



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GIA/22
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS- GIA

**A SEDIMENTAÇÃO PERMANENTE DE CARBONO EM RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS
COMO SUMIDOURO DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

Jorge M. Damázio(*) **Marco Aurelio dos Santos** **Alexandre M. Medeiros** **Josiclea P. Rogerio**
CEPEL **COPPE** **CEPEL** **CEPEL**

Juliano L.S. de Abreu **Maria Elvira P. Maceira** **Albert Cordeiro Geber de Melo**
CEPEL **CEPEL** **CEPEL**

RESUMO

A construção e operação de hidrelétrica introduz na correspondente área inundada regime de armazenamento/transporte de massa diferente daquele existente antes do enchimento do reservatório. Quanto às emissões de GEE, as principais diferenças são nos fluxos de GEE entre atmosfera e superfície e nas taxas de sedimentação permanente de carbono. Neste artigo destaca-se a importância das taxas de sedimentação de carbono permanente e o efeito dessa parcela sobre os resultados dos balanços de fluxos de GEE na condição de pós-enchimento para oito aproveitamentos em operação no Brasil obtidos de campanhas de medição feitas entre 2011 e 2013.

PALAVRAS-CHAVE

Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Reservatório, Hidroelétricas

1.0 - INTRODUÇÃO

Com o intuito de avançar na compreensão do balanço de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) em reservatórios de hidrelétricas, a ELETRONORTE conjuntamente com CHESF e FURNAS enviaram à ANEEL em junho de 2009 o projeto de P&D BALCAR em atendimento à Chamada pública 009/2008. Foram estudados oito aproveitamentos hidrelétricos em operação (Balbina, Tucuruí, Xingó, Três Marias, Serra da Mesa, Funil, Segredo e Itaipu) e em três áreas de inundação de aproveitamentos hidrelétricos em construção (Santo Antonio, Belo Monte e Batalha). A figura 1 apresenta a localização de todos os aproveitamentos hidrelétricos estudados, que representam diferentes biomas e regiões geográficas no Brasil. Os aproveitamentos em operação se encontram em uma faixa de idade que varia de 18 a 52 anos, caracterizando-se em significativo estudo temporal, conforme Tabela 1.

Entre 2011 e 2013, o projeto executou em cada aproveitamento estudado 4 campanhas de campo espaçadas em média de 3 meses, de forma a compor um ano hidrológico, sendo uma campanha em período úmido, outra em período seco, e duas em período de transição.



FIGURA 1 – Localização dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados no Projeto Balcar.

Tabela 1 – Características dos Aproveitamentos Hidrelétricos Estudados no Projeto Balcar.

Usina	Bioma	Ano de Enchimento	Potência Instalada (MW)	Área* (km ²)	Volume (km ³)	Afluência Média (m ³ /s)
Batalha	Cerrado	2013	52,5	138	1,8	110
Santo Antonio	Amazônia	2012	3.150	271	2.1	18.224
Belo Monte	Amazônia	2015	11.233	516	4.6	7.804
Balbina	Amazônia	1987	250	2.360	17,5	573
Tucuruí	Amazônia	1985	8.370	3.023	45,5	11.086
Xingó	Caatinga	1994	3.162	60	3,8	2.860
Três Marias	Cerrado	1962	396	1.040	15,28	707
Serra da Mesa	Cerrado	1996	1.275	1.784	54	808
Funil	Mata Atlântica	1969	216	40	8,9	232
Segredo	Mata Atlântica	1992	1.260	81	3	855
Itaipu	Mata Atlântica	1984	14.000	1.350	19	10.058

