

The text that follows is a TRANSLATION  
O texto que segue é uma TRADUÇÃO

**Emissões de gases de efeito estufa por represas hidrelétricas: Controvérsias fornecem um trampolim para repensar uma fonte de energia supostamente "limpa".**

Please cite the original article:  
Favor citar o trabalho original:

**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**

Disponível em: <http://philip.inpa.gov.br>

# **EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR REPRESAS HIDRELÉTRICAS: CONTROVÉRSIAS FORNECEM UM TRAMPOLIM PARA REPENSAR UMA FONTE DE ENERGIA SUPOSTAMENTE "LIMPA"**

PHILIP M. FEARNSIDE

Coordenação de Pesquisas em Ecologia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia  
(INPA), C.P. 478, 69011-970 Manaus - Amazonas  
E-mail: pmfearn@inpa.gov.br

17 de janeiro de 2004

## RESUMO

Hidrelétricas emitem quantidades significativas de gases de efeito estufa, pela liberação dióxido de carbono oriundo da decomposição aeróbica de biomassa de floresta morta nos reservatórios que projeta fora da água, e pela liberação de metano oriundo da decomposição anaeróbica de matéria não-lignificada (plantas herbáceas das zonas de despalacamento e macrófitas). A maior parte do metano é emitido pela água que passa pelas turbinas e pelo vertedouro. Emissões pela superfície da represa, que é o único componente do impacto atualmente incluído nas estimativas oficiais brasileiras, é uma parte relativamente pequena do impacto total.

**PALAVRAS CHAVE:** Hidrelétricas, Barragens, Metano, Efeito Estufa, Aquecimento Global, Emissões de gases.

### 1. Metano

Quase todo mundo já abriu uma garrafa de Coca Cola e viu as bolhas minúsculas que imediatamente emergem do líquido. O gás (neste caso gás carbônico) é dissolvido na água, que compõe a maior parte da refrigerante. A solubilidade do gás é mais alta sob pressão na garrafa fechada do que é quando ela é aberta, o resultado do princípio químico conhecido como a Lei de Henry, que estabelece que a solubilidade de um gás em um líquido é diretamente proporcional à pressão parcial do gás. Mergulhadores estão familiarizados com o fato que um abaixamento súbito da pressão pode provocar a liberação de bolhas de nitrogênio no sangue, sendo este um risco mortal para mergulhadores que sobem muito rápido à superfície. No caso de água liberada do fundo de uma coluna de água de uma represa hidrelétrica o efeito de pressão age em conjunto com o efeito de temperatura, porque o aquecimento da água também reduz a solubilidade de gás (o Princípio de Le Chatelier). O efeito de liberação de pressão é grande e imediato, mas há uma demora curta para a ação do efeito do Princípio de Le Chatelier até chegar a um novo equilíbrio de temperatura.

A diferença de pressão entre uma garrafa de Coca Cola fechada e aberta é pequena quando comparada à pressão no fundo de um reservatório hidrelétrico. A maioria das pessoas já experimentou a pressão nos tímpanos a dois ou três metros de profundidade em uma piscina. A pressão a 34,6 m de profundidade (a profundidade na tomada d'água das turbinas em Tucuruí) é grande, aproximadamente três atmosferas. À aproximadamente 10 m de profundidade um termoclínio impede a mistura de água e a difusão de metano ( $\text{CH}_4$ ) para a superfície. Na medida que a profundidade aumenta na coluna de água, a concentração de  $\text{CH}_4$  aumenta. A concentração no reservatório de Tucuruí medida a uma profundidade de 30 m era de 6 mg/litro de água em março de 1989 (dados de José G. Tundisi publicados por Rosa *et al.*, 1997, pág. 43); enquanto que a concentração à 34,6 m de profundidade é calculada em 7,5 mg/litro depois de um ajuste para o ciclo anual (baseado em medidas da represa de Petit Saut, na Guiana francesa: Galy-Lacaux *et al.*, 1999) e a suposição conservadora de que a concentração não continua aumentando em profundidades abaixo de 30 m na coluna de água.

