado ano (FEARNSIDE, 1996a, 2009a). Neste estudo, derivou-se os resultados para Roraima por esta segunda forma, tomando como base o ano de 1990 (ano de referência para o Protocolo de Kyoto), visando o entendimento dos fluxos dos GEE no nível regional. O balanço anual representa uma medida instantânea destes fluxos, dos quais o dióxido de carbono é o mais importante, seguido por carbono grafítico (aerossóis) e metano (BOND *et al.*, 2013). O balanço anual representa bem a dinâmica anual de emissões por desmatamento, embora não seja a melhor medida do impacto sobre o efeito estufa.

Emissões líquidas comprometidas e emissões líquidas temporalmente ponderadas possuem mais sentido para decisões políticas, sobretudo a última.

Desmatamento em Roraima

A taxa anual de desmatamento em Roraima para o período 1977-1988 foi estimada a partir das avaliações de imagens de satélite por TARDIN *et al.* (1980) (SKOLE; TUCKER, 1993; FEARNNSIDE, 1993a) e FEARNNSIDE *et al.* (1990), resultando num valor de $0,29 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 1). Para os anos seguintes, os dados são do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Conforme a Tabela 1, verifica-se que a taxa de desmatamento em Roraima é muito variável. Estas variações estão, em geral, associadas aos anos iniciais de transformação do Território em Estado e aos anos com grandes movimentações políticas por causa de campanhas eleitorais estaduais ou municipais. Por exemplo, até 1990 nenhuma área havia sido inundada por hidrelétricas em Roraima, sendo a UHE Jatapú (45 km^2) a primeira, com a barragem totalmente cheia em abril de 1994 (FEARNNSIDE; BARBOSA, 1996). A área inundada pode ser aumentada em 12 vezes, caso a barragem do rio Branco, na região das corredeiras do Bem-Querer, seja levada adiante. A tendência de queda nas taxas de desmatamento a partir de 2009 está associada às ações de fiscalização e controle do Governo Federal para toda a Amazônia. Especificamente para o ano de 2010 (38 km^2), a queda na área desmatada em Roraima está relacionada à intervenção do Comitê Estadual de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais que cancelou as autorizações de desmatamento por causa do forte evento El Niño daquele ano. Observa-se que a taxa de desmatamento em anos recentes é menor que a taxa de 1990 ($0,161 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$) utilizada para os cálculos de base; por exemplo, em 2011 a taxa foi 12,4% menor em relação à 1990 e, em 2012, 29,2% inferior. Mais recentemente, no entanto, o sul de Roraima tem surgido como um dos pontos de maior atividade de desmatamento na Amazônia Legal (BARNI *et al.*, 2012; INPE, 2013).

Biomassa das florestas de Roraima

A biomassa das florestas representa um dos fatores mais importantes que determinam a quantidade de emissões de gases provocadores do efeito estufa liberada pelo desmatamento. Em média, 48% (SILVA, 2007) a 50% (FEARNNSIDE *et al.*, 1993) da biomassa seca das madeiras amazônicas são compostas de carbono. Este carbono é liberado por queimadas, incêndios e decomposição natural, principalmente nas formas de CO_2 , CH_4 e óxido nitroso (N_2O). O monóxido de carbono (CO) também é liberado, mas este gás é considerado de efeito indireto; não participa diretamente do aquecimento global, mas propicia maior tempo de permanência do CH_4 na atmosfera porque possui

Tabela 1 - Desmatamento em Roraima no período de 1977 a 2012

Ano ^{1/}	Taxa de desmatamento ($10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$)	Área Acumulada (10^3 km^2)
1977-88	0,290	3.190
1989	0,673	3.863
1990	0,161	4.024
1991	0,420	4.444
1992	0,281	4.725
1993-94	0,240	5.205
1995	0,220	5.425
1996	0,214	5.639
1997	0,184	5.823
1998	0,223	6.046
1999	0,220	6.266
2000	0,253	6.519
2001	0,345	6.864
2002	0,084	6.948
2003	0,439	7.387
2004	0,311	7.698
2005	0,133	7.831
2006	0,231	8.062
2007	0,309	8.371
2008	0,574	8.945
2009	0,121	9.066
2010	0,256	9.322
2011	0,141	9.463
2012	0,114	9.577

^{1/}Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>) e ajustados a partir de Fearnside (2010).

um grande potencial de se coligar às hidroxilas (-OH), que são os radicais responsáveis pela oxidação do CH_4 .

A biomassa média das florestas primárias presentes em Roraima foi calculada de forma indireta baseada na análise dos dados publicados sobre o volume de madeira a partir dos inventários florestais do Projeto RADAMBRASIL (FEARNNSIDE, 2010; BARBOSA *et al.*, 2010). Foram usadas as parcelas distribuídas no Estado, suplementado para alguns tipos de floresta em áreas adjacentes dos estados vizinhos (Pará e Amazonas). A biomassa foi calculada a partir dos dados por árvore extraídas das planilhas dos inventários do Projeto RADAMBRASIL (disponibilizados pelo IBGE), ao invés

de usar os totais de volume por hectare publicados entre 1973-1983 (FEARNSIDE, 2010). Aos valores de volume da madeira foram aplicados os ajustes apropriados para densidade de madeira, irregularidades no tronco e troncos ocos de Nogueira *et al.* (2005; 2006; 2007) e Fearnside (1997b). Aplicando esses métodos gerou-se a Tabela 2, sendo a biomassa total média (incluindo componentes mortos e subterrâneos) de 392 t ha⁻¹ para todas as florestas

maduras não perturbadas originalmente presentes em Roraima. A biomassa média acima do solo foi de 299 t ha⁻¹, sendo 24 t ha⁻¹ consideradas como necromassa (biomassa morta); a biomassa subterrânea média foi estimada em 92 t ha⁻¹. Para as diferentes fitofisionomias utilizou-se o sistema de classificação da vegetação brasileira indicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1992).

Tabela 2 - Estimativa da biomassa das florestas em Roraima

Categoria	Código	Denominação	Área Presente ^{1/} (km ²)	Área Protegida ^{1/} (ha)	Biomassa Total ^{2/} (t ha ⁻¹)
Florestas densas	Da	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	3.326	0	363
	Db	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas	10.248	0	394
	Dm	Floresta Ombrófila Densa Montana	20.661	565	415
	Ds	Floresta Ombrófila Densa Submontana	83.692	5.384	394
Sub-total Florestas densas			117.927	5.949	397
Florestas não densas	As	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	8.430	0	411
	Fs	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	1.041	0	513
	Ld	Vegetação lenhosa oligotrófica e áreas arenosas arbórea densa	10.967	476	336
	LO	Áreas de tensão ecológica e contato Vegetação oligotrófica/floresta ombrófila	30.184	1.581	386
	ON	Áreas de tensão ecológica e contato Floresta ombrófila/estacional	3.045	0	363
	SN	Áreas de tensão ecológica e contato Savana/floresta estacional	904	0	240
	SO	Áreas de tensão ecológica e contato Savana/floresta ombrófila	4.286	0	415
Sub-total Florestas não densas			58.857	2.057	381
Total			176.784	8.006	392

^{1/}Derivado de Fearnside e Ferraz (1995); ^{2/}Atualizado usando dados por árvore corrigidos por Nogueira *et al.* (2005, 2006, 2007).

Emissões de gases do efeito estufa

i. Queima inicial

As emissões e remoções de gases do efeito estufa estão tabuladas para os cenários de “baixo gases-traço” (Tabela 3) e “alto gases-traço” (Tabela 4). Estes dois cenários utilizam os altos e baixos valores que aparecem na literatura para os fatores de emissões para cada gás em

tipos diferentes de queimada (FEARNSIDE, 1992). Eles não refletem a dúvida referente à biomassa florestal, taxas de desmatamento, eficiência de queimada e outros fatores importantes.