O planejamento e a execução das campanhas seguiram as recomendações em (1). Foram considerados os balanços de emissões e remoções dos gases CO₂, CH₄ e N₂O. Para os aproveitamentos em operação as campanhas visaram obter medições de fluxos destes gases entre a superfície e atmosfera para cada via de troca: difusão no reservatório e no trecho do rio de jusante, ebulição (CO₂ e CH₄) no reservatório e “degassing” (CO₂ e CH₄) no canal de fuga além das taxas de sedimentação permanente de carbono no reservatório. Conforme recomendado em (1), esta última foi considerada como uma remoção de CO₂. A sedimentação de carbono permanente representa um processo de absorção de espécies químicas de carbono que não estão sujeitas a decomposição biológica. Esse carbono é representado basicamente por compostos húmicos e fúlvicos, com estrutura molecular bastante complexa que são refratários, visto que a biota não consegue digeri-los facilmente. Logo, a determinação destes compostos representa uma parcela que deve ser abatida das emissões pós-enchimento dos reservatórios de hidrelétricas, assumindo, por conseguinte, que o carbono sedimentado provém da absorção de CO₂ da atmosfera.

Os dados obtidos para os balanços de emissões e remoções foram coletados por uma equipe da COPPE/UFRJ. Para estimativas de fluxos de GEE difusivos e ebulitivos na interface água-atmosfera, fez-se medidas pontuais a montante, a jusante e nos lagos, com funis de captação de bolhas e câmaras de difusão. Para estimar as taxas de sedimentação permanente de carbono nos reservatórios a equipe da COPPE fez medidas de taxas de

sedimentação de Si em armadilhas de sedimentação posicionadas em diferentes profundidades da coluna d'água e de concentração de C e Si em testemunhos de sedimentos retirados do fundo dos reservatórios.

No tratamento e análise das medições de fluxos de GEE e taxas de sedimentação permanente provenientes destas campanhas incorporou-se o cálculo de estimativas de emissões líquidas de GEE pela aplicação de descontos levando em consideração os balanços de emissões e remoções de GEE que ocorreriam se o reservatório não existisse. Neste sentido, a emissão líquida em reservatórios hidrelétricos foi definida como a diferença entre o balanço de medições de fluxos de GEE e taxas de sedimentação permanente na condição pós-enchimento (emissões brutas) e estimativas de balanços de fluxos e taxas de sedimentação permanente de GEE na condição pré-enchimento. Neste artigo destaca-se especificamente a importância do desconto da sedimentação de carbono permanente e o efeito desse abatimento sobre os resultados dos balanços de fluxos de GEE na condição de pós-enchimento para os oito aproveitamentos em operação estudados. O item 2 descreve aspectos metodológicos de estimação, o item 3 apresenta os resultados de balanços de fluxos e comenta a parcela da sedimentação permanente de carbono. O item 4 apresenta as conclusões.

2.0 - SEDIMENTAÇÃO PERMANENTE DE CARBONO

Este item descreve as metodologias utilizadas para medir taxas de sedimentação permanente de carbono pontuais no reservatório e estimar a partir de estimativas pontuais valores representativos para o reservatório como um todo. Como exemplo apresenta-se o detalhamento da análise das medições de campo da segunda campanha em Tucuruí e os resultados das taxas representativas das quatro campanhas e valores médios para o conjunto de campanhas. A seguir apresenta-se uma comparação dos valores médios para os conjuntos de campanhas obtidos nos oito reservatórios em operação estudados.

2.1- METODOLOGIA

As medições da sedimentação permanente de carbono foram feitas utilizando-se armadilhas de sedimentação feitas com tubos de PVC com 40 cm de comprimento, 7 cm de diâmetro, e fechados na parte de baixo. No laboratório a água das armadilhas foram filtradas em membrana de papel com tamanho de poro de 0,45 μm . A quantidade de silício no resíduo é medida no cromatógrafo, e seu resultado quando dividida pela área da armadilha e tempo de exposição fornece a taxa de sedimentação de silício ($\text{mg Si m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no ponto da armadilha. As taxas pontuais de sedimentação em silício foram transformadas em taxas de sedimentação de carbono permanente ($\text{mg C m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) multiplicando-as pela razão entre concentrações de C permanente e Si medidas em testemunhos de sedimento coletados no fundo dos reservatórios.

