

**The text that follows is a REPRINT
O texto que segue é um REPRINT.**

Please cite as:
Favor citar como:

Fearnside, P.M. 2015. As usinas hidrelétricas mitigam o efeito estufa? O caso da barragem de Curuá-Una. pp. 193-203. In: P.M. Fearnside (ed.) *Hidrelétricas na Amazônia: Impactos Ambientais e Sociais na Tomada de Decisões sobre Grandes Obras*. Vol. 2. Editora do INPA, Manaus. 297 pp.

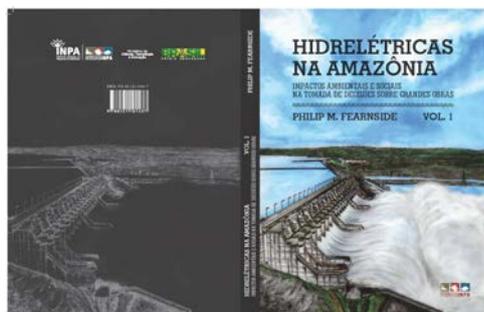
[Tradução de: Fearnside, P.M. 2005. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 10(4): 675-691. doi: 10.1007/s11027-005-7303-7]

ISBN print: 978-85-211-0144-4 online: 978-85-211-0150-5

Copyright: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA

The original publication is available from:
A publicação original está disponível de:

<http://livrariadoinpa.nuvemshop.com.br/> ou envie e-mail para: editora.vendas@gmail.com; editora@inpa.gov.br. Telefones: (92) 3643-3223, 3643-3438.



Download grátis em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2015/Livro-Hidro-V2/Livro%20Hidrelétricas%20V.2.pdf

Capítulo 30

As Usinas Hidrelétricas Mitigam o Efeito Estufa? O Caso da Barragem de Curuá-Una

Philip M. Fearnside

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)
Av. André Araújo, 2936 - CEP: 69.067-375, Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: pmfearn@inpa.gov.br

Tradução de:

Fearnside, P.M. 2005. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam.
Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 10(4): 675-691. doi: 10.1007/s11027-005-7303-7

RESUMO

As barragens de usinas hidrelétricas resultam em emissões de gases de efeito estufa quando construídas em áreas florestadas nos trópicos, fato ilustrado pela Hidrelétrica de Curuá-Una, no Estado do Pará. As emissões de gases incluem o gás carbônico formado pela decomposição acima da superfície da água das árvores deixadas em pé, e o metano resultante da decomposição da vegetação aquática macia, sob condições anóxicas no fundo do lago. Esta biomassa de rápida decomposição inclui as macrófitas e a vegetação que cresce na zona de deplecionamento, que é inundada quando o nível da água no reservatório se eleva. Algum metano é liberado pela superfície do reservatório através de bolhas e por difusão. Entretanto, quantias maiores são liberadas pelas turbinas e pelo vertedouro. A concentração de metano na água aumenta com a profundidade, sendo que as turbinas e o vertedouro retiram a água de profundidades suficientes para ter um conteúdo significativo de metano. No ano de 1990, treze anos após o enchimento, a Represa de Curuá-Una emitiu 3,7 vezes mais gases de efeito estufa do que teriam sido emitidos gerando a mesma quantidade de eletricidade através da queima do petróleo.

Palavras-Chave: Amazônia, represas, emissões de gás de estufa, hidrelétricas, reservatórios, metano, barragens

INTRODUÇÃO

As emissões de gases de efeito estufa representam uma forte preocupação ambiental com relação da construção de represas hidrelétricas em áreas de floresta tropical. A barragem de Curuá-Una, com 40 MW instalados é localizada no rio Curuá-Una, na cachoeira do Palhão (2° 50' Sul e 54° 18' Oeste), a 70 km ao Sudoeste de Santarém, no Estado do Pará (Figura 1), oferecendo um exemplo de como a construção de represas tropicais pode resultar em fortes emissões de gases de efeito estufa. A maior parte (57,4%) do reservatório está inserido na bacia do rio Curuá-Una, apenas uma pequena parte se encontra em bacias de outros afluentes como o Rio Moju (11,7%), Mojuí (4,4%), e Poraquê (3,2%), e em vários igarapés menores (2,9%) (Vieira, 1982, p. 13). O reservatório encheu pelo período de janeiro a maio de 1977, ocupando uma área de 72 km² em nível operacional, com 68 m acima do nível do mar (Tabela 1). O objetivo do trabalho foi de comparar as emissões de gases de efeito estufa da barragem de Curuá-Una com as emissões que teriam sido liberadas se a mesma quantidade de eletricidade fosse gerada de usinas termelétricas. Serão utilizados nas análises dados de emissões referentes ao ano de 1990, que é o ano de referência utilizado nos inventários nacionais de gases de efeito estufa que são obrigatórios sob a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.



Figura 1. Hidrelétricas na Amazônia brasileira.