A queima inicial representa $2,51 \times 10^6$ t de gás CO_2 , ou 10% da emissão bruta de $14,33\text{-}14,35 \times 10^6$ t. A emissão bruta de um gás refere-se a todas as liberações

Tabela 3 - Balanço anual das emissões líquidas de GEE por fontes nas áreas originalmente florestadas de Roraima: cenário de baixo gases-traço

Fonte	Emissão (Peso do Gás)						Sumidouro (Peso do C)	
	CO_2 (10^6 t)	CH_4 (10^3 t)	CO (10^3 t)	N_2O (10^3 t)	NOx (10^3 t)	NMHC (10^3 t)	Carbono de Carvão Vegetal (10^3 t)	Partículas de Carbono Grafítico (10^3 t)
BIOMASSA DE FLORESTA ORIGINAL								
Queimada inicial ^{1/}	2,51	8,10	194,50	0,50	6,15	5,40	46,12	1,89
Requeimadas	0,91	4,54	142,75	0,18	7,16	2,27	15,27	1,06
Decomposição acima do solo por cupins	0,17	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros tipos decomposição acima do solo	6,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Decomposição abaixo do solo	3,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BIOMASSA DE FLORESTA SECUNDÁRIA								
Queimada ^{2/}	0,29	0,95	22,82	0,06	0,32	0,63	0,05	0,22
Decomposição acima do solo por cupins	0,00	0,003	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros tipos decomposição acima do solo	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Decomposição abaixo do solo	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cupins na floresta secundária	0,00	0,026	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
QUEIMADA DE PASTAGENS	(3/)	0,52	12,58	0,03	0,88	0,35	0,02	0,12
OUTRAS FONTES								
Gado	0,00	2,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo em Pastagens	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdas Fontes/Sumidouros Floresta Intacta	0,00	0,16	0,00	0,00	-36,87	-4,04	0,00	0,00
Perda de Cupins na Floresta Natural	0,00	-0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbono no Solo (20 cm superiores)	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL DAS EMISSÕES	14,33	17,18	372,65	1,47	-22,24	4,62	61,47	3,29
ABSORÇÃO	-0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EMISSIONES LÍQUIDAS	13,46	17,18	372,65	1,47	-22,24	4,62	61,47	3,29

^{1/}A taxa de desmatamento na área originalmente florestada era $16.100 \text{ ha ano}^{-1}$ em 1990; ^{2/}A queimada das florestas secundárias inclui tanto as queimadas iniciais e subsequentes para florestas secundárias derivadas da agricultura e das pastagens, e para pastagens degradadas que são cortadas e recuperadas;

^{3/} CO_2 das queimadas para manutenção das pastagens não é contado, já que este é re-assimilada anualmente na medida em que as pastagens recrescem, fazendo com que o fluxo líquido seja igual a zero. O fluxo bruto estimado para 1990 desta fonte foi $0,173 \times 10^6$ t de gás de CO_2 .

Tabela 4 - Balanço anual das emissões líquidas de GEE por fontes nas áreas originalmente florestadas de Roraima: cenário de alto gases-traço

Fonte	Emissão (Peso do Gás)						Sumidouro (Peso de C)	
	CO ₂	CH ₄	CO	N ₂ O	NO _x	NMHC	Carbono de Carvão Vegetal	Partículas de Carbono Grafítico
	(10 ⁶ t)	(10 ³ t)	(10 ³ t)	(10 ³ t)	(10 ³ t)	(10 ³ t)	(10 ³ t)	(10 ³ t)
BIOMASSA DE FLORESTA ORIGINAL								
Queimada inicial ^{1/}	2,51	9,73	243,13	0,50	6,15	10,20	46,12	2,27
Requeimadas	0,91	7,14	181,68	1,52	7,16	4,40	15,27	1,67
Decomposição acima do solo por cupins	0,17	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros tipos decomposição acima do solo	6,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Decomposição abaixo do solo	3,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BIOMASSA DE FLORESTA SECUNDÁRIA								
Queimada ^{2/}	0,29	1,14	28,52	0,06	0,32	1,20	0,05	0,27
Decomposição acima do solo por cupins	0,003	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros tipos decomposição acima do solo	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Decomposição abaixo do solo	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cupins na floresta secundária	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
QUEIMADA DE PASTAGENS	(3/)	0,63	15,72	0,03	0,88	0,66	0,02	0,15
OUTRAS FONTES								
Gado	0,00	2,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo em Pastagens	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdas Fontes/Sumidouros Floresta Intacta	0,00	0,16	0,00	0,00	-36,87	-4,04	0,00	0,00
Perda de Cupins na Floresta Natural	0,00	-0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbono no Solo (20 cm superiores)	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL DAS EMISSÕES	14,35	21,69	469,05	2,81	-22,24	12,42	61,47	4,35
ABSORÇÃO	-0,874	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EMISSIONES LÍQUIDAS	13,476	21,69	469,05	2,81	-22,24	12,42	61,47	4,35

^{1/}A taxa de desmatamento na área originalmente florestada era 16.100 ha ano⁻¹ em 1990; ^{2/}A queimada das florestas secundárias inclui tanto as queimadas iniciais e subsequentes para florestas secundárias derivadas da agricultura e das pastagens, e para pastagens degradadas que são cortadas e recuperadas; ^{3/} CO₂ das queimadas para manutenção das pastagens não é contado, já que este é re-assimilado anualmente na medida em que as pastagens recrescem, fazendo com que o fluxo líquido seja igual a zero. O fluxo bruto estimado para 1990 desta fonte foi 0,173 × 10⁶ t de gás de CO₂.

do gás, mas não aos fluxos no sentido inverso (absorção). A contribuição do CH₄ na queima inicial é de 8,1-9,7 (45-47%) entre um total de 17,2-21,7 × 10³ t, enquanto que do CO é 194,5-243,6 (52%) de 372,7-469,1 × 10³ t e, do N₂O, é 0,5 (18-34%) de 1,5-2,8 × 10³ t. Para NO_x (moléculas compostas de um átomo de nitrogênio e um

ou mais átomos de oxigênio) e NMHC (hidrocarbonatos não metanos), se considerado à parte da perda de fontes de floresta madura, representam, respectivamente, 6,2 (42%) de 14,5 × 10³ t e 5,4-10,2 (62%) de 8,7-16,5 × 10³ t.

A eficiência de queima (porcentagem de carbono da pré-queima presumivelmente emitida como gás) foi,

em média, de 32,6% nos estudos usados no cálculo: 27,6% em uma queimada de 1984 e 28,3% em uma queimada de 1990 estudadas perto de Manaus (FEARNSIDE *et al.*, 1993; 2001); e 42,0% em três queimadas estudadas em Altamira, Pará, em 1986 (FEARNSIDE *et al.*, 1999). Os ajustes para o efeito da exploração madeireira na distribuição diamétrica da biomassa resultam em uma eficiência de 33,2%. Estudos em queimadas iniciais realizados por Kauffman *et al.* (1995) encontraram eficiências de queima maiores. Com este, são sete estudos atualmente disponíveis de queimas iniciais em florestas originais, com eficiências de queima variando de 27,6% a 56,9%, com média de 44,0%. A sequência completa de queimadas eleva a eficiência total para 56,5%.

A formação de carvão vegetal perfaz uma média de 2,7% e 1,8%, relativo ao carbono acima do solo antes da queimada em Manaus (FEARNSIDE *et al.*, 1993) e de 1,3% em Altamira (FEARNSIDE *et al.*, 1999). O valor utilizado no cálculo atual foi a média de 1,9%. As partículas gráficas de carbono são um sumidouro para o carbono que é queimado. Isto é calculado a partir dos fatores de emissão e da quantidade de madeira queimada. O montante de carbono que entra neste depósito é apenas 1/20 do montante que entra no depósito de carvão.

ii. Queimadas subsequentes

Queimadas subsequentes fazem com que os restos da floresta original e da biomassa florestal secundária entrem em combustão. Os restos florestais originais foram queimados a uma eficiência de 28,0% em um estudo em floresta secundária em Roraima (FEARNSIDE *et al.*, 2007). Numa queimada de pastagens na Colônia do Apiaú, também em Roraima, 12,3% do carbono da pré-queima

nos restos florestais originais foi consumido (BARBOSA; FEARNESIDE, 1996a). A média dos resultados dos dois estudos (20,1%) foi utilizada no cálculo atual.

iii. Decomposição dos resíduos não queimados

A decomposição acima do solo dos restos não queimados está calculada nos estudos disponíveis apresentados na Tabela 5. As taxas de decomposição calculadas por intervalo de tempo para florestas maduras e secundárias estão apresentadas na Tabela 6. A decomposição faz uma contribuição significativa para emissões de gases do efeito estufa. O grande interesse de pesquisadores na queima de biomassa conduz muitas vezes para uma negligência das contribuições derivadas da decomposição.

iv. Emissões de metano por cupins na decomposição da biomassa

As emissões de metano dos cupins na decomposição da biomassa não queimada são substancialmente mais baixas que avaliações anteriores (FEARNSIDE, 1992). Isto é devido principalmente ao fato que as avaliações do número de cupins em áreas desmatadas indicam que as populações são insuficientes para consumir a quantidade de madeira previamente presumida. *Nasutitermes macrocephalus*, a única espécie de cupim da Amazônia para a qual medições se encontram disponíveis, consome 49 mg da madeira seca por g de cupim por dia (MARTIUS *et al.*, 1996). Emissões mais baixas de metano (0,002 g CH₄ por g da madeira seca consumida) também contribuem para menores emissões desta fonte, calculada para totalizar apenas 0,18 × 10³ t de gás de CH₄ da floresta original na área desmatada em Roraima em 1990 (Tabelas 2 e 3).