Para calcular taxas de sedimentação permanente representativas para o reservatório como um todo em cada campanha utilizou-se a mediana das estimativas pontuais. As incertezas-padrão das estimativas das taxas representativas de cada campanha foram calculadas através da aplicação do método de *bootstrap* ao conjunto de estimativas pontuais. Para o conjunto de campanhas de cada reservatório, foi calculado um valor médio de taxa de sedimentação permanente e correspondente incerteza-padrão, dada pela raiz quadrada da soma das incertezas-padrão ao quadrado, dividida pelo número de campanhas.

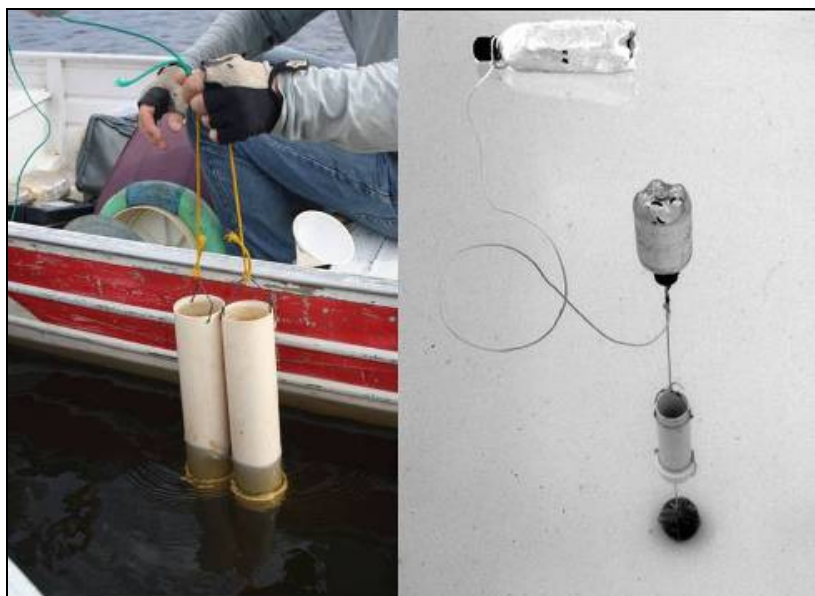


Figura 1- Colocação das armadilhas na água (esquerda). Posição da armadilha dentro da água (direita).

2.2- EXEMPLO - RESERATÓRIO DA UHE TUCURUÍ

Foram realizadas quatro campanhas de campo para o reservatório de Tucuruí nos meses de Julho/2011, Novembro/2011, Janeiro/2012 e Abril/2012. As coletas foram realizadas em diferentes pontos representativos da área do reservatório perfazendo um total de 88 armadilhas que foram obtidas de 23 armadilhas instaladas na 1ª e 2ª campanhas e de 21 armadilhas instaladas na 3ª e 4ª campanhas. Para a razão de concentrações de C permanente e Si foram utilizados 4 testemunhos de sedimento, um para cada campanha. A figura 3 mostra a localização dos pontos de armadilhas e do testemunho de sedimento para a 2ª campanha.