Tabela 1. Curuá-Una: Parâmetros técnicos

Parâmetro	Valor	Unidades	Fonte
Área de reservatório no nível da água normal operacional	72	km ²	Fearnside, 1995: 11.
Volume do reservatório	472	milhões de m ³	Brasil, CEPEL/ELETRONBRÁS, 1983: 4.
Profundidade média do reservatório	6	m	Duchemin <i>et al.</i> , 2000.
Capacidade instalada	40	MW	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].
Tempo de retenção	29	dias	Duchemin <i>et al.</i> , 2000.
Cota da soleira do vertedouro	58,0	m sobre o nível média do mar	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].
Máximo do nível da água normal operacional	68,0	m sobre o nível média do mar	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].
Mínimo do nível da água normal operacional	64,0	m sobre o nível média do mar	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].
Cota da soleira da tomada d'água das turbinas	48,0	m sobre o nível média do mar	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].
Cota do topo da tomada d'água das turbinas	52,9	m sobre o nível média do mar	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].
Cota do eixo central da tomada d'água das turbinas	46,2	m sobre o nível média do mar	Brasil, CELPA, s/d [C. 1975].

^(*)Esta área, medida de imagens LANDSAT, é considerada conservadora; a área do reservatório também foi informada como 78 km² (Brasil, CEPEL/ELETRONBRÁS, 1983: 4), 102 km² (Robertson, 1980) e 86 km² (Paiva, 1977: 17).

EMISSIONES DE GÁS CARBÔNICO

As barragens de usinas hidrelétricas geram emissões de gases de várias fontes. Todas devem ser incluídas nas estimativas obtendo informações válidas sobre o impacto dessas obras sobre o aquecimento global. A decomposição da biomassa de árvores acima da superfície da água é significativa na primeira década depois da formação do reservatório em uma área de floresta tropical, sendo que essa emissão diminui à medida que o estoque de biomassa vai se esgotando. A área de sete Km² de leito fluvial (calculada de um mapa reproduzido por Robertson, 1980; veja Fearnside, 1995, p. 11) foi deduzida da área alagada total para calcular uma área de floresta inundada de 65 Km². A decomposição das árvores mortas em pé representa uma fonte de gás carbônico (CO₂), já que metade da biomassa seca é carbono. O reservatório é raso, com profundidade média de seis metros, e com uma grande flutuação vertical de até seis metros. Isso faz com que grande parte da biomassa fique fora da água onde se decompõe rapidamente sob condições aeróbicas (Figura 2). A floresta inundada foi classificada como ombrófila densa (Db) (Brasil, IBGE & IBDF, 1988), com uma biomassa média de 362 t/ha no Pará (Atualizado de Fearnside,

1994, 1997a, p. 332, inclusive ajustes de Fearnside & Laurance, 2004 e Nogueira, 2004).

A taxa de decomposição das árvores mortas acima da superfície da água é incerta. O presente cálculo faz a suposição otimista (do ponto-de-vista das emissões em 1990) de que a decomposição acima da linha da água segue o mesmo padrão observado nos desmatamentos amazônicos criados em atividades agropecuárias (Barbosa & Fearnside, 1996). Entretanto, utilizando esse modelo ambiental, a maior parte da madeira presente no reservatório teria desaparecido antes de 1990, treze anos após o enchimento do lago. A taxa de queda de madeira da zona acima d'água para as zonas abaixo

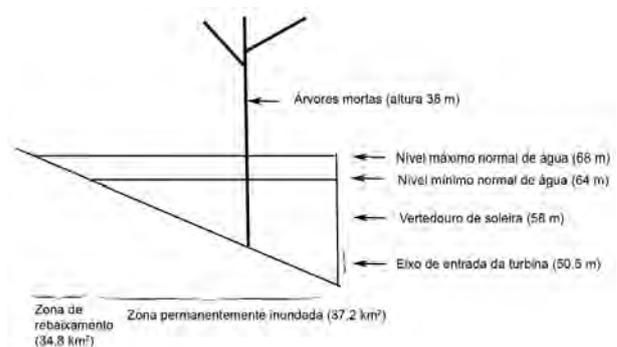


Figura 2. Diagrama esquemático da barragem e reservatório de Curuá-Una, comparando as cotas (elevações acima do nível médio do mar) das características chaves. O eixo horizontal não está em escala comparável.

Tabela 2. Parâmetros para a emissão pela biomassa acima d'água no reservatório de Curuá-Una

Parâmetro	Valor	Unidades	Fonte
Fração acima do solo	0,759	Fração	Fearnside, 1997b: 337
Profundidade média da zona de água de superfície	1	m	Presunção, baseado em deterioração de madeira comercial
Taxa de decomposição de folhas na zona de acordo com a época inundada	-0,5	Fração/ano	Presunção; o secamento sazonal apressa a taxa (Polunin, 1984: 129)
Taxa de decomposição acima d'água (0-4 anos)	-0,1680	Fração/ano	Presumido a ser o mesmo que em floresta derrubada (Fearnside, 1996: 611)
Taxa de decomposição acima d'água (5-7 anos)	-0,1841	Fração/ano	Presumido a ser o mesmo que em floresta derrubada (Fearnside, 1996: 611)
Taxa de decomposição acima d'água (8-10 anos)	-0,0848	Fração/ano	Presumido a ser o mesmo que em floresta derrubada (Fearnside, 1996: 611)
Taxa de decomposição acima d'água (>10 anos)	-0,0987	Fração/ano	Presumido a ser o mesmo que em floresta derrubada (Fearnside, 1996: 611)
Conteúdo de carbono de madeira	0,50	Fração	Fearnside <i>et al.</i> , 1993)
Taxa de queda de madeira da zona acima d'água	0,1155	Fração/ano	Presunção: vida média = 6 anos
Biomassa total média da floresta em Curuá-Una	477	t/ha	Atualizado de Fearnside, 1997a ^(a)
Profundidade d'água média no nível mínimo	6,8	m	Usa 64,0 m sobre o nível médio do mar como o mínimo do nível operacional normal (CELPA, s/d [C. 1975])
Biomassa inicial presente: folhas	8,1	t/ha	Calculado da biomassa total e de Fearnside (1995: 12)
Biomassa inicial presente: madeira acima d'água	226.4	t/ha	Calculado da biomassa total e de Fearnside (1995: 12)
Biomassa inicial presente: abaixo do solo	114.9	t/ha	Calculado da biomassa total e da fração acima do solo.
Liberação de metano através de térmitas	0,687	kg CH ₄ /ha/ano	Martius <i>et al.</i> , 1996: 527.

