



**GRUPO XI
GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS (GIA)**

**INVENTÁRIO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DERIVADAS DE RESERVATÓRIOS
HIDRELÉTRICOS¹**

Luiz Pinguelli Rosa², Rogério Neves Mundim³, Bohdan Matvienko Sikar⁴, Marco Aurélio dos Santos², Elisabeth Matvienko Sikar⁴, Carlos Frederico S. Menezes³ e Ronaldo S. M. Lourenço³

RESUMO

Os resultados aqui apresentados são objeto de um projeto de pesquisa contratado pela ELETROBRÁS e o PNUD e realizado pela COPPE-UFRJ. Este projeto se insere no conjunto de projetos desenvolvidos em cooperação com a Coordenação de Pesquisa em Mudanças Globais do Ministério da Ciência e Tecnologia, visando a elaboração do inventário nacional das emissões de gases de efeito estufa.

O principal objetivo deste projeto é estimar as emissões de gases de efeito estufa pelos reservatórios das usinas hidrelétricas brasileiras. Um aspecto relevante é o estabelecimento da metodologia para coleta e análise de amostras e para extrapolação dos valores para o parque hidrelétrico brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE

Efeito Estufa - Dióxido de Carbono - Metano - Reservatórios hidrelétricos.

1.0 - HISTÓRICO

As concentrações de metano (CH₄) e de dióxido de carbono (CO₂) na água dos reservatórios das hidrelétricas Samuel e Tucuruí foram realizados pelo CRHEA-USP em 1989, revelando importante presença destes gases.

Por ocasião da Conferência das Nações Unidas Mundial para Meio Ambiente e Desenvolvimento - Rio-92, a COPPE-UFRJ organizou uma sessão sobre gases do efeito estufa no Seminário Rio-Ciência/92. Nesta ocasião, o CRHEA-USP foi convidado a participar de um projeto destinado a realizar medidas de fluxo destes gases nos reservatórios da Amazônia: Balbina, Tucuruí e Samuel.

Este projeto foi proposto pela COPPE-UFRJ e aceito pela ELETROBRÁS e realizado em 1992 a 1993.

No âmbito deste projeto foi desenvolvido um método para comparar as emissões de usinas hidrelétricas, cujas emissões variam no tempo, com as de usinas termelétricas, que emitirão gases de forma quase constante durante toda a vida útil. O método baseou-se nas características técnicas das usinas e em dados sobre a biomassa submersa pelo enchimento do reservatório, assumindo-se: que folhas e galhos finos se decompõem em tempo relativamente curto, decaindo exponencialmente em poucos anos; e que galhos grossos e troncos se decompõem lentamente.

Dos valores calculados destacam-se: Balbina, cujas emissões superaram as de uma termelétrica equivalente a carvão; e Tucuruí, que emitia menos do que uma termelétrica equivalente a gás natural com ciclo combinado.

As estimativas das emissões e a comparação das formas de geração se constituem em novas variáveis que podem ser utilizadas no planejamento das expansões do setor elétrico.

Atualmente, está em desenvolvimento o projeto contratado pela ELETROBRÁS e o PNUD e realizado pela COPPE-UFRJ, com o objetivo de estimar as emissões de gases de efeito estufa pelos reservatórios das usinas hidrelétricas brasileiras. Este projeto se insere no conjunto de projetos desenvolvidos em cooperação com a Coordenação de Pesquisa em Mudanças Globais do Ministério da Ciência e Tecnologia, visando a elaboração do inventário nacional das emissões de gases de efeito estufa.

2 - MATERIAL E MÉTODO

Os reservatórios selecionados para medição

¹ Trabalho desenvolvido no âmbito dos contratos ELETROBRÁS/COPPETEC-UFRJ e PNUD/Fundação José Bonifácio-UFRJ.

² Programa de Planejamento Energético - COPPE-UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 211, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21945-970, tel: (021) 560-8995, fax: (021) 290-6626.

³ Departamento de Meio Ambiente - ELETROBRÁS, Rua da Quitanda, 196, 16º andar, Centro, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 20091-000, tel: (021) 514-5060, fax: (021) 516-4449.

⁴ CRHEA - USP, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, Caixa Postal 292, São Carlos, SP, CEP: 13560-970, tel: (016) 272-9253.

das emissões de gases de efeito estufa são: Miranda e Três Marias (MG), Barra Bonita (SP), Segredo (PR), Xingó (AL,SE,BA), Samuel (RO) e Tucuruí (PA).