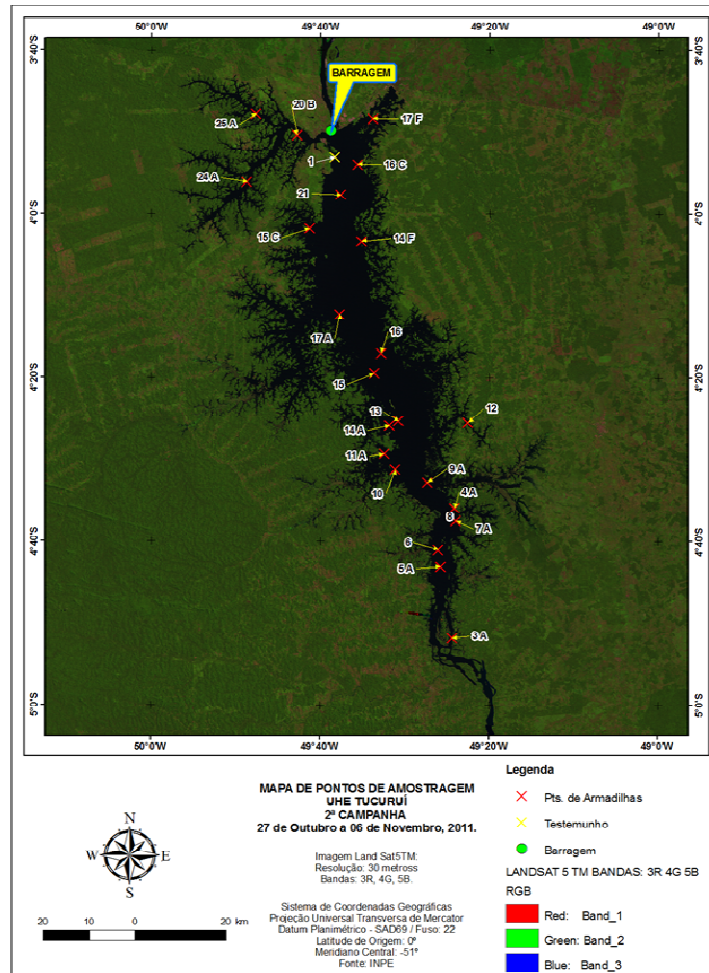


FIGURA 3- Mapa de pontos amostrados para armadilhas de sedimentação da 2ª campanha de campo em Tucuruí.

A tabela 2 apresenta os resultados da análise de carbono e sílica em duas fatias de um testemunho de sedimento da segunda campanha de Tucuruí. A razão de concentrações (0,1959) foi calculada com os resultados das medidas de [C permanente] e [Si], usando a mediana das concentrações das fatias “03-05 cm” e “05-07 cm” obtidas de um testemunho de sedimento tirado no sítio 1 em outubro de 2011.

Tabela 2: Análise de C e Si em fatias de testemunho de sedimento da 2ª Campanha de Tucuruí.

Profundidade (cm)	% C permanente	% Si
3-5	4,75	27,27
5-7	6,36	29,49

A tabela 3 apresenta os resultados das armadilhas de sedimentação da 2ª campanha de campo na UHE Tucuruí. A Tabela 4 apresenta os valores representativos de taxa de sedimentação permanente e incerteza-padrão das quatro campanhas e o valor médio para o conjunto das campanhas com respectiva incerteza-padrão. Pode-se observar na Tabela 4 que o maior valor do fluxo ocorreu durante a primeira campanha (2968,17 mg/m²/dia) e o menor valor ocorreu na terceira campanha com 1008,33 mg/m²/dia. As duas ultimas colunas da tabela 4 apresenta os valores em tCO₂/dia.

2.3- COMPARAÇÃO DE VALORES MÉDIOS DE TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO DE CARBONO PERMANENTE NOS APROVEITAMENTOS EM OPERAÇÃO

A Tabela 5 compara os valores médios de taxas de sedimentação permanente de carbono estimada nos oito aproveitamentos em operação estudados. Não foi possível detectar qualquer padrão de ordenamento para as taxas de sedimentação seja quanto a tamanho do reservatório, latitude ou influência de atividades antrópicas no entorno dos reservatórios. Os maiores valores foram encontrados em Tucuruí e Serra da Mesa e o menor para o aproveitamento de Três Marias. Os outros aproveitamentos apresentaram valores na mesma ordem de grandeza.