Tabela 5 – Estudos existentes sobre decomposição acima do solo em roças de agricultura de corte e queima

Tipo de Biomassa	Idade da Biomassa em Decomposição (anos)	Ponto Médio da Idade (anos)	Biomassa Acima do Solo (Peso Seco, t ha ⁻¹)	Intervalo (anos)	Tempo Decorrido no Intervalo (anos)	Taxa de Decomposição (k)
	0	0	188 (a)			
Floresta Madura ^{1/}	3-4	3,5	97,3	0-3,5	3,5	-0,188
	6-7	6,5	56	3,5-6,5	3	-0,184
	8-10	9	45,3	6,5-9	2,5	-0,085
	12-20	16	22,7	9-16	7	-0,099
Floresta Madura ^{2/}	0,5	0,5	279			
	2,5	2,5	208	0,5-2,5	2	-0,147
Floresta Secundária	0,5	0,5	17,7			
	2,5	2,5	14,2	0,5-2,5	2	-0,110

^{1/} Uhl e Saldarriaga (s/d); ^{2/} Buschbacher (1984)

Tabela 6 - Taxas médias de decomposição de restos de florestas maduras e secundárias em intervalos entre queimadas

Intervalo (anos)	Tempo Decorrido no Intervalo (anos)	Floresta Madura ^{1/}		Floresta Secundária	
		Taxa Anual	Fração que Sobrevive a Decomposição no Intervalo	Taxa Anual	Fração que Sobrevive a Decomposição no Intervalo
0-4	5	-0,168	0,400	-0,110	0,558
5-7	3	-0,184	0,543	-0,110	0,705
8-10	3	-0,085	0,767	-0,110	0,705
> 10	Infinito	-0,099	0,000	-0,110	0,000

^{1/}Calculado usando a biomassa inicial de 290 t ha⁻¹ de Stark e Spratt (1977), menos a perda para a combustão com uma eficiência de 0,332 e a formação da fração de carvão de 0,019 (média de medidas de Fearnside *et al.*, 1993; 1999; 2007).

iv. Solos

Para calcular as emissões de CO₂ dos solos, deve ser considerado a camada de solo no uso da terra de substituição (como pastagem, por exemplo), que é compactada de uma dada profundidade do solo florestal (FEARNSIDE, 1980). A emissão calculada (0,32 × 10⁶ t de CO₂) considera apenas os 20 cm superiores do solo florestal. Considerando o solo à profundidade de 1 m, estas emissões aproximadamente duplicariam. Conversão de floresta amazônica em pastagens com manejo típico libera, em média, 7,5 t ha⁻¹ de C dos 20 cm superiores de solo florestal e 5,6 t ha⁻¹ de C da camada de 20-100 cm ao longo dos primeiros 23 anos (FEARNSIDE; BARBOSA, 1998). O solo de pastagem também emite N₂O (LUIZÃO *et al.*, 1997).

vi. Remoção das fontes e sumidouros da paisagem pré-desmatamento

(a) Sumidouro no solo para CH₄

O solo florestal tropical fornece um sumidouro natural para metano, removendo 0,0004 t ha⁻¹ por ano de C (KELLER *et al.*, 1986). Derrubar a floresta elimina este sumidouro, remetendo a um efeito igual ao da criação de uma fonte do mesmo valor. Em 1990 as florestas que haviam sido desmatadas em Roraima somaram 0,16 × 10³ t de gás CH₄ (Tabelas 3 e 4).

(b) Fonte florestal de NOx e NMHC

As folhas da floresta liberam 0,0131 t ha⁻¹ por ano de NOx (KAPLAN *et al.*, 1988; KELLER *et al.*, 1991) e 0,12 t ha⁻¹ por ano de NMHC (RASMUSSEN; KHALIL, 1988). Nenhuma informação está disponível sobre as liberações destes gases da vegetação de substituição. Supondo que não há nenhuma liberação da agricultura e de pastagens produtivas e degradadas, e que as liberações de florestas secundárias foram iguais àquelas das florestas primárias, a paisagem em 1990 em Roraima implicou em

um fluxo negativo de 22,3 × 10³ t de NOx e um fluxo positivo de 4,6-12,4 × 10³ t de NMHC (Tabelas 3 e 4). A expansão em 138% da área total desmatada desde então (Tabela 1) implica em emissões de 10,9-29,5 × 10³ t de NMHC e fluxo negativo de 53,1 × 10³ t de NOx em 2012.

(c) Liberação de CH₄ por cupins

Cupins na floresta madura liberam metano produzido por bactérias que digerem celulose sob condições anaeróbicas nos abdomens destes insetos. Estas emissões serão perdidas quando a floresta for desmatada. No entanto, durante um longo tempo após o desmatamento, estas emissões estarão mais do que compensadas pelos cupins que ingerem a biomassa que não queimou com o desmatamento. No cálculo de emissões por cupins na floresta, o item de interesse é a quantidade de biomassa absoluta que decompõe anualmente (em t ha⁻¹ por ano), em vez da taxa (fração) de decomposição por ano.

Para litter fino (serapilheira), o montante pode ser conhecido diretamente dos dados sobre taxas de queda de litter, já que pode ser presumido que tudo que cai decompõe e que o nível do estoque esteja em equilíbrio. Para o litter grosso tais dados não são disponíveis, e a quantidade que decompõe deve ser calculada a partir de informações sobre o estoque e a taxa de decomposição. Árvores mortas em uma floresta tropical podem decompor muito rapidamente. A constante de decomposição (k) para a decomposição de troncos no Panamá foi calculada em 0,461 ano⁻¹ para árvores com DAP > 10 cm, baseados em observações após um intervalo de 10 anos (LANG; KNIGHT, 1979). Contudo, no atual estudo, as taxas mais baixas de decomposição medidas em roças de corte-e-queima são utilizadas para toda a biomassa grossa (Tabela 5). Os montantes de litter fino (8,30 t ha⁻¹) e grosso (16,40 t ha⁻¹ = 12,38 t ha⁻¹ de madeira caída + 4,02 t ha⁻¹ de madeira em pé) são calculados a partir de diferentes estudos disponíveis para toda a Pan-Amazônia até meados da década de 1990 (FEARNSIDE, 2010).

Exploração madeireira

O efeito da exploração madeireira não é tão simples como pode parecer. Mediante a remoção dos troncos das árvores grandes, a eficiência da queimada aumenta, assim como a taxa de decomposição média da biomassa não queimada. Isto é porque os galhos de diâmetro pequeno queimam melhor e decompõem mais rapidamente que grandes troncos.

Os valores para a biomassa da floresta não explorada para madeira (Tabela 2) representam as melhores avaliações para cada tipo florestal ao tempo em que foi levantado pelo Projeto RADAMBRASIL (início dos anos 1970). Há razões para crer que as equipes de avaliação evitaram locais já pesadamente explorados para madeira (SOMBROEK, 1992). Além disso, danos de exploração madeireira eram muito menos amplos ao tempo dos levantamentos do que são no presente.

A redução de biomassa devido à exploração madeireira adjacente às áreas derrubadas é muito mais alta que a redução da biomassa média sobre a floresta como um todo, já que as áreas derrubadas em Roraima, geralmente, possuem acesso por estrada. Novas liberações de gases, similares àquelas que ocorreriam através da derrubada, são decorrentes da redução da biomassa florestal devido à exploração madeireira: (i) decomposição dos resíduos e de um número substancial de árvores não comerciais que são mortas ou são danificadas durante o processo de extração, e (ii) decomposição e/ou queima das sobras geradas no processo de serragem, somados a uma decomposição mais lenta dos produtos feitos da madeira colhida (FEARNSIDE, 1995a). Com ajustes para exploração madeireira, as áreas desmatadas em 1990 em Roraima tiveram uma biomassa total média de 390 t ha^{-1} , dos quais 269 t ha^{-1} eram biomassa viva acima do solo, 28 t ha^{-1} de biomassa morta acima do solo e 92 t ha^{-1} de biomassa subterrânea (raízes).

Em Roraima, dados oficiais indicam uma intensidade atipicamente baixa de exploração madeireira em relação à área desmatada anualmente. Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 1989 foram explorados 56.003 m^3 de madeira em tora em Roraima. Considerando a taxa anual de desmatamento de 16.100 ha^{-1} para 1989-1990, a intensidade de exploração teria sido apenas $3,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, presumindo que toda a madeira explorada fosse oriunda das áreas que estavam sendo desmatadas naquele ano. Para fins do cálculo atual, utilizou-se essa presunção. Portanto, a intensidade nas áreas de floresta não desmatadas foi considerada zero. Sendo que parte da exploração madeireira, provavelmente, foi feita nestas florestas remanescentes, as emissões calculadas, tanto para desmatamento quanto para exploração madeireira, são subestimadas.