Durante 1998 e 1999 tem sido realizadas duas campanhas de campo em cada reservatório. Neste trabalho são apresentados apenas os dados da 1ª campanha.

As emissões de CH₄ e CO₂ foram estimadas sob duas formas: fluxo de bolhas e fluxo de difusão.

2.1 - Fluxo de bolhas

As amostras foram coletadas empregando-se um conjunto de 16 funis coletores de bolhas (cones de napa sintética, com armação de alumínio, diâmetro de 70 cm e acoplados a garrafas coletoras de gases) (Figura 1).



Figura 1 – Funil coletor de bolhas

Os funis foram submersos em um “transect”, partindo de regiões mais rasas até locais mais profundos. Nas regiões mais rasas, eram colocados cerca de 5 funis, diminuindo este número na medida em que se caminhava para áreas mais profundas (Figura 2).



Figura 2 – Grupo de funis colocados em uma região rasa do reservatório de Miranda

A escolha do sítio de amostragem e a seqüência dos funis foram determinadas segundo variáveis como: profundidade, presença de vegetação total ou semi-alagada, tempo de enchimento do local,

compartimentalização do reservatório, representatividade do sítio para o reservatório como um todo etc. O tempo de deslocamento de barco até o local da amostragem também foi considerado como variável de decisão.

Os gases coletados durante um período de 24 horas foram transportados ao laboratório de campo para análise cromatográfica.

2.2 - Fluxo de difusão

As amostras foram coletadas em câmaras de difusão, que visam estimar as trocas de CO₂ e de CH₄ na interface água-ar. O equipamento foi especialmente confeccionado, adaptando-se o equipamento descrito na literatura científica (Lucotte e outros, 1996), especialmente no que concerne a sua miniaturização.

As câmaras têm um volume de cerca de 100 mL, apresentam uma superfície de contato ar-água de 22 cm² e ficaram submersas a cerca de 25 cm de profundidade.

Para o experimento de determinação das taxas de troca, três câmaras de difusão receberam 50 mL de ar que ficaram livremente em contato com a água por 3, 6 e 12 minutos. Após estes tempos, as amostras de ar foram coletadas e transportadas ao laboratório para análise cromatográfica. Uma amostra do ar introduzido nas câmaras, tomado a cerca de 10 cm acima do nível da água, foi analisada para conhecer os níveis iniciais de CO₂ e CH₄ antes da equalização com as concentrações da água.

2.3 - Análise das Amostras

As concentrações de CH₄ foram analisadas por um cromatógrafo com detetor de condutividade térmica (Construmaq modelo U-13) com uma coluna de tamiz molecular 5A ou para as baixas concentrações, por um detetor de ionização de chama na saída de uma coluna de polímero poroso hayesep D (eletrometro Gow-Mac acoplado ao cromatógrafo). As concentrações de CO₂ foram analisadas por um detetor de condutividade térmica com uma coluna hayesep D. Os gases de arraste utilizados foram: ar sintético SS, hidrogênio UP e nitrogênio AP adquiridos da Aga.

3 – ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados obtidos com as primeiras campanhas são preliminares no sentido de poderem sofrer modificação com os resultados das segundas campanhas. Mas as tendências gerais provavelmente não serão afetadas. A Tabela 1 no final do artigo resume as principais características dos reservatórios hidrelétricos estudados.

Os valores extremos de emissão encontrados estão dispostos nas Tabelas 2 e 3 a seguir.

TABELA 2 - Valores Extremos de CH₄ Encontrados nas Análises das Amostras nos Reservatórios Hidrelétricos Estudados

Usina Hidrelétrica	Emissão CH ₄ (Bolhas) mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹		Emissão CH ₄ (Difusão) mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Miranda	0	55	-500	250
Três Marias	0	1.200	-50	240
Barra Bonita	0	22	5	55
Segredo	0	30	0	65
Xingó	0	15	-10	140
Samuel	0	68	0	350
Tucuruí	0	110	-500	2.900

TABELA 3 - Valores Extremos de CO₂ Encontrados nas Análises das Amostras nos Reservatórios Hidrelétricos Estudados

Usina Hidrelétrica	Emissão de CO ₂ (Difusão) mg CO ₂ m ⁻² d ⁻¹	
	Mínimo	Máximo
Miranda	-2.200	1.500
Três Marias	7.000	10.000
Barra Bonita	2.000	33.000
Segredo	-1.000	45.000
Xingó	0	9.000
Samuel	2.000	16.000
Tucuruí	-750	14.000

Os primeiros resultados até agora encontrados nos mostram uma grande variedade nos dados intra e inter-reservatórios. Para as emissões de CH₄, transportadas por bolhas, os valores variam de 0,004 mg/m²/dia no reservatório de Segredo a 41 metros de profundidade e cerca de 1.205 mg/m²/dia no reservatório de Três Marias a 11,5 metros de profundidade.