Tabela 3- Resultados das armadilhas de sedimentação da 2ª Campanha de Tucuruí

Amostra	Prof. (m)	Colocação		Resgate		Sedimentação de Sílica (mg.m ⁻² .d ⁻¹)	Sedimentação de carbono permanente (mg.C.m ⁻² .d ⁻¹)
		Data	Hora	Data	Hora		
7A	3,2	28/10	14:56	29/10	12:40	9.168	1.796
8	6,0	28/10	10:56	29/10	12:54	7.662	1.501
9A	3,5	28/10	15:12	29/10	13:17	9.456	1.853
10	4,1	28/10	15:34	29/10	13:49	4.940	968
T11A	7,5	29/10	12:20	30/10	12:12	5.481	1.074
12	3,0	29/10	15:58	30/10	13:00	3.668	719
13	17,5	29/10	14:50	30/10	11:28	7.427	1.455
14A	3,1	29/10	15:06	30/10	11:45	1.138	223
14F	14,8	01/11	12:48	02/11	10:09	3.510	688
15	9,6	30/10	9:40	01/11	12:50	2.575	504
15C	23,0	01/11	12:20	02/11	10:49	775	152
16	8,5	30/10	9:57	01/11	13:12	4.855	951
16C	7,0	01/11	13:30	02/11	12:17	1.355	265
17A	6,0	30/10	10:33	01/11	11:59	1.411	276
T17F	14,0	01/11	14:00	02/11	13:02	2.084	408
20B	9,5	01/11	14:40	02/11	13:54	756	148
21	15,0	01/11	14:56	02/11	11:47	762	149
24A	7,4	02/11	14:49	03/11	9:07	1.074	210
25A	8,8	02/11	15:37	03/11	10:59	1.063	208

Tabela 4– Taxas de Sedimentação de Carbono Permanente UHE Tucuruí.

Campanha	Taxa (mg/m ² /dia)	Incerteza Padrão	Fluxo (tCO ₂ /dia)	Incerteza Padrão
1	2968,17	±500,05	8429,16	±1420,07
2	1848,00	±225,47	2617,78	±319,39
3	1008,33	±60,72	2603,46	±156,77
4	1912,17	±212,23	5781,34	±641,65
Média	1934,17	±147,82	4857,93	±399,60

Tabela 5 – Taxas de Sedimentação Permanente de Carbono nos oito aproveitamentos em mg/m²/dia

Tucuruí	S. da Mesa	Balbina	Itaipu	Três Marias	Segredo	Xingó	Funil
1.934 ± 148	1.631 ± 201	890 ± 20	798 ± 58	529 ± 42	1.029 ± 56	1.020 ± 87	975,33 ± 115

3.0 - BALANÇOS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GEE

A tabela 6 apresenta as estimativas de emissões e remoções de GEE realizadas nos oito reservatórios em operação e suas respectivas incerteza-padrão. O balanço de emissões e remoções calculado para cada reservatório inclui estimativas de: (i) fluxo ebulitivo no reservatório; (ii) fluxo difusivo no reservatório; (iii) fluxo difusivo no rio imediatamente a jusante da barragem; (iv) degassing; e (v) sedimentação permanente de carbono.

No reservatório de Balbina, o desconto da sedimentação permanente de carbono corresponde a 43% da soma das emissões de CO₂ dos outros processos considerados (fluxos ebulitivo no reservatório, fluxo difusivo no reservatório, fluxo difusivo à jusante e degassing). Percentuais maiores foram encontrados em Tucuruí (61%), Três Marias (64%), Itaipu (78%) e Serra da Mesa (91%). Em Segredo o desconto da sedimentação permanente de carbono excede a soma das emissões de CO₂ em 31% e em Funil 37%. Em Xingó a captura da sedimentação permanente de carbono excede 2,7 vezes a soma das emissões de CO₂ por fluxo ebulitivo a montante, por fluxo difusivo a jusante e degassing. Os resultados mostram a importância do processo de sedimentação de carbono permanente nos reservatórios para os balanços de emissões e remoções de gases de efeito estufa.

A figura 4 apresenta os valores de intensidade de GEE de cada um dos aproveitamentos obtidos dividindo-se o balanço de emissões e remoções pela energia assegurada e os valores válidos para geração térmica.