^(a) -6,4% de ajustes para o fator de forma (-15,6%) e árvores ocas (+9,2%) (Fearnside & Laurance, 2004), e -12,1% para densidade de madeira (Nogueira, 2004).

d'água é presumido a corresponder a uma meia-vida de seis anos. Considerando apenas a decomposição acima do lago, 0,01 milhões de toneladas de C foram emitidas dessa fonte em 1990 (Tabela 2). Sendo assim, essa é uma sub estimativa, pois não considera a madeira que cai na água que posteriormente é oxidada. Foi sugerida que essa biomassa acima da água se decomponha muito mais lentamente (Gunkel *et al.*, 2003). Porém, a maior parte da biomassa não decomposta 23 anos após a inundação do lago parece ser a porção parcialmente inundada e a totalmente inundada, sendo que quase toda a porção acima da água desapareceu.

EMISSIONES DE METANO

a. Fontes de carbono

O metano (CH₄) é produzido em reações anaeróbicas no fundo do reservatório. Os troncos e galhos das árvores mortas são bastante resistentes à decomposição nessas condições. Por outro lado, as macrófitas (plantas aquáticas) e outras plantas que crescem nas áreas de deplecionamento (as áreas temporariamente expostas quando o nível d'água desce) representam matéria vegetal verde e macia que nutre microorganismos no fundo liberando o metano. Por tonelada de gás, o metano apresenta 21 vezes mais impacto sobre o efeito estufa do que o gás carbônico, considerando os potenciais

de aquecimento global adotados no Protocolo de Kyoto (Schimel *et al.*, 1996: 121), e 23 vezes mais, considerando o potencial de aquecimento derivado no Terceiro Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima (IPCC)(Houghton *et al.*, 2001).

Curuá-Una apresenta uma grande área de deplecionamento (*drawdown*) grande relativo ao tamanho do reservatório. A variação sazonal representa seis metros de variação entre os níveis operacional máximo e mínimo. Como comparação, Itaipu apresenta uma variação de apenas 20 a 40 cm. Assim, as grandes áreas expostas na época seca se tornam fonte de matéria vegetal verde para zonas anóxicas do lago nos períodos de cheia. Além disso, a entrada do carbono através de erosão do solo pode promover uma emissão significativa de metano. A bacia do rio Curuá-Una sofreu um grande desmatamento, provocando uma eutrofização cultural. Assim, o reservatório mantém um nível de concentração de nutrientes suficiente para sustentar a produtividade de macrófitas (Gunkel *et al.*, 2003), sustentando as emissões de metano por um longo período.

Uma contabilidade completa teria que deduzir o impacto sobre o efeito estufa do CO₂ que teria sido liberado pela oxidação de uma parte deste carbono na ausência da represa. Este ajuste, provavelmente, seria pequeno, tanto porque uma parte do carbono seria

depositada nos sedimentos, em lugar de ser liberada para a atmosfera (não necessariamente muito menos que sob o cenário com o reservatório), e porque, por cada tonelada de carbono, o CH₄ tem 7,6 vezes mais impacto do que o CO₂ sobre o efeito estufa (a um potencial de aquecimento global para CH₄ de 21, em termos de peso de gás).

b. Emissões de superfície

As emissões superficiais de metano dependem do habitat em estudo, as fortes emissões vêm dos bancos de macrófitas e das áreas de árvores em pé, sendo fracas as emissões ao longo do canal do rio. Nos primeiros anos após o enchimento, uma grande porção do reservatório estava coberta de macrófitas, especialmente o águapé (*Eichhornia crassipes*), mas também incluindo áreas menores de *Salvinia auriculata*, *Ricciocarpus natans*, *Pistia stratiotes*, *Scirpus cubensis* e *Utricularia* spp. (Junk *et al.*, 1981; Vieira, 1982: 10-11). Grandes blocos de macrófitas foram presos entre as árvores mortas, descritos como dando à represa um “aspecto de desolação” (Vieira, 1982, p. 11). Até 1999, *Polygonum portosiense* (na família Polygonaceae) tinha se tornado a espécie dominante (Gunkel *et al.*, 2003, p. 209).

O reservatório raso contribui às emissões de metano, já que o CH₄ liberado ao fundo em bolhas é oxidado até CO₂ quando sobe à superfície pela coluna d’água, e com água mais rasa uma proporção maior do metano produzido no fundo do lago chega até a atmosfera. O total de emissões de superfície depende da área de água. Uma estimativa grosseira para emissões de superfície pode ser feita (Tabela 3), presumindo que a área em 1990 era igual à área em 1997-1998 (otimista, dado que o nível d’água em 1997-1998 seria abaixo da média, devido ao evento El Niño).