Quando a água emerge das turbinas, a pressão abaixa imediatamente até o nível de uma atmosfera, e espera-se que a maioria do gás dissolvido seja liberada imediatamente. Por exemplo, quando amostras de água são trazidas do fundo de um reservatório até a superfície em um frasco de amostragem, a água espuma como a Coca Cola quando o frasco é aberto. Gases liberados deste modo incluem o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>. Embora presente em quantidades menores, é o CH<sub>4</sub> que faz com que o impacto de represas hidrelétricas seja uma preocupação como contribuinte ao efeito estufa.

O metano também é liberado no percurso da água pelo vertedouro, onde a liberação de gás é provocada não somente pela mudança em pressão e temperatura, mas também pela provisão súbita de uma área de superfície vasta quando a água é pulverizada em pequenas gotas. No vertedouro de Tucuruí, a água sai em um jato a partir de uma fenda horizontal estreita a uma profundidade de 20 m abaixo da superfície. Água a essa profundidade tem uma carga significativa de metano (calculada em 3,1 mg/litro, em média, ao longo do ano em água liberada pelo vertedouro: Fearnside, 2002a, pág. 82). O vertedouro em forma de salto de esquí é projetado para maximizar a oxigenização no rio a jusante da barragem, mas o outro lado desta moeda é a liberação imediata do metano contido na água. Sendo que  $353,6 \times 10^{12}$  litros de água, em média, passam pela barragem de Tucuruí anualmente, seja pelas turbinas ou pelos vertedouros, a quantidade de CH<sub>4</sub> exportada por essas estruturas é tremenda. No caso da Hidrelétrica de Tucuruí em 1991, considerando as suposições relativas às porcentagens liberadas do CH<sub>4</sub> desta água, liberou um total de  $0,7-1,2 \times 10^6$  toneladas de gás CH<sub>4</sub>, ou  $4,0-7,1 \times 10^6$  toneladas de carbono de CO<sub>2</sub> equivalente quando computado usando o potencial de aquecimento global de 21 adotado para metano pelo Protocolo de Kyoto (Fearnside, 2002a). A emissão total, inclusive emissões de superfície de metano e emissões da biomassa acima da água de metano e de gás carbônico, é  $7,0-10,1 \times 10^6$  toneladas de carbono de CO<sub>2</sub> equivalente: uma emissão equivalente ao carbono de combustíveis fósseis liberado pela cidade de São Paulo.

Calcula-se que os efeitos da pressão e da temperatura liberar quase todo o metano contido na água quando esta atravessa as turbinas ou os vertedouros. A pressão parcial de metano na atmosfera é muito baixa ( $1,5 \times 10^{-6}$ ). Dado a constante da Lei de Henry de CH<sub>4</sub> de  $67,4 \text{ kPa m}^3 \text{ mol}^{-1}$  (Anônimo, 1999, pág. 8-92), ou 0,681 atm/(mol/litro), o equilíbrio de CH<sub>4</sub> à pressão de uma atmosfera e à temperatura de 25° C é apenas 0,035 mg/litro. Quando a água emerge das turbinas de Tucuruí com uma concentração de metano de 7,5 mg/litro, 99,5% deste são perdidos como efeito combinado da diminuição da pressão até o nível de uma atmosfera e a elevação da temperatura até aproximadamente 25° C. O papel da temperatura nesse processo pode ser visualizado a partir da relação entre a temperatura e a solubilidade de CH<sub>4</sub> (Geventman, 1999), por exemplo, um aumento na temperatura de 15° C para 25° C reduz a solubilidade de CH<sub>4</sub> na água em 18,3%.

A escolha do método usado para calcular a liberação de metano é crítico para as conclusões alcançadas: se o método escolhido não indicar uma liberação, a conclusão apropriada pode não ser a de que não há nenhuma liberação, mas sim que simplesmente tem-se olhado no lugar errado. Por exemplo, Rosa *et al.* (2004) tratam as emissões de gases pelas turbinas e vertedouros como sendo desprezíveis, baseado em medidas de fluxos de superfície feitas desde vários centenas de metros até vários dezenas de quilômetros a jusante da barragem de Petit Saut (Galy-Lacaux *et al.*, 1997). Infelizmente para o

ambiente, a liberação de gás da água que emerge das turbinas deve ocorrer em alguns segundos, assim como as bolhas liberadas por uma garrafa de Coca Cola. O fato que pouco ou nenhum metano ainda esteja sendo liberado mais adiante rio abaixo é irrelevante. No caso das medidas de fluxo da superfície que esses autores citam da Guiana francesa, é ainda menos surpreendente que pouca emissão de metano foi observada porque as medidas foram feitas abaixo de uma barragem de 4 m especialmente projetada para oxigenar a água (Gosse, 1999).