Interpretação das emissões históricas

O balanço anual não deveria ser confundido com a mudança no balanço anual. Muitos componentes do balanço, tais como os fluxos de solos, cupins e vegetação florestal nativa que são perdidos quando a conversão ocorre, não mudarão muito com a passagem do tempo. A questão de quanto as emissões históricas pesarão nas negociações internacionais é ainda aberta.

A área considerada para calcular a perda de fontes e sumidouros em florestas intactas é presumida, aqui, como sendo todo o montante de 380.200 ha desmatados até 1990, independentemente de quanto tempo se passou desde que a floresta original foi desmatada. Quase todo o desmatamento em Roraima foi feito nos séculos XX e XXI.

O tratamento das emissões históricas é importante para estabelecer a maneira como a responsabilidade pelo aquecimento global é compartilhada entre os países. Entretanto, esta informação não é necessária para o balanço anual (e os seus componentes separados) ser útil na compreensão dos balanços biogeoquímicos globais dos gases envolvidos ou mesmo na magnitude das mudanças do balanço anual durante os próximos anos. Isto também se aplica à utilidade dos dados para avaliar a eficácia em potencial das diferentes opções de combate ao efeito estufa na alteração do balanço anual dos gases.

Retirada do carbono pela vegetação substituta

i. Paisagem de substituição

Uma matriz de Markov de probabilidades de transição anual foi construída para calcular a composição da paisagem em 1990 e projetar as mudanças futuras, presumindo que o comportamento dos agricultores e fazendeiros permanece inalterado. As probabilidades de transição para pequenos agricultores são derivadas de estudos por satélites das áreas de assentamento do governo (MORAN *et al.*, 1994; SKOLE *et al.*, 1994). As probabilidades dos fazendeiros são derivadas do comportamento típico indicado em levantamentos feito em entrevistas por Uhl *et al.* (1988a). Seis usos da terra são considerados, os quais, quando divididos para refletir a estrutura etária, resultam em uma matriz de 98 fileiras e colunas. A paisagem calculada para 1990 para a Amazônia Legal como um todo foi 5,4% para agricultura, 44,8% de pastagem produtiva, 2,2% de pasto degradado, 2,1% de floresta secundária “jovem” (1970 ou depois) derivada da agricultura, 28,1% de floresta secundária “jovem” derivada de pastagem, e 17,4% de floresta secundária “antiga” (pré-1970). Em anos mais recentes, houve uma diminuição da presença de florestas secundárias, com essas

formações totalizando aproximadamente 22% da paisagem desmatada até 2006 (ALMEIDA *et al.*, 2010).

Já que Roraima não possui áreas significativas de florestas secundárias “antigas” (pré-1970), a adoção para Roraima das demais probabilidades derivadas para a Amazônia Legal levaria os seguintes percentuais de uso da terra nos 380.200 ha desmatados no Estado até 1990: 6,6% de agricultura, 54,3% de pastagens produtivas, 2,7% de pastagens degradadas, 2,5% de floresta secundária “jovem” derivada de agricultura e 34,0% de floresta secundária “jovem” derivada de pastagem.

A paisagem de equilíbrio eventualmente se aproximaria de um total de 4,0% de agricultura, 43,8% de pasto produtivo, 5,2% de pasto degradado, 2,0% de floresta secundária derivada da agricultura e 44,9% de floresta secundária derivada de pastagem. Um montante insignificante é de “floresta” regenerada (definido como floresta secundária com mais de 100 anos). A biomassa total média (peso seco, incluindo componentes subterrâneos e mortos) foi de 43,5 t ha⁻¹ em 1990 nos 410 × 10³ km² na Amazônia Legal, desmatada nesse ano para usos que não fossem hidrelétricas. Isto representa uma sobre-estimativa para Roraima devido à inexistência de florestas secundárias “antigas”. Em condições de equilíbrio, a biomassa média seria 28,5 t ha⁻¹ para todas as áreas desmatadas (excluindo hidrelétricas) - e as florestas secundárias “antigas” teriam deixado de existir (FEARNSIDE, 1996b).

ii. Taxas de crescimento de florestais secundárias

A taxa de crescimento de florestas secundárias é crítica na determinação da absorção ou retirada de carbono da paisagem de substituição. A maioria das discussões da absorção por florestas secundárias tem presumido que estas crescerão à taxas rápidas que caracterizam o pousio da agricultura migratória (LUGO; BROWN, 1982). Na Amazônia brasileira, no entanto, a maioria do desmatamento é para pastagens, com a agricultura migratória possuindo um papel relativamente insignificante (FEARNSIDE, 1993b; 1995b).

Brown e Lugo (1990) revisaram os dados disponíveis sobre crescimento das florestas secundárias tropicais. Praticamente toda informação disponível é de pousios da agricultura migratória. Esses autores traçaram um gráfico a mão-livre dos dados disponíveis para florestas secundárias cujas idades variam de 1 a 80 anos, incluindo biomassa para madeira (galhos, gravetos e troncos: 13 pontos), folhas (10 pontos) e raízes (12 pontos). Isto tem sido utilizado para estimar taxa de crescimento e razão de raiz/caule para pousios da agricultura migratória das diferentes idades. Florestas secundárias em pastagens abandonadas crescem mais lentamente (UHL *et al.*,

1988a). Estas informações sobre taxa de crescimento da vegetação secundária de origens diferentes têm sido usadas para calcular absorção de carbono na paisagem (FEARNSIDE; GUIMARÃES, 1996).

Emissões líquidas anuais

Considerando apenas CO₂, 14,4 × 10⁶ t de gas foram emitidos (emissão bruta) pelo desmatamento (não incluindo emissões da exploração madeireira) em 1990. Excluindo a absorção de 874 × 10³ t de CO₂, é estimada emissão líquida de 13,5 × 10⁶ t de CO₂ ou 3,7 × 10⁶ t de C. Acrescentando os efeitos dos gases-traço, utilizando os potenciais de aquecimento global (GWPs) do IPCC de 1995 para um horizonte de tempo de 100 anos (SCHIMEL *et al.*, 1996), adotados pelo Protocolo de Kyoto para uso até o final do seu primeiro período de compromisso em 2012, os impactos aumentam em 6-10% para 3,9-4,0 × 10⁶ t de C equivalente ao carbono do CO₂. A exploração madeireira acrescentou 0,008 × 10⁶ t de C em forma de CO₂, mais os gases-traço que elevaram o impacto para 0,009-0,010 × 10⁶ t de C equivalente ao C do CO₂.

Emissão de gases por incêndios florestais

Fogos florestais se tornaram forte realidade para toda a sociedade de Roraima principalmente a partir do “Grande Incêndio” estabelecido no biênio 1997/1998 (BARBOSA; FEARNSIDE, 1999; XAUD *et al.*, 2013). Este episódio atingiu cerca de 12.000 km² de florestas primárias em função da associação do “El Niño”, evento climático que em Roraima gera seca acentuada e prolongada, com centenas de queimadas que se transformaram em várias frentes de incêndios por todo Estado (SHIMABUKURO *et al.*, 2000). A área impactada representou aproximadamente 7% de todos os sistemas florestais primários de Roraima, ou cerca do dobro de toda área desmatada até aquele ano (aproximadamente 6.000 km²). Em 1998, a junção das principais frentes de fogo somava cerca de 400 km lineares, sendo estabelecida, principalmente, por toda porção centro-oeste de Roraima, entre os cursos médios dos rios Mucajaí e Uraricoera, no limite com a Terra Indígena Yanomami. A queima do material orgânico florestal provocou emissão de milhões de toneladas de C para a atmosfera.

Este grande desastre ecológico ocorrido nas florestas de Roraima gerou oportunidade de criação do Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal em 1999 (Decreto Federal nº 2959, 10.02.1999). Em Roraima esta estratégia se mantém através da criação do Comitê de Prevenção e Controle das Queimadas e Incêndios Florestais (CPCQIF-RR), criado pelo Decreto Estadual Nº 3321-E de 11 de dezembro de 1998 e alterado pelo Decreto 5198-E de 20 de março de 2003. O Comitê

articula diferentes atores da sociedade civil organizada no sentido de gerar informações sobre variáveis climáticas, movimentos migratórios, desmatamentos e queimadas que se avolumam nos sistemas florestais no pico da estação seca regional (dezembro-março). A estratégia de monitoração em Roraima foi montada sob as seguintes bases: (a) localização e quantificação dos focos de calor derivados do satélite NOAA-AVHRR (www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas), (b) vistorias de campo e (c) uso do sistema de alerta do IBAMA que é emitido diariamente para diferentes tipos de vegetação em todo o Brasil (ênfase aos sistemas florestais e unidades de conservação).