Os bancos de macrófitas (matupás) têm emissões mais altas do que a água aberta. A área de macrófitas sobre o lago pode ser calculada usando a equação de potência obtida por Lima (2002: 47), baseado em uma série temporal de dados de satélite dos reservatórios de Samuel e Tucuruí (eq. 1):

$$Y = 0,2 X - 0,5 \quad (\text{eq. 1})$$

onde:

X = O número de anos após a inundação
Y = A fração do reservatório coberta por macrófitas.

Utilizando essa equação foi encontrado que 5.5% da superfície do lago era coberta por macrófitas em 1990. Este valor é conservador comparado a uma projeção muito mais alta da cobertura de macrófitas, feita por Gunkel *et al.* (2003, p. 209), que calcularam que aproximadamente 40% do reservatório teriam estado cobertos em 1990, uma porcentagem que diminuiria até um nível estável de 20% em 1999. Essa estimativa foi realizada utilizando dados obtidos dos primeiros anos depois que Curuá-Una estivesse cheio (Junk, 1982) e a trajetória seguida nas áreas de macrófitas no Lago Kariba, na África. A estimativa mais baixa, usada aqui, é consistente com a observação de Junk & Mello (1987) de que “só quantidades pequenas de macrófitas” permaneceram no reservatório em 1987, a diminuição do conteúdo de nutrientes na água tendo causado as macrófitas a diminuir depois de cobrir 26,7% do reservatório em setembro de 1979 (Junk, 1982). O reservatório de Balbina apresentou um padrão semelhante nesse sentido (Walker *et al.*, 1999).

c. Emissões das turbinas

Água que passa pelas turbinas da barragem é uma forte fonte de emissões de metano pois essa

Tabela 3. Emissões de superfície em Curuá-Una

Ítem	Unidades	Estação chuvosa	Estação seca	Nota
Bolhas	mg CH ₄ /m ² /dia	65±100	12±10	(b)
Difusão	mg CH ₄ /m ² /dia	16±45	20±19	(b)
Total	mg CH ₄ /m ² /dia	81	32	
Tempo	Dias	212	153	
Área	km ²	54,6	72	
Emissão total sazonal	t CH ₄	937,6	352,5	
Emissão total anual	t CH ₄ /ano	1.290,1		
Impacto sobre aquecimento global	Milhões de t de C equivalente/ano	0,007		(c)

(a) A estação chuvosa é de outubro a abril e a estação seca é de maio a setembro.

(b) Duchemin *et al.*, 2000 (emissão de superfície medida em 1997-1998).

(c) carbono equivalente a CO₂, considerando um potencial de aquecimento global de 21 para CH₄ (Schimel *et al.*, 1996)

água vem do fundo do lago. Quando a pressão da água cai de repente na hora da água emergir das turbinas, grande parte do gás de metano dissolvido na água é liberada (Fearnside, 2004). Dados da Barragem de Petit Saut, na Guiana francesa (Galy-Lacaux *et al.*, 1997, 1999), indicam emissões significantes de água turbinada em barragens tropicais.

O reservatório de Curuá-Una apresenta uma oxiclina abrupto a seis metros de profundidade em ambas as estações, chuvosa e seca, embora a estratificação térmica seja fraca (Duchemin *et al.*, 2000). As tomadas d'água para as turbinas e o vertedouro estão bem abaixo desta profundidade no nível operacional normal (Tabela 1). Pode ser presumido que a concentração de metano aumente na água anóxica, como geralmente acontece em reservatórios. Na represa de Curuá-Una, o oxigênio não foi detectado em profundidades abaixo de dez metros (Gunkel *et al.* 2003: 211). A concentração de metano aumenta com profundidade na coluna d'água de um reservatório abaixo da oxiclina: em Tucuruí uma concentração de 6,0 mg CH₄/litro de água foi medida por J.G. Tundisi a uma profundidade de 30 m em março de 1989 (Rosa *et al.*, 1997: 42). Assim, essa água profunda, com tamanha concentração de gases, produziria emissões significativas de metano para a atmosfera quando passa pelas turbinas, como na barragem de Tucuruí (Fearnside, 2002a).

Uma estimativa grosseira das emissões das turbinas em Curuá-Una em 1990 pode ser feita presumindo que a vazão era igual à média a longo prazo de 188,4 m³/segundo (calculada de Brasil, CEPEL/ELETROBRÁS, 1983: 5), e que as turbinas operaram à capacidade plena, engolindo 52 m³/s cada (Brasil, CEPEL, 1983). Ao nível d'água de 68 m sobre o nível médio do mar, que aplicaria à maior parte de 1990, a profundidade seria de 21,8 m no eixo central da entrada da turbina, e a concentração de CH₄ ajustada pelo ciclo sazonal (seguindo Fearnside, 2002a, baseado no ciclo em Petit Saut medido por Galy-Lacaux *et al.*, 1997, 1999) seria de 6,5 mg de CH₄/litro. A suposição é feita que são liberados 60% do metano em atravessar as turbinas, refletindo o fato que a barragem de Curuá-Una não dispõe de um dispositivo especial de aeração que contribui a uma emissão de 89% em Petit Saut, baseado nas medidas de Galy-Lacaux *et al.* (1997, 1999; veja Fearnside, 2002a). Dado estas suposições, a emissão das turbinas em Curuá-Una em 1990 somou 0,077 milhões de t de C equivalente a CO₂ (Tabela 4).

d. Emissões do vertedouro

Podem ser calculadas as emissões do vertedouro em 1990 usando as mesmas suposições usadas para emissões das turbinas. A profundidade para a