No caso da repartição interna dos reservatórios estudados, as áreas mais profundas tendem a emitir menos CH₄ por bolhas do que as áreas mais rasas, enquanto que para a emissão de CO₂, por difusão molecular, não verificamos nenhum tipo de dependência semelhante.

Verificamos também que a operação das usinas também influencia a emissão de CH₄. Nos locais em que ocorreu um deplecionamento da cota do lago e ocorreu a rebrota da vegetação, houve a tendência de emitir mais CH₄ do que nas áreas de vegetação antiga.

A presença de forte componente aparentemente aleatório sobreposto às regularidades das medidas sugere que nas próximas campanhas sejam medidas variáveis adicionais que ajudem a explicar a variabilidade. Com esforço adicional relativamente pequeno deverá ser possível medir a

temperatura na água e no ar, o pH, a concentração de oxigênio na água e a velocidade do vento.

O vento não afeta apenas a velocidade de troca por emanação mas influencia também a ebulição, esta de duas maneiras. Primeiro promove a oxigenação das camadas mais profundas tendendo a inibir a metanogênese. Segundo, com a agitação mecânica da água pode apressar liberação de bolhas. Após forte vendaval a ebulição fica reduzida porque a agitação eliminou prematuramente as bolhas quase maduras. Considerando os resultados da medida de ebulição (a) após forte vendaval e (b) após longo período de calmaria se deve concluir que as medidas após a calmaria representam melhor a taxa de liberação espontânea de bolhas enquanto após vendaval é provável que haja sub-estimativa.

De uma forma geral os valores obtidos são compatíveis com as discussões teóricas até então realizadas.

Destaca-se entretanto a presença de CH₄ dissolvido na água da maioria dos reservatórios o que fez aumentar significativamente as emissões de CH₄ por difusão.

Verifica-se que as emissões de CH₄ por difusão são bastante significativas variando de no mínimo -500 mg m⁻² d⁻¹ em Miranda à cerca de 3.000 mg m⁻² d⁻¹ em Tucuruí. O reservatório de Três Marias, o mais antigo da série visitada, se destaca pela maior taxa de liberação ebulitiva de CH₄, de longe ultrapassando os demais. Nele também encontramos grande concentração de CH₄ dissolvido na água (79 ppm). O reservatório de Miranda possuindo concentração de CH₄ dissolvido da mesma ordem de grandeza, de fato ligeiramente maior (87,6 ppm) tem o segundo lugar na liberação ebulitiva de CH₄.

Quanto a emissão de CH₄ por bolhas nos mostram que há uma forte correlação inversa entre a emissão por bolhas e a profundidade. Os valores médios das amostras analisadas nos mostram que a faixa de emissão para os reservatórios estudados variou de 10 a 30 mg de CH₄ m⁻² d⁻¹, excetuando-se o caso de Três Marias que por razões de deplecionamento do reservatório e crescimento de uma vegetação secundária marginal possibilitou a geração de valores de emissão bem mais altos, situados na faixa de 600 a 800 mg de CH₄ m⁻² d⁻¹.

Na liberação por ebulição nota-se certa concordância na profundidade máxima até onde se dá liberação por bolhas, especialmente se for expurgado o valor de 90,7 m de profundidade, o expurgo sendo justificável pela baixíssima ebulição daquele reservatório com conseqüente grande erro de avaliação. Os demais valores dão uma média de 41,7 m. Águas mais fundas que este valor não liberam bolhas.

Dois possíveis explicações para a existência deste valor limite podem ser (a) com a maior profundidade a supersaturação atingida é maior,

dificultando a dessorção do produto CH_4 das enzimas metanogênicas. Outra explicação (b) é mecânica: as enzimas funcionam normalmente mas a maior concentração de CH_4 (atingível antes da formação de bolha) aumenta a velocidade de difusão e esta ao promover aumento da transferência de CH_4 do fundo para camadas superiores assegura então que a concentração crítica para formar bolhas não seja mais atingida.