Tabela 6 – Balanço de emissões e remoções de CO₂, CH₄ e N₂O em CO₂eq/dia

	Gas	Balbina	Funil	Itaipu	Segredo	S. da Mesa	Três Marias	Tucuruí	Xingó
Fluxo ebulitivo no reservatório (tCO₂/dia)	CH ₄	292,29 ± 143,54	0,68 ± 3,14	29,48 ± 52,29	1,51 ± 6,96	141,99 ± 81,09	6,87 ± 1,57	774,32 ± 245,84	12,34 ± 9,32
	CO ₂	0,17 ± 0,06	0,00 ± 0,00	0,06 ± 0,03	0,00 ± 0,00	0,14 ± 0,07	0,05 ± 0,01	1,01 ± 0,29	0,01 ± 0,00
Fluxo difusivo no reservatório (tCO₂/dia)	CH ₄	713,72 ± 157,55	3,65 ± 0,21	99,73 ± 3,10	5,02 ± 0,40	239,70 ± 15,34	163,48 ± 14,84	451,11 ± 58,12	8,47 ± 0,48
	CO ₂	4.683,05 ± 704,22	16,15 ± 4,19	1.323,38 ± 146,99	40,14 ± 25,32	2.507,73 ± 187,23	601,16 ± 249,10	7.661,78 ± 733,09	-20,18 ± 8,73
	N ₂ O	223,81 ± 15,09	9,62 ± 0,75	213,13 ± 14,98	19,78 ± 1,49	295,99 ± 32,86	105,89 ± 13,35	390,75 ± 25,28	9,14 ± 0,40
Fluxo difusivo a jusante da barragem (tCO₂/dia)	CH ₄	372,03 ± 63,38	0,10 ± 0,03	1,07 ± 0,06	19,14 ± 0,06	88,73 ± 27,34	1,16 ± 0,13	40,29 ± 18,30	0,45 ± 0,05
	CO ₂	49,63 ± 3,11	2,36 ± 0,67	15,21 ± 7,30	1,07 ± 0,17	29,80 ± 4,01	57,93 ± 7,32	307,71 ± 20,87	11,72 ± 1,00
	N ₂ O	4,31 ± 0,44	0,17 ± 0,02	0,56 ± 0,84	0,07 ± 0,02	1,37 ± 0,17	2,10 ± 0,42	12,42 ± 2,49	0,69 ± 0,13
Degassing (tCO₂/dia)	CH ₄	1.312,09 ± 323,25	0,08 ± 0,19	0,34 ± 0,14	0,15 ± 0,04	117,88 ± 25,04	0,05 ± 0,02	2,98 ± 2,18	0,15 ± 0,04
	CO ₂	66,10 ± 7,92	2,91 ± 0,43	25,17 ± 14,71	20,39 ± 6,98	39,34 ± 9,07	18,68 ± 3,36	55,00 ± 13,30	10,61 ± 3,08
Sedimentação Permanente de Carbono (tCO₂/dia)	CO ₂	-2.044,84 ± 47,27	-29,38 ± 3,59	-1.063,03 ± 78,46	-80,41 ± 4,31	-2.350,76 ± 279,84	-435,56 ± 32,82	-4.857,93 ± 399,60	-61,22 ± 5,24
Balanço por Gas (tCO₂/dia)	CH ₄	2.690,13 ± 392,35	4,51 ± 3,16	130,63 ± 52,39	25,81 ± 6,98	588,30 ± 90,48	171,57 ± 14,93	1.268,70 ± 253,29	21,41 ± 9,33
	CO ₂	2.754,11 ± 705,85	-7,96 ± 5,58	300,80 ± 167,43	-18,80 ± 26,61	226,25 ± 336,85	242,26 ± 251,39	3.167,56 ± 835,29	-59,05 ± 10,68
	N ₂ O	228,11 ± 15,10	9,79 ± 0,75	213,69 ± 15,00	19,85 ± 1,49	297,37 ± 32,86	107,99 ± 13,35	403,17 ± 25,40	9,83 ± 0,42