Tabela 4. Emissões das turbinas

Ítem	Valor	Unidades	Fonte
PARÂMETROS			
Energia gerada	185.566	MWh	Brasil, CEPEL/ELETROBRÁS, 1983: 5.
Uso de água por turbina	52,0	m ³ /s	Brasil, CEPEL/ELETROBRÁS, 1983: 5.
Capacidade por turbina	10	MW	Brasil, CEPEL/ELETROBRÁS, 1983: 4.
Concentração de CH ₄ na entrada da turbina	6,5	mg/litro	Ajustada dos 6,0 mg/litro medidos na represa de Tucuruí (veja texto).
Proporção do CH ₄ liberada pelas turbinas	0,6	Fração	Calculada baseado em 0,89: o valor medido na barragem de Petit Saut (veja texto).
VALORES CALCULADOS			
Uso de água por ano	3,47	bilhões de m ³	
CH ₄ exportado pelas turbinas	24.297	t CH ₄ /ano	
Emissão de CH ₄ das turbinas	13.498	t CH ₄ /ano	
Emissão como C equivalente a CO ₂	0,077	milhões de t de C	(a)

(a) Carbono equivalente a CO₂ com um potencial de aquecimento global de 21 para CH₄ (Schimel *et al.*, 1996).

Tabela 5. Emissões do vertedouro

Ítem	Valor	Unidades	Fonte
PARÂMETROS			
Vazão média	188,38	m ³ /s	Calculado de Brasil, CPEL/ELETRONORTE, 1983: 5.
Precipitação	1.750	mm/ano	Vieira, 1982: 2.
Evaporação de água aberta	1.548	mm/ano	Presumido ser igual a Tucuruí (Brasil, ELETRONORTE, 1989: 47).
Evaporação de macrófitas	2,48	múltiplo da evaporação em água aberta	Média de medidas para <i>Eichhornia crassipes</i> por Brezny <i>et al.</i> (1973) (1,26) e por Timmer & Weldon (1967, citado por Brezny <i>et al.</i> 1973) (3,7).
Concentração de CH ₄ no nível do vertedouro	5,0	mg/litro	Adjustado do valor medido na represa de Tucuruí (veja texto).
Proporção de CH ₄ liberada no vertedouro	0,8		Estimativa ajustado do valor medido em Petit Saut (veja texto).
VALORES CALCULADOS			
Entrada de água de precipitação	0,13	bilhões de m ³ /ano	
Perda de água de evaporação em água aberta	0,11	bilhões de m ³ /ano	
Perda de água de evapotranspiração de macrófitas	0,02	bilhões de m ³ /ano	
Saída total de água	5,95	bilhões de m ³ /ano	
Vazão média do vertedouro	78,34	m ³ /s	
Vazão anual do vertedouro	2,47	billion m ³	
Exportação de CH ₄ pelo vertedouro	12.361	t CH ₄ /ano	
Emissão de CH ₄ pelo vertedouro	9.899	t CH ₄ /ano	
Emissão de C equivalent a CO ₂	0,057	milhões de t C	(a)

(a) Carbon equivalente a CO₂ num potencial de aquecimento global de 21 para CH₄ (Schimel *et al.* 1996).

entrada do vertedouro é de 10,0 m, no nível d'água operacional normal (Tabela 1). A concentração média de CH₄, ajustada de acordo com a época do ano, a esta profundidade é de 5,0 mg CH₄/litro. A vazão atravessando o vertedouro é calculado como a vazão média menos a quantia usada pelas turbinas, com ajustes pela contribuição direta da chuva para água do reservatório e pela evaporação da superfície do reservatório.

Presumindo que 80% do CH₄ exportado na água que atravessa o vertedouro sejam emitidos, o vertedouro liberou metano equivalente a 0,057 milhões de toneladas de carbono equivalente a CO₂ em 1990 (Tabela 5).

COMPARAÇÃO COM COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

As emissões anuais para 1990 em Curuá-Una, expressadas em equivalentes de carbono de CO₂, são resumidas na Tabela 6. As emissões em 1990 (importantes por causa de contabilidade nacional sob a

convenção de clima) não incluem as emissões altas nos primeiros anos, inclusive antes do começo da geração de energia, por exemplo do concreto usado na construção de barragem. Emissões de gás de efeito estufa diminuem com o passar do tempo, mas mesmo assim ficam estabilizadas em níveis com impacto significativo, como mostrado pela estimativa atual para emissões em 1990 (13 anos depois do enchimento). O cronograma de emissão de gás de efeito estufa representa uma das principais diferenças entre represas hidrelétricas e combustíveis fósseis em termos do seu impacto no aquecimento global (Fearnside, 1997b). Como isto deveria ser levado em conta é um dos principais debates em curso sobre a contabilidade de gás de estufa, com importantes implicações para tomadores de decisão no que diz respeito às políticas de mitigação (veja Fearnside, 2002b,c; Fearnside *et al.*, 2000). Maior peso dado a resultados de impactos a curto prazo resulta em um maior impacto atribuído às hidrelétricas, em comparação com os impactos de combustíveis fósseis.

Tabela 6. Emissões anuais de gases de efeito estufa em Curuá-Una em 1990.