A quantidade de metano liberada nas turbinas e no vertedouro é melhor calculado por meio de diferença, baseado na concentração de  $\text{CH}_4$  na água à profundidade da tomada d'água das turbinas atrás da barragem e a concentração na água no rio a jusante da barragem. Porque o novo equilíbrio é alcançado rapidamente quando a água emerge das turbinas, não há tempo para bactérias reduzirem o  $\text{CH}_4$  em  $\text{CO}_2$  antes do gás ser liberado para a atmosfera.

## 2. Dióxido de Carbono

Emissões de gás carbônico de reservatórios são bastante diferentes de emissões de metano em termos do impacto líquido sobre o efeito estufa. Diferente do metano, somente uma porção do gás carbônico emitido pode ser contada como um impacto líquido porque grande parte do fluxo observado do gás  $\text{CO}_2$  é cancelado através de absorções no reservatório. Metano não entra em processos fotossintéticos, embora seja reduzido lentamente a  $\text{CO}_2$  que pode ser removido através de fotossíntese. Durante os aproximadamente 10 anos, em média, que cada molécula de metano permanece na atmosfera, o efeito estufa que isto causa deve ser considerado um impacto líquido da represa. A emissão natural de metano em uma extensão de rio sem barragens é pequena, comparada à emissão de um reservatório (as represas normalmente são construídas em locais de corredeiras, em vez de áreas pantanosas onde o metano seria produzido em áreas inundadas naturais). Os reservatórios se tornam verdadeiras fábricas de metano, com o sobe e desce do nível de água no reservatório, alternadamente inundando e submergindo áreas grandes de terra ao redor da margem. Uma vegetação verde e macia cresce depressa na lama exposta, e decompõe sob condições anaeróbicas no fundo do reservatório quando a água sobe novamente. Isto converte gás carbônico atmosférico em metano, com um impacto muito mais alto sobre o efeito estufa do que o  $\text{CO}_2$  que foi retirado da atmosfera quando as plantas cresceram (21 vezes mais por tonelada de gás, ou 7,6 vezes mais por tonelada de carbono).

O  $\text{CO}_2$  que é liberado da superfície da água no reservatório, assim como o  $\text{CO}_2$  que é liberado nas turbinas e nos vertedouros, não pode ser considerado uma emissão líquida. O carbono contido neste  $\text{CO}_2$  terá entrado na água a partir de fontes como fotossíntese no reservatório (fitoplâncton, macrófitas), de material orgânico e solo erodido levados na água da terra na bacia hidrográfica, e de carbono orgânico dissolvido que entra no rio a partir do lençol freático (por exemplo, carbono de exudatos de raízes e da decomposição de liteira). O carbono de  $\text{CO}_2$  derivado de fotossíntese dentro do reservatório é apenas reciclado da atmosfera, e o efeito estaria cancelado se fossem disponíveis medidas dos fluxos entrando na água assim como também os fluxos saindo dela. Pode ser considerado que o carbono proveniente da terra firme esteja sujeito à decomposição aeróbia e a emissão em forma de

CO<sub>2</sub> no caso de referência sem uma represa, e assim não pode ser considerado como um impacto da represa.

Carbono no reservatório que não é oxidado pode ser depositado em sumidouros como os sedimentos do fundo do reservatório ou a jusante na várzea ou no delta, ou em sedimentos oceânicos, ou pode permanecer como carbono orgânico dissolvido durante um período longo. A remoção de carbono por deposição no reservatório não pode ser contada como um benefício da represa porque o carbono que é depositado nos sedimentos do reservatório provavelmente teria sido depositado em um dos outros sumidouros na ausência da barragem.

Há uma fonte de gás carbônico que deve ser contada como um impacto líquido da construção da barragem. Esta é o CO<sub>2</sub> liberado por decomposição acima da água das partes das árvores inundadas que projetam-se para fora da água. A quantidade de carbono envolvida é significativa durante a primeira década depois de enchimento do reservatório. Uma estimativa de emissões desta fonte durante o ano de 1990 (*i.e.*, o ano de referência para inventários nacionais de gás de efeito estufa sob a convenção de clima) indicou um total de 10 milhões de toneladas de carbono para as represas existentes na Amazônia brasileira: 2,55 em Tucuruí, 6,43 em Balbina, 1,13 em Samuel e 0,01 em Curuá-Una (Fearnside, 1995, pág. 16).