Focos de calor como ferramenta ao monitoramento

O registro de focos de calor não indica necessariamente a existência de fogo por queima ou incêndio. Entretanto, a quantidade e a concentração espacial dos focos dão uma estimativa razoável dos períodos e das regiões onde devem ser orientadas as ações estratégicas de prevenção e combate a incêndios. Em Roraima, a média de detecção de focos de calor para o período de 1999 a 2010 foi de 1.444 focos por ano, sendo 1.096 (76%) em sistemas florestais e 347 (24%) em não florestais (Figura 1). A distribuição temporal dos focos de calor é concentrada entre os meses de dezembro e março, associado ao período seco regional. Quando o período seco regional é potencializado pelo evento climático

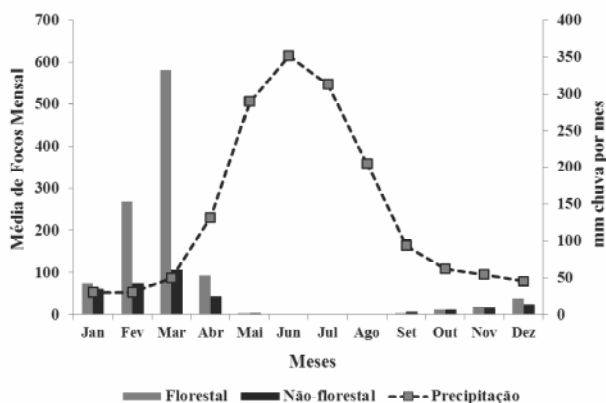


Figura 1 - Padrão de distribuição dos focos de calor, por mês e macrossistema (florestal e não florestal), no estado de Roraima para o período de janeiro-1999 a dezembro-2010 (Fonte: www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas). Como indicador da estacionalidade das chuvas em Roraima, também são apresentadas as médias mensais de precipitação correspondente ao período de janeiro-1910 a junho-2009 para a cidade de Boa Vista (Fonte: INMET-Manaus e SRPV-Boa Vista).

“El Niño” as chances das queimadas praticadas pelos agricultores se tornarem incêndios florestais aumentam consideravelmente.

As fitofisionomias com maior número de focos foram as Florestas de Contato (savana-floresta) do norte e centro-oeste de Roraima (574 focos por ano; 39,8%) e as Florestas Ombrófilas Densas do sul (486 focos por ano; 33,6%). Estes sistemas florestais possuem as maiores redes de vicinais e estradas de colonização espalhadas pelo Estado. As condições geográficas e ambientais ao longo destes eixos de deslocamento são um dos principais fatores responsáveis pelos incêndios em Roraima. Além disto, áreas mais populosas e impactadas pela ação antrópica possuem maior probabilidade de incêndio. Não coincidentemente, estas áreas são mais atingidas pelo fogo fora de controle. A análise da distribuição espacial dos focos de calor também indica que Mucajaí é o município com o maior número de focos detectados em todo o período analisado (3.131 focos; 18,1%), coincidindo com a constatação de ser o município com a maior área não institucional desmatada de todo o Estado.

Sistema de monitoramento e padrões climáticos

O conhecimento dos padrões climáticos é importante para qualquer sistema de controle e monitoramento, pois propiciam informações valiosas sob as condições ambientais de alastramento dos incêndios florestais. Desta forma, o Comitê local adotou como regra básica alguns parâmetros que vinham sendo mensurados desde janeiro de 1999. Por exemplo, altas temperaturas (maior que 35°C) e baixa umidade relativa do ar (menor que 50%) por longos períodos são considerados como parâmetros de alerta máximo. O prolongamento e a constância destas condições provocam déficit hídrico no sistema florestal, induzindo maior perda de folhas, gravetos e galhos de pequeno porte pela vegetação, como forma de defesa fisiológica. Este produto do ecossistema é considerado como “material combustível fino” que é depositado no chão da floresta e adquire condição inflamável muito rapidamente devido à baixa capacidade de conservação de água em seus tecidos (KAUFFMAN *et al.*, 1988). Quando a umidade do material combustível fino atinge níveis muito baixos, geralmente associado a baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas, gera-se condição favorável à ignição e propagação do fogo de superfície no ecossistema florestal (UHL *et al.*, 1988b; NEPSTAD *et al.*, 2004). É o que podemos chamar de triângulo do fogo, contendo os seguintes vértices: (i) oxigênio contido na atmosfera, (ii) material combustível (litter fino altamente inflamável devido ao ambiente seco e quente) e (iii) fonte de ignição, geralmente associado às queimadas

por parte dos agricultores. Este fogo superficial varre o solo da floresta e possibilita que o material combustível de maior volume, como troncos e galhos mortos, entrem em combustão e ampliem a ação do fogo em setores mais abertos do sistema.

O acompanhamento da dinâmica da umidade do material combustível depositado nos diferentes ambientes de floresta de Roraima, entre janeiro de 1999 e abril de 2003, indicou três distintas categorias de umidade do material combustível observadas no pico da época seca (janeiro-março): (1) maior que 12% - áreas de floresta primária com estrutura original (sem fogo recente); (2) entre 8 e 12% - áreas atingidas pelo fogo pelo menos uma vez a partir de 1998 e próximas das áreas de corte seletivo, serras ou expostas à maior incidência de raios solares devido a clareiras e (3) menor que 8% - frente de fogo (poucos metros da crista do incêndio), independente da condição estrutural da floresta. A maioria destes dados foi registrada com intervalos de 15 a 30 dias e no horário de pico das queimadas (11 e 15 h). A umidade relativa do ar nestas condições em anos de “El Niño” como 1998 e 2003 variou de 35 a 45% dentro da floresta primária (sub-bosque). A temperatura neste mesmo cenário se manteve na média de 34 a 39 °C no interior da floresta. Por comparação, estes valores representam uma significativa alteração nos padrões médios históricos verificados entre janeiro e março, por exemplo, na Estação Meteorológica de Boa Vista (INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, Roraima): 66 a 70% (umidade do ar) e 32 a 33 °C (média das temperaturas máximas). Mesmo sendo uma área urbana situada em um sistema de savana, os valores registrados no interior da floresta se estabeleceram muito abaixo daqueles observados em Boa Vista. Mesmo distintos por características ambientais, estes números representam uma crise hídrica nos sistemas naturais florestais e indicam forte cautela dentro do período das queimadas agrícolas em Roraima.

Emissões por incêndios florestais (1998 e 2003)

i. Grande incêndio de 1998

Os incêndios ocorridos em Roraima, entre o final de 1997 e o início de 1998, atingiram uma área total entre 38.144 e 40.678 km², resultado da ação humana sobre diferentes sistemas ecológicos conjugada com uma estiagem muito forte. Tomando como base a cidade de Boa Vista, capital de Roraima, de setembro de 1997 a março de 1998 choveram apenas 30,6 mm ou 8,7% da média histórica para o período (352 mm). A maior parte da área atingida por incêndios estava relacionada às formações não florestais, como savanas e campinas (23.970 km²), e sistemas antrópicos, como pastagens e cultivos agrícolas (2.780

km²). Entretanto, o que mais surpreendeu foi o tamanho da área de floresta primária atingida; entre 11.394 e 13.928 km² ou aproximadamente o dobro do total desmatado em todo o estado de Roraima até 1998 (aproximadamente 6.000 km²). O intervalo de incerteza em relação à área de florestas efetivamente impactada deve-se as deficiências nas estimativas sobre o fogo rasteiro que avança sem muita intensidade no solo e possui efeitos pouco aparentes nas copas das árvores. Sem os efeitos aparentes nas imagens de satélite ou mesmo nos sobrevoos, Barbosa e Fearnside (1999) realizaram o cálculo de um intervalo de confiança através de observações de campo.

Para tentar identificar os impactos do fogo sobre os sistemas florestais primários, foram realizados estudos de campo em três áreas amostrais dentro de regiões de colonização atingidas pelos incêndios: Apiaú-Ribeiro Campos, Tepequém-Trairão e Paredão. Avaliou-se o número médio de árvores mortas (2.219 ha⁻¹) e o volume médio de biomassa acima do solo (sem as raízes) que estas árvores representavam (23,3 t ha⁻¹). A maioria das árvores mortas (2.173 ha⁻¹) possuía diâmetro à altura do peito (DAP) menor que 10 cm (jovens e regenerantes) e gerou uma estimativa de 5,85 t ha⁻¹ de biomassa. O restante das árvores mortas (46 ha⁻¹) possuía DAP maior ou igual a 10 cm e resultou em uma biomassa vegetal de 17,45 t ha⁻¹.