Fonte de fluxo	Emissão anual (milhões de t C equivalente a CO ₂)	Porcentagem da emissão periódica total
EMISSIONES PERIÓDICAS (EMISSIONES DE INVENTÁRIO)		
Emissões de superfície	0,007	5,2
Emissões das turbinas	0,077	54,7
Emissões do vertedouro	0,057	40,1
Emissões periódicas totais	0,141	100,0
COMPONENTES ADICIONAIS DE IMPACTO LÍQUIDO (NÃO INVENTÁRIO)		
Emissão de decomposição de biomassa de árvores	0,010	
Fluxos dos ecossistemas pre-represa ^(a)	-0,003	
EMISSIONE LÍQUIDA, SEM CONSIDERAR A SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL	0,148	
Combustíveis fósseis substituídos	-0,040	
EMISSIONE LÍQUIDA COM SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE FÓSSIL	0,109	
EMISSIONE A ENERGIA HÍDRELÉTRICA COMO MÚLTIPLO DE THERMAL ^(b) = 3,7		

^(a) fluxos dos ecossistemas pre-represa: sumidouro de CH₄ no solo da floresta, fonte de N₂O no solo da floresta, e fonte de CH₄ de térmitas na floresta.

^(b) emissão líquida (exclusiva da substituição de combustíveis fósseis), dividida pela emissão dos combustíveis fósseis substituídos.

O carbono de combustível fóssil substituído pela Curuá-Una pode ser calculado baseado na emissão de 806,1 g de CO₂ gás equivalente/kWh de eletricidade gerada a partir de óleo, a média de sete estudos (variação 686-949 g) revisados por Van Vate (1996). Um ajuste precisa ser feito pela perda na transmissão até Santarém, que é presumido a ser igual à perda de 3% calculada para uma distância de transmissão semelhante na Hidrelétrica de Samuel, em Rondônia (Brasil, ELETRONORTE, s/d [C. 1987]). É presumido que a energia gerada em 1990 esteja igual à energia gerada entre maio de 2000 e abril de 2001, que totalizou 185.655 MWh (Brasil, ANEEL, 2001), presumindo que maio e junho de 2000 tiveram a mesma produção que julho. Todos os quatro turbinas da Usina de Curuá-Una tinham sido instaladas antes de 1990. Dado estas suposições, Curuá-Una substituiu por apenas 0,040 milhões de t C equivalente a CO₂ em 1990, ou seja, muito menos que a emissão da barragem (Tabela 6).

Emissões de gás de efeito estufa representam um impacto significativo de barragens hidrelétricas tropicais, fato que geralmente não é levado em conta quando são tomadas as decisões sobre a construção das barragens. Grande parte da indústria hidrelétrica ainda apresenta estas usinas como sendo de energia “limpa” (Veja IRN, 2002). Muito embora a geração a partir de combustível fóssil frequentemente esteja pior que a geração por hidrelétricas, de uma

perspectiva de aquecimento global, este não é o caso em locais desfavoráveis, como em Curuá-Una.

Isto difere da versão preliminar do inventário nacional brasileiro de emissões de gases de efeito estufa (Rosa *et al.*, 2002; veja também Rosa *et al.*, 2004). A diferença é o resultado da estimativa oficial omitir parte importante do impacto: as estimativas do inventário só incluem emissões da superfície do reservatório, uma fonte que representa apenas 5,2% das emissões periódicas totais de Curuá-Una (Tabela 6). Emissões periódicas totais incluem as da superfície, das turbinas e do vertedouro, mas não o grande pulso de uma vez só de emissão causado pela decomposição da biomassa da floresta nos primeiros anos após a formação do reservatório. Emissões periódicas totais representam a medida de emissões apropriada para represas nos inventários nacionais, que são exigidos pela Convenção de Clima (IPCC, 1997). Os inventários contam a biomassa da floresta perdida como uma forma de emissão de desmatamento para reservatórios encharcados durante o período do inventário, e a substituição de energia termelétrica será refletida na parte do inventário sobre combustíveis fósseis.

Nas comparações entre os impactos relativos a diferentes fontes de obtenção de energia, devem ser consideradas outras emissões fora às relacionadas nos inventários nacionais na categoria para

hidrelétricas. O fluxo mais importante é a emissão de CO₂ da decomposição aeróbia das árvores mortas que projetam para fora d'água. Isto é considerado uma forma de desmatamento, e seria considerado para os reservatórios enchidos durante o período de inventário. No caso do reservatório de Curuá-Una, que já estava cheio antes do período do inventário brasileiro (1988-1994), estas emissões não são contadas nos cálculos de emissões líquidas comprometidas que representam o desmatamento no inventário. Quantias maiores de emissões oriundas da decomposição acima d'água em Tucuruí (enchida de setembro de 1984 a março de 1985) também não são contadas, embora as emissões deste tipo são contadas de Samuel (enchida entre outubro de 1988 e julho de 1989) e parte dessas emissões de Balbina (enchida entre outubro de 1987 e julho de 1989).

O impacto líquido de barragens sobre o efeito estufa inclui ajustes para fluxos pré-represa dos ecossistemas anteriores e para as emissões dos combustíveis fósseis substituídos pela produção elétrica da barragem. Uma análise de energia de cadeia completa (FENCH), não tentada aqui, incluiria o impacto adicional do cimento, aço e combustível fóssil usados na construção da barragem.