A emissão de CO_2 por difusão variou pouco intra-espaçialmente em cada reservatório. Encontramos uma certa uniformidade nos valores analisados, excetuando-se os casos de Samuel e de Segredo, onde encontramos uma faixa de variação das emissões muito grande.

A concentração de gás carbônico dissolvido na água variou também dentro de faixa relativamente estreita, indo de 553 (Miranda) a 1.869 (Samuel), teria sido realmente estreita se não tivéssemos achado o valor de 1869 ppm para a represa de Samuel, que aliás distoa não só dos reservatórios brasileiros mas também de lagos em latitudes temperadas que estão mais de acordo com os demais reservatórios da lista.

A seguir são analisadas reservatório hidrelétrico as emissões totais de gases de efeito estufa.

No reservatório de Miranda foram encontrados valores de emissão de CH_4 em bolhas compatíveis com o modelo teórico de decaimento das emissões. A maioria das amostras analisadas revelou forte concentração de valores entre 0 a 50 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, com tendência a encontrar-se valores mais elevados em regiões de pouca profundidade.

No caso da difusão molecular, os valores encontrados para CH_4 situam-se entre 0 e 300 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, não demonstrando dependência com a profundidade. O mesmo fenômeno se repete para o caso do CO_2 em difusão onde, e termos gerais, não encontra-se nenhuma relação entre a emissão e a profundidade.

O reservatório da hidrelétrica de Três Marias apresenta valores médios de emissão de CH_4 por bolhas bem maiores que a hidrelétrica de Miranda. Embora seja um reservatório de 33 anos de idade, as taxas de emissão mais representativas situam-se na faixa de 200 a 600 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, bem acima dos valores encontrados para Miranda.

Conforme comentamos anteriormente, podemos atribuir tal fenômeno, que distoa dos demais, ao esvaziamento de cerca de 11 metros de cota do reservatório, que possibilitou a revegetação de áreas marginais do lago, o que ocasionou um incremento de biomassa, posteriormente alagada pelo enchimento do reservatório.

As emissões por difusão de CH_4 e de CO_2 são da mesma ordem de grandeza do que a da hidrelétrica de Miranda.

Em Barra Bonita, os valores para emissão de CH_4 por bolhas foram um os menores do conjunto de hidrelétricas estudadas, só perdendo para Segredo que foi o lago de menor emissão nesta modalidade. Os resultados médios situam-se numa faixa de 5 a 10 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, caracterizando-a como uma represa no estágio final do processo de geração de gases por decomposição da biomassa afogada.

Curiosamente as emissões de CH_4 por difusão também são menores do que em outros reservatórios estudados. Porém, as emissões de CO_2 por difusão são altas se comparadas com os valores de Miranda e Três Marias. Os valores médios de emissão neste caso situam-se em 1.500 a 3.000 mg de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, bem superiores a média de 300 mg encontradas em Miranda e de 500 mg para o caso de Três Marias.

Em hipótese, o fenômeno da eutroficação antrópica deste lago tenha elevado o conteúdo de matéria orgânica e aumentado os níveis de produção primária e por conseguinte respiração celular de organismos e desta forma elevado as emissões de CO_2 medidas nesta primeira campanha.

Na hidrelétrica de Segredo, situado uma região de clima temperado, as emissões de CH_4 por bolhas foram bem reduzidas. A taxa média situou-se entre 0,5 a 1,5 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Em hipótese poderíamos caracterizá-la como uma represa onde os processos de geração de gases por bolhas estão sendo inibidos por algum outro fator externo, como por exemplo as temperaturas baixas, já que é um reservatório relativamente novo, onde os processos de decomposição da matéria orgânica ainda deveriam estar presentes.

No caso das emissões por difusão, a faixa de variação média situa-se entre 0 a 10 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para o caso do CH_4 , compatível com as emissões de Barra bonita, porém bem abaixo das emissões médias dos reservatórios de Miranda e Três Marias.

Já na emissão de CO_2 verifica-se uma tendência ao sequestro de carbono, via absorção de CO_2 na maioria das amostras estudadas. A maior parte das amostras situou-se entre 0 e $-500 \text{ mg de } \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

No reservatório da hidrelétrica de Xingó encontramos como no caso de Barra Bonita e em Segredo uma emissão de CH_4 transportado por bolhas bem baixa, abaixo das expectativas deste trabalho, pois consiste de um lago recentemente fechado.