Embora avaliações dessa magnitude apresentem grande margem de erro, é possível que no caso dos incêndios de 1998 os valores para biomassa estejam subestimados, pois a amostragem foi realizada apenas em três regiões de colonização (início do fogo), desconsiderando as áreas de fogo contínuo em linha (final do fogo). Por outro lado, os valores de biomassa em áreas atingidas repetidamente por fogos em Roraima podem apresentar forte decréscimo por unidade de área em função da alta frequência dos incêndios (MARTINS *et al.*, 2012; XAUD *et al.*, 2013). Esta observação está diretamente relacionada aos parâmetros de entrada nos modelos dinâmicos, quando é necessário o estabelecimento de valores de biomassa relacionados ao histórico de fogo das grandes regiões atingidas por fogos florestais.

As estimativas obtidas apontam que a passagem do fogo nos sistemas florestais atingiu $31,48 \times 10^6$ t C ($4,0$ a $4,7 \times 10^6$ t C-CO₂)⁵ na forma de biomassa vegetal acima do solo. Esse valor é 8,8% maior ao calculado para todas as fontes e reservatórios registrados para Roraima no ano base de 1990 (ver item **Emissões por Desmatamento**). Do total emitido na forma de carbono, $12,64 \times 10^6$ t C (40,2%) foram atribuídos às emissões imediatas de gases poluentes para a atmosfera, incluindo basicamente a eliminação de

⁵C-CO₂ = Carbono equivalente ao CO₂, levando em consideração o potencial de aquecimento global (GWP) de todos os gases emitidos em um horizonte de tempo de 100 anos, definidos por cenários de alto e baixo gases-traço.

resíduos sobre o solo (folhas e troncos caídos), árvores jovens e plantas de pequeno porte do sub-bosque. A maior parte do carbono foi emitido na forma de CO_2 (68,1 a 78,1%), embora seja assumido que uma parte deste gás retornou no período seguinte de crescimento, sendo novamente fotossintetizado pela vegetação substituta. O segundo maior volume de carbono foi aquele emitido na forma de CH_4 (19,8 a 28,8%), sendo o restante atribuído ao óxido nitroso (2,1 a 3,1%).

Embora a quantidade de gases emitidos seja importante em termos das emissões verificadas pelo balanço anual, é importante frisar que a quantidade de C estocado na forma de biomassa morta pelos incêndios de 1998 ($18,66 \times 10^6$ t C ou 59,3%) possui um potencial de emissão de médio prazo muito grande. Esse C é contabilizado como emissão futura porque a decomposição dessa biomassa por microrganismos libera gases até a sua total eliminação do sistema, podendo durar décadas. Por fim, do total de carbono atingido em 1998 dentro de sistemas florestais em Roraima, uma pequena parte se transformou em carvão ($0,18 \times 10^6$ t C ou 0,6%), que é considerado como estoque de carbono de longo prazo (mais de 1.000 anos para se degradar). Da mesma forma como procedido no item **Emissões por Desmatamento** (carvão e carbono grafitico), este carbono é considerado como um sumidouro nos cálculos gerais do balanço anual ou mesmo das emissões líquidas comprometidas.

ii. Incêndio de 2003

O relativo controle do sistema de monitoramento foi quebrado ao início de 2003 com o retorno de mais um forte período de “El Niño” associado ao avanço das frentes de expansão fundiária para áreas remotas de florestas primárias de Roraima (BARBOSA *et al.*, 2003; 2004). Ainda em meados de 2002, tanto o INPE (<http://www.cptec.inpe.br/enos>) quanto o INMET (http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=central_servicos) emitiram comunicados de que o biênio 2002/2003 seria um período de forte “El Niño” e, que uma das consequências previsíveis seria uma fase de estiagem acentuada no extremo norte do país.

Entre janeiro e fevereiro de 2003 a seca se agravou em Roraima, fazendo com que a umidade relativa do ar estabelecesse valores diários menores que 50% e, a temperatura média maior que 35 °C nas áreas de floresta de contato, segundo dados de campo obtidos pela equipe técnica do Comitê de Prevenção e Controle das Queimadas e Incêndios Florestais de Roraima entre 11 e 15 h. Na primeira semana de fevereiro o fogo despontava em várias serras de solo pedregoso e com alta concentração de material combustível seco como, por exemplo, todo o complexo da Serra de Mucajaí. No começo de março havia

três linhas de fogo estabelecidas no oeste e centro-oeste de Roraima, sendo a maior situada ao longo das colônias do Apiaú, Campos Novos e Roxinho, localidades fortemente atingidas pelo fogo em 1998. Baseado na velocidade de propagação do fogo de superfície medida nos sistemas florestais de contato de Roraima ($0,95 \pm 0,46$ km dia⁻¹), e na extensão das linhas de fogo, foi estimado que 85 ± 42 km² de floresta primária estavam sendo afetados diariamente pelo fogo naquele período.

Neste ano, as principais áreas atingidas estavam entre as regiões do médio rio Mucajaí e da Serra do Repartimento. As florestas desta região já haviam sido afetadas pelos incêndios de 1998, sendo reimpactadas em 2003, abalando ainda mais a estrutura destes ecossistemas locais e aumentando a suscetibilidade para futuros incêndios de maior intensidade (BARBOSA *et al.*, 2003). A probabilidade de recorrência de incêndio em sistemas florestais já impactados pelo fogo é alta, podendo alcançar 70% (COCHRANE; SCHULZE, 1999). Mesmo com grandes incertezas devido ao impacto gerado em várias localidades e a falta de imagens de satélite com bom recobrimento das áreas impactadas, foi possível estimar que entre 25 e 30% da área de florestas incendiadas em 1998 foi reimpactada em 2003 em todo o Estado de Roraima. Baseado nos dados de emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera, trabalhados em 1998 apenas para floresta primária intacta (BARBOSA; FEARNESIDE, 1999), estimou-se que 7,7 a 8,2 t ha⁻¹ de C ($0,98$ a $1,23$ t ha⁻¹ C-CO₂) foram liberados para a atmosfera por hectare em 2003.

Conclusões e considerações finais

As indicações para um desenvolvimento sustentável em Roraima não apontam para um futuro ambientalmente estável, a não ser que hajam mudanças significativas nas políticas públicas ligadas às mudanças do uso da terra e às forças subjacentes a essas mudanças. Os dados de emissões de GEE apresentados (na forma de fontes e sumidouros de carbono) indicam um impacto ambiental grande, sobretudo considerando a população relativamente pequena de Roraima (218.000 habitantes em 1990 e mais de 495.000 em 2012). Vários planos do Governo Federal implicam em maiores pressões sobre o ambiente em Roraima no futuro. Um deles é a proposta de re-abertura da rodovia BR-319 (Manaus-Porto Velho), que se encontra abandonada desde 1988. A re-abertura da BR-319, planejada no Plano de Aceleração de Crescimento-2 (PAC-2), ligaria Manaus (e Roraima, através da BR-174) ao “arco do desmatamento”, facilitando a migração para Roraima dos atores e dos processos de desmatamento presentes atualmente em Rondônia e Mato Grosso

(FEARNSIDE; GRAÇA, 2009). Isto levaria a um aumento rápido e crescente do desmatamento no sul de Roraima, mediante a expansão da rede de estradas de acesso a partir das áreas de assentamento já existentes (BARNI *et al.*, 2012). Criação de novas áreas protegidas no sul de Roraima seria uma medida importante para minimizar o impacto da BR-319, caso esse projeto venha a ser concretizado (BARNI *et al.*, 2012).

Outro projeto com consequências ambientais deletérias em Roraima é a pavimentação da estrada até Georgetown, Guiana. O objetivo é o de facilitar a exportação de soja e de carne bovina de Roraima para o mercado exterior. A expansão da produção dessas *commodities* possui impactos ambientais conhecidos em outras partes da região amazônica (FEARNSIDE, 2001; MCALPINE *et al.*, 2009). O aumento das taxas de desmatamento implicaria, por exemplo, no aumento da probabilidade de novos incêndios florestais.

Um desafio à sustentabilidade ambiental em Roraima é a incidência de secas extremas provocadas pelo fenômeno El Niño. O último relatório do IPCC concluiu que os modelos climáticos hoje concordam que, com mais aquecimento global, haverá “... *mais condições tipo El Niño*” (MEEHL *et al.*, 2007b). Isto se refere à formação da mancha de água quente na superfície do Oceano Pacífico que está associada a secas em Roraima, como em 1997-98, 2003, 2007 e 2009-2010. Os incêndios ocorrem não apenas devido à seca, mas pela combinação dessas condições com a presença de alguma faísca de fogo como fator desencadeador do incêndio. O espalhamento constante de assentamentos e fazendas em Roraima se traduz em um aumento contínuo da presença de fogo. Além disso, o histórico de incêndios recentes deixa cada vez mais madeira morta dentro das florestas, aumentando a sua flamabilidade. A combinação dessas condições com eventos El Niño mais frequentes e mais fortes nas próximas décadas (COX *et al.*, 2004; FEARNSIDE, 2009b) coloca as florestas de Roraima em situação de alto risco.