Em 1990, Curuá-Una teve 3,7 vezes mais impacto que o combustível fóssil substituído (Tabela 6). Para fins de comparação, em 1990 a Hidrelétrica de Balbina (com 3 anos de idade) emitiu 22,6 vezes mais que o combustível fóssil substituído (Fearnside, 2005a), a Samuel Dam (com idade de 2 anos) emitiu 11,6 vezes mais (Fearnside, 2005b), enquanto a Tucuruí em 1990 (com idade de 6 anos) emitiu 1,8-2,6 vezes mais, considerando emissões de 7,0-10,1 milhões de t C em Tucuruí (Fearnside, 2002a), 2,5% de perda em transmissão (presumido ser igual a Balbina, como em Fearnside, 1997b), e as mesmas emissões de combustíveis fósseis por unidade de energia usadas nos cálculos para Curuá-Una.

CONCLUSÕES

Barragens hidrelétricas em áreas de floresta tropical podem emitir quantidades significativas de gases de efeito estufa. A Hidrelétrica de Curuá-Una oferece um exemplo de uma represa onde as emissões são altas devido a fatores como um reservatório grande relativo à produção de energia da represa, uma área de desplecionamento grande na qual uma vegetação macia cresce rapidamente (para depois ser submergida e

decomposta sob condições anaeróbicas onde o metano é formado), e biomassa alta de árvores deixadas em pé no reservatório. As emissões de Curuá-Una foram maiores que a emissão do combustível fóssil substituído pela energia gerada pela represa: 3,7 vezes mais impacto em 1990 (13 anos depois de encher o reservatório), sendo esperado que esse nível de emissão permaneça estável por um longo período.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq AI 470765/01-1) e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA PPI 1-3620) que contribuíram com o apoio financeiro. Este trabalho é uma tradução de Fearnside (2005a). Agradeço a Alexandre Kemenes pelas correções do português.

LITERATURA CITADA

- Barbosa, R.I. & P.M. Fearnside. 1996. Pasture burning in Amazonia: Dynamics of residual biomass and the storage and release of aboveground carbon. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 101(D20): 25847-25857.
- Brasil, ANEEL. 2001. Mapa. <http://www.aneel.gov.br/defaultmapa.html>, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Brasília, DF.
- Brasil, CEPEL/ELETRORÁS. 1983. *Relatório Técnico final No. 963/83. Estudo comparativo de manutenção nas usinas de Curuá-Una e Moxotó*, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL, Centrais Elétricas Brasileiras (ELETRORÁS), Rio de Janeiro, RJ. 48 p.
- Brasil, ELETRONORTE. 1989. *Usina Hidrelétrica Tucuruí: Memória Técnica*, Diretoria Técnica (DT), Departamento de Projetos (TPR), Projeto Memória, Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), Brasília, DF, 681 p.
- Brasil, ELETRONORTE. s/d [C. 1987], *UHE Samuel*, Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (ELETRONORTE), Brasília, DF, 22 p.
- Brasil, IBGE & IBDF. 1988. Mapa de Vegetação do Brasil. Escala de mapa: 1:5.000.000, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) & Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Brasília, DF.
- Brezny, O., I. Mehta & R.K. Sharma. 1973. Studies on evapotranspiration of some aquatic weeds. *Weed Science* 21(3): 197-204.
- CELPA. s/d [C. 1975]. Usina Hidroelétrica de Curuá-Una, Centrais Elétricas do Pará S.A. (CELPA), Belém, Pará, 8 p.