A fraca emissão por bolhas pode encontrar explicação no tipo de vegetação afogada, a caatinga, que tem uma densidade muito baixa se comparada aos demais tipos de vegetação encontrados.

Quanto ao transporte por difusão a represa emite CH_4 e CO_2 em maior quantidade. A emanação de CH_4 em sua maioria situa-se entre 10 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a 20 mg de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, porém algumas amostras isoladas chegaram a emanar entre 50 a 140 mg de CH_4

$\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Este padrão de emissão se assemelha ao que foi encontrado em Barra Bonita e em Segredo.

As emissões de CO_2 por difusão encontradas apresentaram pouca dispersão em torno dos valores médios, situando-se na faixa entre 100 a 500 mg de $\text{CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Em Samuel a liberação de CH_4 por bolhas apresentou dois conjuntos de valores bem definidos, a saber: emissões de CH_4 na faixa de 60 a 70 mg de $\text{CH}_4 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ até a profundidade de 5 metros e emissões muito baixas, em torno de 2 mg de $\text{CH}_4 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ nas faixas de profundidade de 10, 15 e 20 metros. O lago de Samuel tem cerca de 10 anos de idade e tais medições estão em acordo com o modelo teórico de geração de gases a partir da decomposição de matéria orgânica, de acordo com a taxa de emissão na medida em que o lago vai envelhecendo.

Nas áreas de baixa profundidade, pode ter havido uma rebrota da vegetação e seu posterior afogamento, visto que o lago sofreu variação de seu nível no ano anterior à medição.

No processo de difusão do CH_4 as emissões situaram-se entre 10 a 25 mg de $\text{CH}_4 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, na faixa de emissões de Barra Bonita e de Segredo.

Para o CO_2 as variações foram bem maiores e a dispersão de resultados foi significativa. Os valores são bem maiores do que aqueles das represas anteriormente analisadas, com uma ampla faixa de valores, variando de 2.000 mg de $\text{CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ a 16.000 mg de $\text{CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Tucuruí não apresentou grandes novidades quanto a emissão por bolhas. Segundo os valores encontrados a emissão concentra-se entre 0,5 a 30 mg de $\text{CH}_4 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com um perfil de emissão parecido com o que foi encontrado em Samuel, bem maiores do que os valores de Xingó e Segredo, porém, bem inferior aos resultados de Três Marias e Miranda.

Quanto à emanação de CH_4 por difusão, Tucuruí apresenta uma variação de valores entre 5 a 30 mg de $\text{CH}_4 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, bem inferior aos resultados encontrados em Samuel, que são da ordem de 10 a 80 mg .

No caso do CO_2 há uma concentração de medidas entre 1.000 a 10.000 mg de $\text{CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, compatível com os resultados encontrados em Samuel, que são da mesma ordem de grandeza dos valores aqui analisados.

Os resultados totais, bem como a extrapolação para o parque hidrelétrico brasileiro serão objeto de uma ponderação dos valores obtidos a partir de uma parametrização dos dados, empregando-se o banco de dados do potencial hidrelétrico brasileiro da ELETROBRÁS.

TABELA 1 - Dados dos reservatórios estudados

Usina	Coleta de amostra	Fechamento da barragem	Término do Enchimento	Idade do Reservatório anos	Latitude/ Longitude	Tipo de Vegetação	Potência MW	Área do Reservatório km ²	Densidade de Potência W/m ²
Três Marias	04/98	01/61		38	18°10'S/ 45°16'W	Cerrado	387	1.040	0,37
Barra Bonita	04/98	06/62	05/63	37	20°31's/ 48°33'W	Mata Atlântica	140	312	0,45
Tucuruí	06/98	09/84	03/85	15	3°45'S/ 49°40'W	Floresta Amazônica	4.245	2.430	1,75
Samuel	06/98	11/88	07/89	10	8°45'S/ 63°28'W	Floresta Amazônica	216	559	0,38
Segredo	05/98	06/92	09/92	7	26°S/ 52°W	Floresta Subtropical	1.260	82	15,30
Xingó	05/98	06/94	06/94	5	9°35'S/ 37°50'W	Caatinga	3.000	60	50,00
Miranda	04/98	03/97	05/97	2	18°55'S/ 40°02'W	Cerrado	390	50	7,70