Agradecimentos

As pesquisas dos autores que resultaram nesta revisão foram financiadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do INCT-Servamb (573810/2008-7) e CT-Amazônia (575853/2008-5). CAPES forneceu bolsa de mestrado para VBP e o CNPq bolsas de produtividade para PMF e RIB. Agradecemos os comentários anônimos dos referees.

Literatura científica citada

- ALMEIDA, C. A.; VALERIANO, D. M.; ESCADA, M. I. S.; RENNÓ, C. D. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal brasileira. **Acta Amazonica**, v.40, n.2, p. 289-302, 2010.
- BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Pasture burning in Amazonia: Dynamics of residual biomass and the storage and release of aboveground carbon. **Journal of Geophysical Research (Atmospheres)**, v.101, n.D20, p.25.847-25.857, 1996a.
- BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Carbon and nutrient flows in an Amazonian forest: Fine litter production and composition Colônia do Apiaú, Roraima. **Tropical Ecology**, v.37, n.1, p.115-125. 1996b.
- BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Incêndios na Amazônia brasileira: estimativa da emissão de gases do efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Roraima na passagem do Evento El Niño (1997/98). **Acta Amazonica**, v.29, n.4, p.513-534, 1999.
- BARBOSA, R. I.; KEIZER, E.; PINTO, F. Ecossistemas terrestres de Roraima: área e modelagem espacial da biomassa. In: BARBOSA, R. I.; MELO, V. F. (orgs.). **Roraima: Homem, Ambiente e Ecologia**. Boa Vista (Roraima): FEMACT-RR. 2010, p.347-368.
- BARBOSA, R. I.; XAUD, M. R.; SILVA, G. F. N.; CATTÂNEO, A. C. Forest Fires in Roraima, Brazilian Amazonia. **International Forest Fire News**, v. 28, n. jan-jul, p. 51-56, 2003.
- BARBOSA, R. I.; XAUD, M. R.; SILVA, G. F. N.; CATTÂNEO, A. C. Cinzas na Amazônia: incêndios florestais reencontram Roraima. **Ciência Hoje**, v.35, n.207, p.22-27, 2004.
- BARNI, P. E.; FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A. Desmatamento no sul do Estado de Roraima: padrões de distribuição em função de Projetos de Assentamento do INCRA e da distância das principais rodovias (BR-174 e BR-210). **Acta Amazonica**, v.42, n.2, p.195-204, 2012.
- BOND, T. C.; DOHERTY, S. J.; FAHEY, D. W.; FORSTER, P. M.; BERNTSEN, T.; DEANGELO, B. J.; FLANNER, M. G.; GHA, S.; KÄRCHER, B.; KOCH, D.; KINNE, S.; KONDO, Y.; QUINN, P. K.; SAROFIM, M. C.; SCHULTZ, M. G.; SCHULZ, M.; VENKATARAMAN, C.; ZHANG, H.; ZHANG, S.; BELLOUIN, N.; GUTTIKUNDA, S. K.; HOPKE, P. K.; JACOBSON, M. Z.; KAISER, J. W.; KLIMONT, Z.; LOHMANN, U.; SCHWARZ, J. P.; SHINDELL, D.; STORELVMO, T.; WARREN, S. G.; ZENDER, C. S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, **Journal of Geophysical Research (Atmospheres)**, 2013. doi: 10.1002/jgrd.50171.
- BRANDÃO, F. S.; CEOLIN, A. C.; RUVIARO, C. F.; GIANEZINI, M.; DIAS, E. A. O papel do agronegócio brasileiro na redução de emissão de gases de efeito estufa (GEES). **Revista Agro@mbiente On-line**, v.6, n.1, p.84-90, 2012.

- BRASIL. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima** (2 volumes). Brasília: Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima, Ministério da Ciência e Tecnologia. 2010.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Tropical secondary forests. **Journal of Tropical Ecology**, v.6, p.1-32, 1990.
- BUSCHBACHER, R. J. Changes in productivity and nutrient cycling following conversion of Amazon Rainforest to pasture. 1984. Tese (Doutorado em Ecologia). University of Georgia, Athens (Georgia/EUA).
- COCHRANE, M. A; SCHULZE, M. D. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition. **Biotropica**, v.3, n.1, p.2-16, 1999.
- COX, P. M.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, v.78, p.137-156, 2004.
- EASTERLING, W.; AGGARWAL, P. K.; BATIMA, P.; BRANDER, K. M.; ERDA, L.; HOWDEN, S.M.; KIRILENKO, A.; MORTON, J.; SOUSSANA, J.-F.; SCHMIDHUBER, J.; TUBIELLO, F. N. Food, fibre and forest products. In: **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. (Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)**, PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F. , PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E., (eds.), . Cambridge (U.K.): Cambridge University Press. p. 273-313.
- FEARNSIDE, P. M. The effects of cattle pastures on soil fertility in the Brazilian Amazon: Consequences for beef production sustainability. **Tropical Ecology**, v.21, n.1, p.125-137, 1980.
- FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon. In: **Carbon Emissions and Sequestration in Forests: Case Studies from Developing Countries** (Volume 2). Washington, DC: Climate Change Division, Environmental Protection Agency & Berkeley (California)/Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), University of California (UC), 1992. 73 p.
- FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: Quem tem razão: o INPE ou a NASA? **Ciência Hoje**, v. 16, n. 96, p. 6-8, 1993a.
- FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: The effect of population and land tenure. **Ambio**, v.22, n.8, p.537-545, 1993b.
- FEARNSIDE, P. M. Global warming response options in Brazil's forest sector: Comparison of project-level costs and benefits. **Biomass and Bioenergy**, v.8, n.5, p.309-322, 1995a.
- FEARNSIDE, P. M. Quem desmata a Amazônia: Os pobres ou os ricos? **Ciência Hoje**, v.19, n.113, p.26-33, 1995b.
- FEARNSIDE, P. M. Amazonia and global warming: Annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region. In: LEVINE, J. (ed.). **Biomass Burning and Global Change: Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait**. Cambridge (Massachusetts): MIT Press. 1996a, p. 606-617.
- FEARNSIDE, P. M. Amazonian deforestation and global warming: Carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v.80, n.1-3, p.21-34, 1996b.
- FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: Net committed emissions. **Climatic Change**, v.35, n.3, p.321-360, 1997a.
- FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.90, n.1, p.59-89, 1997b.
- FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v.28, n.1, p.23-38. 2001.
- FEARNSIDE, P. M. **A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais, 2ª ed.**, Manaus, (Amazonas), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 2009a. 134 p.
- FEARNSIDE, P. M. A vulnerabilidade da floresta amazônica perante as mudanças climáticas. **Oecologia Australis**, v.13, n.4, p.609-618, 2009b.
- FEARNSIDE, P. M. Roraima e o aquecimento global: estimativa atualizada do balanço anual de gases do efeito estufa provenientes da mudança de uso da terra. In: BARBOSA, R. I.; MELO, V. F. (orgs.). **Roraima: Homem, Ambiente e Ecologia**. Boa Vista (Roraima): FEMACT-RR. 2010, p.369-389.
- FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Political benefits as barriers to assessment of environmental costs in Brazil's Amazonian development planning: The example of the Jatapu Dam in Roraima. **Environmental Management**, v.20, n.5, p.615-630, 1996.
- FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.108, n.1-2, p.147-166. 1998.
- FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I.; GRAÇA, P. M. L. A. Burning of secondary forest in Amazonia: biomass, burning efficiency and charcoal formation during land preparation for agriculture in Apiaú, Roraima, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.242, n.2-3, p.678-687, 2007.
- FEARNSIDE, P. M.; FERRAZ, J. A conservation gap analysis of Brazil's Amazonian vegetation. **Conservation Biology**, v.9, n.5, p.1134-1147, 1995.
- FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A. BR-319: A rodovia Manaus-Porto Velho e o impacto potencial de conectar o arco de desmatamento à Amazônia central. **Novos Cadernos NAEA**, v.12, n.1, p.19-50, 2009.

- FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; LEAL FILHO, N.; RODRIGUES, F. J. A.; ROBINSON, J. M. Tropical forest burning in Brazilian Amazonia: Measurements of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Pará. **Forest Ecology and Management**, v.123, n.1, p.65-79, 1999.
- FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; RODRIGUES, F. J. A. Burning of Amazonian rainforests: Burning efficiency and charcoal formation in forest cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.146, n.1-3, p.115-128, 2001.
- FEARNSIDE, P. M.; GUIMARÃES, W. M. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.80, n.1-3, p.35-46, 1996.
- FEARNSIDE, P. M.; LAURANCE, W. F. Tropical deforestation and greenhouse gas emissions. **Ecological Applications**, v.14, n.4, p.982-986, 2004.
- FEARNSIDE, P. M.; LEAL FILHO, N.; FERNANDES, P. M. Rainforest burning and the global carbon budget: Biomass, combustion efficiency and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v.98, n.D9, p.16.733-16.743, 1993.
- FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, v.258, p.1968-1978, 2009.
- FEARNSIDE, P. M.; TARDIN, A. T.; MEIRA FILHO, L. G. **Deforestation rate in Brazilian Amazonia**. São José dos Campos (São Paulo): Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 1990. 8 p.
- IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1992. 92 p.
- INPE. INPE divulga dados do sistema DETER. São José dos Campos (São Paulo), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 28 de Março de 2013. http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3248
- IPCC. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. In: EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (eds.). Kanagawa: National Greenhouse Gas Inventories Programme, Intergovernmental Panel on Climate Change and Institute for Global Environmental Strategies. 2006.
- KAPLAN, W. A.; WOFSY, S. C.; KELLER, M.; COSTA, J. M. Emission of NO and deposition of O₃ in a tropical forest system. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p. 1389-1395, 1988.
- KAUFFMAN, J. B.; UHL, C.; CUMMINGS, D. L. Fire in Venezuelan Amazon 1: Fuel biomass and fire chemistry in the evergreen rainforest of Venezuela. **Oikos**, v.53, p.167-175, 1988.
- KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E.; BABBITT, R. Fire in the Brazilian Amazon: Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forest. **Oecologia**, v.104, p.397-408, 1995.
- KELLER, M.; JACOB, D. J.; WOFSY, S. C.; HARRISS, R. C. Effects of tropical deforestation on global and regional atmospheric chemistry. **Climatic Change**, v.19, n.1-2, p.139-158, 1991.
- KELLER, M.; KAPLAN, W. A.; WOFSY, S. C. Emissions of N₂O, CH₄ and CO₂ from tropical forest soils. **Journal of Geophysical Research**, v.91, p.11.791-11.802, 1986.
- LANG, G. E.; KNIGHT, D. H. Decay rates of boles for tropical trees in Panama. **Biotropica**, v.11, n.4, p.316-317, 1979.
- LUGO, A. E.; BROWN, S. Conversion of tropical moist forests: a critique. **Interciencia**, v.7, n.2, p.89-93, 1982.
- LUIZÃO, F. J.; LUIZÃO, R. C. C. Matéria orgânica do solo em Roraima. In: BARBOSA, R. I.; FERREIRA, E. J.; CASTELLON, E. G. (eds.). **Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima**. Manaus (Amazonas): Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia (INPA). 1997, p.363-379.
- MARTINS, F. S. R. V.; XAUD, H. A. M.; DOS SANTOS, J. R.; GALVÃO, L.S. Effects of fire on aboveground forest biomass in the northern Brazilian Amazon. **Journal of Tropical Ecology**, v.28, n.6, p.591-601, 2012.
- MARTIUS, C.; FEARNSIDE, P. M.; BANDEIRA, A. G.; WASSMANN, R. Deforestation and methane release from termites in Amazonia. **Chemosphere**, v.33, n.3, p.517-536, 1996.
- MCALPINE, C. A.; ETTER, A.; FEARNSIDE, P. M.; SEABROOK, L.; LAURANCE, W. F. Increasing world consumption of beef as a driver of regional and global change: A call for policy action based on evidence from Queensland (Australia), Colombia and Brazil. **Global Environmental Change**, v.19, p.21-33, 2009.
- MEEHL, G. A.; COVEY, C.; TAYLOR, K. E.; DELWORTH, T.; STOUFFER, R. J.; LATIF, M.; MCAVANEY, B.; MITCHELL, J. F. B. THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.88, p.1383-1394, 2007a.
- MEEHL, G. A., STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITO, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, G.; WEAVER, J.; ZHAO, Z-C. Global climate projections. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis (Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)**. Cambridge (U.K.): Cambridge University Press. 2007b, p. 747-845.
- MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E.; MAUSEL, P.; WO, Y. Integrating Amazonian vegetation, land-use, and satellite data. **BioScience**, v.44, n.5, p.329-338, 1994.

- NEPSTAD, D. C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v.398, p.505-508, 1999.
- NEPSTAD, D.; LEFEBVRE, P.; SILVA, Jr., U. L.; TOMASELLA, J.; SCHLESINGER, P.; SOLORZANO, L.; MOUTINHO, P.; RAY, D. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. **Global Change Biology**, v.10, p.704-717, 2004.
- NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Philosophical Transactions of the Royal Society B (Biological Science)**, v.363, p.1737-1746, 2008.
- NOGUEIRA, E. M.; FEARNESIDE, P. M.; NELSON, B. W.; FRANÇA, M. B. Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.248, n.3, p.119-135, 2007.
- NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNESIDE, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.208, n.13, p.261-286, 2005.
- NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNESIDE, P. M. Volume and biomass of trees in central Amazonia: Influence of irregularly shaped and hollow trunks. **Forest Ecology and Management**, v.227, n.1-2, p.14-21, 2006.
- PERZ, S. G.; WALKER, R. T. Household life cycles and secondary forest cover among small farm colonists in the Amazon. **World Development**, v.30, n.6, p.1009-1027, 2002.
- RASMUSSEN, R. A.; KHALIL, M. A. K. Isoprene over the Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research**, v.93, p.1417-1421, 1988.
- SCHIMMEL, D.; ALVES, D.; ENTING, I.; HEIMANN, M.; JOOS, F.; RAYNAUD, D.; WIGLEY, T.; PRATHER, M.; DERWENT, R.; EHHALT, D.; FRASER, P.; SANHUEZA, E.; ZHOU, X.; JONAS, P.; CHARLSON, R.; RODHE, H.; SADASIVAN, S.; SHINE, K. P.; FOUQUART, Y.; RAMASWAMY, V.; SOLOMON, S.; SRINIVASAN, J.; ALBRITTON, D.; ISAKSEN, I.; LAL, M.; WUEBBLES, D. Radiative forcing of climate change. In: HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; CALLANDER, B. A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. (eds.). **Climate Change 1995: The Science of Climate Change**. Cambridge (U.K.): Cambridge University Press. 1996, p.65-131.
- SHIMABUKURO, Y. E.; KRUG, T.; SANTOS, J. R.; NOVO, E.M.; YI, J. L. R. Roraima o incêndio visto do espaço. **Ciência Hoje**, v.27, n.157, p. 32-34, 2000.
- SILVA, R. P. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). 2007. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus (Amazonas).
- SKOLE, D. L.; CHOMENTOWSKI, W. H.; SALAS, W. A.; NOBRE, A. D. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. **BioScience**, v.44, n.5, p. 314-322, 1994.
- SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. **Science**, v.260, p.1905-1910, 1993.
- SOMBROEK, W. G. Biomass and carbon storage in the Amazon ecosystems. **Interciencia**, v.17, n.5, p.269-272, 1992.
- STARK, N.; SPRATT, M. Biomass and nutrient storage in rainforest oxisols near San Carlos de Río Negro. **Tropical Ecology**, v.18, n.1, p.1-9, 1977.
- TARDIN, A. T.; LEE, D. C. L.; SANTOS, R. J. R.; ASSIS, O. R.; SANTOS BARBOSA, M. P.; LOURDES MOREIRA, M.; PEREIRA, M. T.; SILVA, D.; SANTOS-FILHO, C. P. **Subprojeto Desmatamento** (Convênio IBDF/CNPq INPE 1979 - Relatório No. INPE-1649-PE/103). São José dos Campos (São Paulo): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 1980, 44 p.
- UHL, C.; SALDARRIAGA, J. **The disappearance of wood mass following slash and burn agriculture in the Venezuelan Amazon** (Relatório de Pesquisa). Dados não publicados.
- UHL, C.; BUSCHBACHER, R.; SERRÃO, E. A. S. Abandoned pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of plant succession. **Journal of Ecology**, v.76, p.663-681, 1988a.
- UHL, C.; KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L. Fire in the Venezuelan Amazon 2: Environmental conditions necessary for forest fires in the evergreen rainforest of Venezuela. **Oikos**, v.53, p.176-184, 1988b.
- VASCONCELOS, S. S.; FEARNESIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; NOGUEIRA, E. M.; DE OLIVEIRA, L. C.; FIGUEIREDO, E. O. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: Estimates of area and potential carbon emissions. **Forest Ecology and Management**, v.291, p.199-208, 2013.
- XAUD, H. A. M.; MARTINS, S. R. F. V.; DOS SANTOS, J. R. Tropical forest degradation by mega-fires in the northern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v.294, p.97-106, 2013.