- de Lima, I.B.T. 2002. *Emissão de metano em reservatórios hidrelétricos amazônicos através de leis de potência*. tese de doutorado em energia nuclear, Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, SP, 108 p.
- Duchemin, E., M. Lucotte, R. Canuel, A.G. Queiroz, D.C. Almeida, H.C. Pereira & J. Dezincourt. 2000. Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those of other reservoirs worldwide. *Verhandlungen International Vereinigung für Limnologie* 27: 1-5.
- Fearnside, P.M. 1994. Biomassa das florestas amazônicas brasileiras. p. 95-124. In: *Anais do Seminário Emissão x Seqüestro de CO₂*. Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Rio de Janeiro, RJ.
- Fearnside, P.M. 1995. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22: 7-19.
- Fearnside, P.M. 1996. Amazonia and global warming: Annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region, p. 606-617. In: J. Levine (ed.), *Biomass Burning and Global Change. Volume 2: Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, E.U.A.
- Fearnside, P.M. 1997a. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: Net committed emissions. *Climatic Change* 35: 321-360.
- Fearnside, P.M.: 1997b, Greenhouse-gas emissions from Amazonian hydroelectric reservoirs: The example of Brazil's Tucuruí Dam as compared to fossil fuel alternatives. *Environmental Conservation* 24: 64-75.
- Fearnside, P.M. 2002a. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133: 69-96.
- Fearnside, P.M. 2002b. Time preference in global warming calculations: A proposal for a unified index. *Ecological Economics* 41: 21-31.
- Fearnside, P.M. 2002c. Why a 100-year time horizon should be used for global warming mitigation calculations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7: 19-30.
- Fearnside, P.M. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly "clean" energy source, *Climatic Change* 66(2-1): 1-8. Doi: 10.1023/B:CLIM.0000043174.02841.23
- Fearnside, P.M. 2005a. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 10(4): 675-691. doi: 10.1007/s11027-005-7303-7
- Fearnside, P.M. 2005b. Brazil's Samuel Dam: Lessons for hydroelectric development policy and the environment in Amazonia. *Environmental Management* 35(1): 1-19. Doi: 10.1007/s00267-004-0100-3
- Fearnside, P.M., D.A. Lashof & P. Moura-Costa. 2000. Accounting for time in mitigating global warming through land-use change and forestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 5: 239-270.
- Fearnside, P.M. & W.F. Laurance. 2004. Tropical deforestation and greenhouse gas emissions. *Ecological Applications* 14(4): 982-986. doi: 10.1890/03-5225
- Fearnside, P.M., N. Leal Filho & F.M. Fernandes. 1993. Rainforest burning and the global carbon budget: Biomass, combustion efficiency and charcoal formation in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 98(D9): 16733-16743.
- Galy-Lacaux, C., R. Delmas, C. Jambert, J.-F. Dumestre, L. Labroue, S. Richard & P. Gosse. 1997. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles* 11: 471-483.
- Galy-Lacaux, C., R. Delmas, J. Kouadio, S. Richard & P. Gosse. 1999. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biogeochemical Cycles* 13: 503-517.
- Gunkel, G., U. Lange, D. Walde & J.W.C. Rosa. 2003. The environmental and operational impacts of Curuá-Una, a reservoir in the Amazon region of Pará, Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 8(3-4): 201-216.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.G. Griggs, M. Noguer, R.J. Van der Linden & D. Xiaosu (eds.). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 944 p.
- IPCC. 1997. *Revised 1996 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Bracknell, Reino Unido. 3 vols.
- IRN (International Rivers Network). 2002. *Flooding the Land, Warming the Earth: Greenhouse Gas Emissions from Dams*, International Rivers Network, Berkeley, California, E.U.A., 18 p.
- Junk, W.J. 1982. Zur entwicklung aquatischer makrophyten in Curuá-Una, dem ersten stausee in Zentralamazonien. *Arch. Hydrobiol.* 95: 169-180.
- Junk, W.J. & J.A.S. de Mello. 1987 Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. pp. 367-385 In: G. Kohlhepp & A. Schrader (eds.), *Homem e Natureza na Amazônia*. Tübinger Geographische Studien 95 (Tübinger Beiträge zur Geographischen Lateinamerika-Forschung 3). Geographisches Institut, Universität Tübingen, Tübingen, Alemanha.
- Junk, W.J., B.A. Robertson, A.J. Darwich & I. Vieira. 1981. Investigações limnológicas e ictiológicas em Curuá-Una, a primeira represa hidrelétrica na Amazônia Central. *Acta Amazonica* 11: 689-716.
- Martius, C., P.M. Fearnside, A.G. Bandeira & R. Wassmann. 1996. Deforestation and methane release from termites in Amazonia. *Chemosphere* 33(3): 517-536.

- Nogueira, E. 2004. *Biomassa de árvores na Amazônia Central: Densidade de Madeira, Volume do Fuste e Ocorrência de Oco*. Dissertação de mestrado em ciência florestal tropical. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) & Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, Amazonas. 96 p.
- Paiva, M.P. 1977. *The Environmental Impact of Man-Made Lakes in the Amazonian Region of Brazil*. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS) Diretoria de Coordenação, Rio de Janeiro, RJ. 69 p.
- Polunin, N.V.C. 1984. The decomposition of emergent macrophytes in fresh water. *Advances in Ecological Research* 14: 115-168.
- Robertson, B.A. 1980. *Composição, Abundância e Distribuição de Cladocera (Crustacea) na Região de Água Livre da Represa de Curuá-Una, Pará*. Tese de mestrado em biologia de água doce e pesca do interior, Fundação Universidade do Amazonas (FUA) & Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Amazonas, 105 p.
- Rosa L.P., M.A. dos Santos, B. Matvienko, E.O. dos Santos & E. Sikar. 2004. Greenhouse gases emissions by hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climatic Change* 66(1-2): 9-21
- Rosa, L.P., M.A. dos Santos, J.G. Tundisi & B.M. Sikar. 1997. Measurements of greenhouse gas emissions in Samuel, Tucuruí and Balbina Dams. p. 41-55. In: L.P. Rosa & M.A. dos Santos (eds.), *Hydropower Plants and Greenhouse Gas Emissions*, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Rosa, L.P., B.M. Sikar, M.A. dos Santos & E.M. Sikar. 2002. *Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros*. Relatório de Referência, Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, DF. 119 p. (http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/pdf/metano_p.pdf).
- Schimmel, D. & 75 outros. 1996. Radiative forcing of climate change. p. 65-131 In: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg & K. Maskell (eds.), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Timmer, C.E. & L.W. Weldon. 1967. Evapotranspiration and pollution of waterhyacinth. *Hyacinth Control Journal* 6: 34-37.
- van de Vate, J.F. 1996. Hydropower: Potential sources of greenhouse gases. In: *Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and Other Energy Sources. Papers Presented at an IAEA Advisory Group Meeting Jointly Organized by Hydro-Québec and the International Atomic Energy Agency, Hydro-Québec Headquarters, Montréal (Canada) 12-14 March 1996*. International Atomic Energy Agency (IAEA), Geneva, Suíça (I1-AG-832.4), Paginação irregular.
- Vieira, I. 1982. *Aspectos Sinecológicos da Ictiofauna de Curuá-Una, Represa Hidroelétrica da Amazônia Brasileira*. Tese de livre docência em biologia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais. 107 p.
- Walker, I., R. Miyai & M.D.A. de Melo. 1999. Observations on aquatic macrophyte dynamics in the reservoir of the Balbina hydroelectric powerplant, Amazonas state, Brazil. *Acta Amazonica* 29: 243-265.