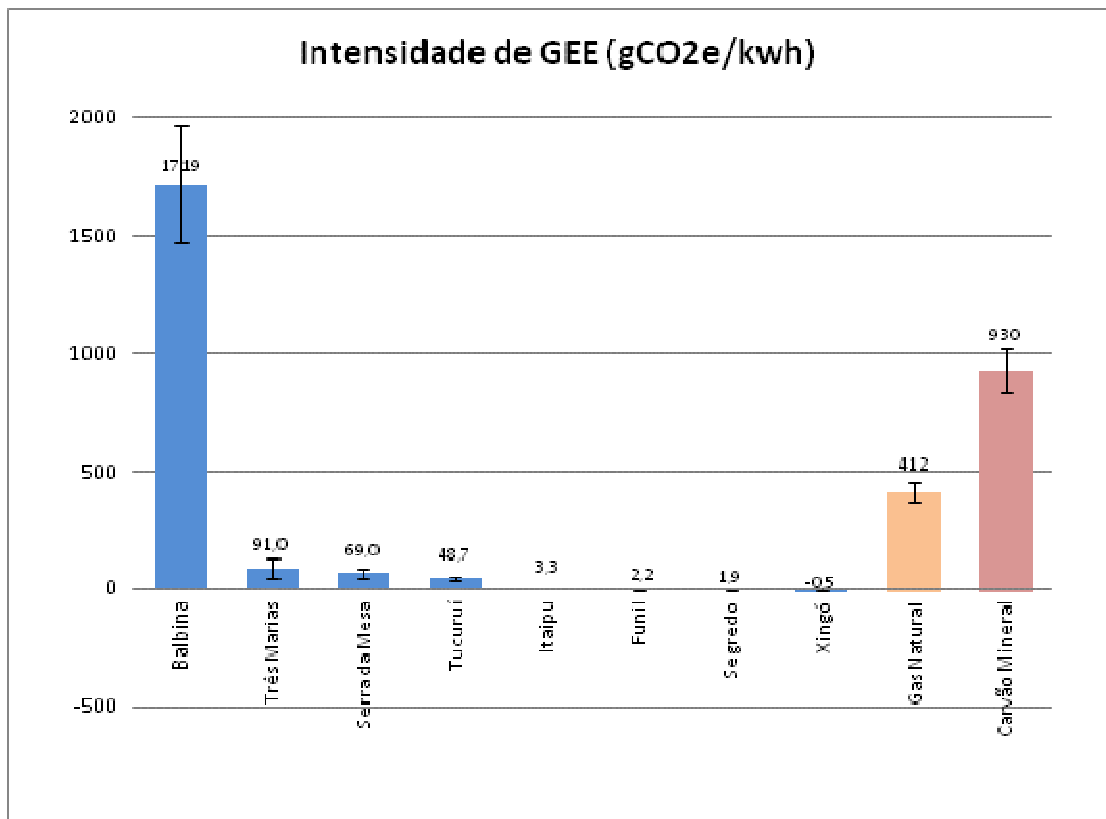


FIGURA 4- Comparação de Intensidades de Emissões de GEE pós-enchimento de cada UHE e valores de geração térmica

4.0 - CONCLUSÃO

O balanço de emissões e remoções de gases de efeito estufa de usinas hidroelétricas tem dado motivo a controvérsias. O projeto de P&D BALCAR visou contribuir para melhor entendimento dos fenômenos associados. Planejou-se a execução de 44 campanhas de campo para coletar e analisar dados sobre fluxos de gases de efeito estufa em 8 usinas hidroelétricas em operação distribuídas ao longo dos ecossistemas Brasileiros. Adicionalmente foram feitas medições em 3 usinas em construção coletando dados para o futuro cálculo de emissões líquidas. Os resultados obtidos no projeto representam um substancial avanço no estado da arte sobre o tema. Em particular foi verificada a importância da consideração da sedimentação permanente de carbono no balanço de fluxos de GEE de usinas hidroelétricas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Brasil, Ministério de Minas e Energia. "Diretrizes para Análises Quantitativas de Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios". Volume 1 – Programas de Medição e Análises de Dados, Rio de Janeiro, 2012

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Jorge Machado Damazio é graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutor em Engenharia Civil pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. É pesquisador do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 1977. É professor do Instituto de Matemática da Universidade Estadual do Rio de Janeiro desde 2000.

Agradecimentos: Este estudo é parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor de Energia Elétrica regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Os autores agradecem à Centrais Elétricas do Norte do Brasil, Furnas Centrais Elétricas S. A., Companhia Hidroelétrica do São Francisco e ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica pelo suporte financeiro.