### **3. Comparação de Hidrelétricas com Outras Fontes de Energia**

Emissões de várias fontes estão concentradas no início da vida de uma hidrelétrica, de forma que o impacto de efeito estufa provocado pela geração de energia hidrelétrica tenha um perfil temporal significativamente diferente das emissões produzidas pela produção da mesma quantidade de energia a partir de combustíveis fósseis. Emissões da construção de uma barragem, tais como as emissões da fabricação do cimento e do aço, ocorrem até mesmo vários anos antes de começar qualquer geração de energia. A liberação de CO<sub>2</sub> pela decomposição acima da água de árvores mortas e o CH<sub>4</sub> da decomposição das partes macias (folhas) da vegetação inicial e das macrófitas são mais altas durante os primeiros anos depois do enchimento de um reservatório. Qualquer ponderação das emissões por tempo favoreceria alternativas de combustíveis fósseis, em comparação com a geração hidrelétrica (Fearnside, 1997, 2002b).

Rosa *et al.* (2004) retratam o debate sobre emissões de gases de represas hidrelétricas como sendo de dois lados, composto de um lado do lobby hidrelétrico que alega que as represas não emitem nenhum gás de efeito estufa e do outro lado daqueles que são insinuados a estarem sujeito às "tentativas dos lobbies de energia termelétrica e nuclear". Eu sugeriria que aqueles que mostraram que as represas hidrelétricas têm emissões significativas não são comprados por qualquer lobby.

Embora não seja uma simples luta entre lobbies como sugerido por Rosa *et al.* (2004), o contexto político deste debate é notável. Uma visão influente no governo brasileiro é a expressada por José Domingos González Miguez, chefe do setor de clima do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), em um workshop sobre as emissões de gás de efeito estufa de reservatórios realizado no Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, do

MCT, em Brasília em fevereiro de 2002 (um ano antes de Luis Pinguelli Rosa ser designado ao seu posto atual como presidente de ELETROBRÁS). Na transcrição do seminário, que é mantido em um website público administrado pelo setor de clima do MCT, Miguez revela:

*“Nós [o setor de clima do MCT] conversamos com o Prof. Pinguelli [Rosa] e eu pedi ajuda da ELETROBRÁS [sobre o assunto de emissões de gás de efeito estufa de hidrelétricas]; aliás quem coordenou esse trabalho [i.e., o trabalho apresentado em Rosa et al., 2004] foi a ELETROBRÁS exatamente por causa disso, porque esse assunto estava virando político. Ele tem um impacto muito grande no nível mundial, nós vamos sofrer pressão dos países desenvolvidos por causa desse assunto. E esse assunto era pouco conhecido. É maltratado. Ele é maltratado e continua sendo maltratado pelo próprio Philip Fearnside e nós temos que tomar muito cuidado. Esse debate que está acontecendo agora na imprensa mostra claramente isso, quer dizer, você pega qualquer declaração e leva para um lado para mostrar que o Brasil não é limpo, que o Brasil está se omitindo muito, que o Brasil, implicitamente, no futuro tem que ter compromisso [para reduzir as emissões]. Esse que é o grande debate político e nós estamos nos preparando para isso.”* (Brasil, MCT, 2002).

Desnecessário dizer que a idéia que pesquisa nesta área deve ser cuidadosamente “coordenada” para assegurar que somente conclusões politicamente convenientes sejam alcançadas não é o único ponto de vista. Mesmo sendo pouco popular, eu defendo a posição que devem ser quantificadas todas as fontes e sumidouros, e que estes devem ser levados em conta na formulação de políticas, neste caso incluindo o metano emitido das turbinas e dos vertedouros, e o gás carbônico da decomposição acima da água das árvores deixadas em pé nos reservatórios amazônicos. Em 1990 em Tucuruí, por exemplo, essas fontes (não contadas no estudo coordenado pela ELETROBRÁS) respondiam por, pelo menos, 93% da emissão total (Fearnside, 2002a).

ELETROBRÁS é o órgão do governo para planejar e promover o desenvolvimento energético em todo o Brasil, e tem grandes planos para construção de barragens hidrelétricas na Amazônia. A única ocasião em que a extensão completa destes planos foi revelada ao público foi no Plano 2010, que vazou ao público e subsequentemente foi liberado oficialmente em dezembro de 1987. Todas as 79 barragens listadas para a Amazônia, independente das datas previstas de construção, totalizavam 10 milhões de hectares de área de água (Brasil, ELETROBRÁS, 1987, pág. 150). Esta é aproximadamente uma área do tamanho do estado de Pernambuco, e representa 2% da Amazônia Legal, ou 3% da porção da região com floresta tropical. Após as críticas que surgiram sobre este plano, e especialmente depois de uma confrontação com povos indígenas em 1989 sobre planos para seis barragens na bacia do rio Xingu (a primeira, hoje chamada de Belo Monte, é atualmente a prioridade da ELETROBRÁS para construção), o órgão tem revelado apenas planos com listas curtas de barragens para construção, referentes a horizontes de tempo de, no máximo, 10 anos, não discutindo o plano global. As escalas de tempo para construção de barragens específicas do Plano 2010 estiraram repetidamente, como resultado das limitações financeiras da economia do País e do orçamento do governo,

mas a meta global permanece inalterada. Estas represas implicam em muitos impactos sociais e ambientais, dos quais o impacto sobre as emissões de gás de efeito estufa é apenas um (Fearnside, 1999, 2001).

Controvérsias fornecem um trampolim para repensar os impactos de barragens hidrelétricas, tanto em termos das quantidades emitidas de gases e a da estrutura teórica mais apropriada para comparar os seus impactos: as escolhas de quais emissões devem ser contadas ou não, e as decisões feitas, mesmo se por omissão, sobre como são tratadas as emissões quando elas acontecem em tempos diferentes e são de gases com tempos de vida diferentes na atmosfera. Deve ser reavaliado o papel das barragens hidrelétricas nas mudanças climáticas e da contabilidade apropriada dos custos ambientais das barragens. Esta contabilidade de custos ambientais é necessária para subsidiar a avaliação do papel apropriado da construção de novas barragens como parte do desenvolvimento na Amazônia e em todas as partes do Mundo.

### **Agradecimentos**

Agradeço ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)(Proc. 470765/01-1) para apoio financeiro e a B. Forsberg e N. Hamada por comentários. Uma versão anterior, em inglês, será publicada na revista *Climatic Change*, de Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda (Fearnside, 2004).

### **Literatura Citada**

- Anônimo. 1999. Aqueous solubility and Henry's Law constants of organic compounds. . p. 8-91 – 8-102 In: D. R. Lide (ed.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1999-2000 80<sup>th</sup> edition*. CRC Press, Boca Raton, Florida, E.U.A.
- Brazil, ELETROBRÁS. 1987. *Plano 2010: Relatório Geral. Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 Dezembro de 1987*, Centrais Elétricas do Brasil (ELETROBRÁS), Brasília, DF. 269 p.
- Brazil, MCT. 2002. Degraação do workshop: Utilização de Sistemas Automáticos de Monitoramento e Medição de Emissões de Gases de Efeito Estufa da Qualidade da Água em Reservatórios de Hidrelétricas, Centro de Gestão de Estudos Estratégicos do MCT, Brasília – DF, 06 de fevereiro de 2002. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Brasília, DF.  
<http://www.mct.gov.br/clima/brasil/doc/workad.doc>.
- Fearnside, P. M. 1995. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22: 7-19.
- Fearnside, P. M. 1997. 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. 1999. Social impacts of Brazil's Tucuruí Dam. *Environmental Management* 24: 485-495.
- Fearnside, P. M. 2001. Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Management* 27: 377-396.
- 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. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly "clean" energy source. *Climatic Change* (no prelo).
- 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.
- Geventman, L. H. 1999. Solubility of selected gases in water. . p. 8-86 – 8-90 In: , D.R. Lide. (ed.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1999-2000 80<sup>th</sup> edition*, CRC Press, Boca Raton, Florida, E.U.A.
- Gosse, P. 1999. A system for reoxygenating the water at Petit-Saut, <http://www.edf.fr/der/html/der/environnement/ptiso.en.htm>.
- 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 (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- 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* (no prelo).

