

**PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES  
ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

**RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA**

**EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO E DE METANO PELOS  
RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS BRASILEIROS**

**Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e  
Pesquisa em Engenharia  
COPPE**



*Ministério da Ciência e Tecnologia*  
**2002**

**PRESIDENTE DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**  
*FERNANDO HENRIQUE CARDOSO*

**MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
*RONALDO MOTA SARDENBERG*

**SECRETÁRIO DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
*LUIZ GYLVAN MEIRA FILHO*

**SECRETÁRIA ADJUNTA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
*THELMA KRUG*

## **EXECUÇÃO**

**COORDENADOR GERAL DE MUDANÇAS GLOBAIS**  
*JOSÉ DOMINGOS GONZALEZ MIGUEZ*

**COORDENADOR TÉCNICO DO INVENTÁRIO**  
*NEWTON PACIORNIK*

## **IMPRESSÃO**

*INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA*

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

Expressamos nossa mais profunda gratidão ao Prof. José Israel Vargas, Ministro de Estado da Ciência e Tecnologia, de 1992 a 1999, por compartilhar conosco seus conhecimentos e suas idéias sobre as questões da mudança do clima e por sua incessante orientação e seu constante incentivo. Estendemos nosso agradecimento ao Prof. Luiz Carlos Bresser Pereira, Ministro da Ciência e Tecnologia de janeiro a julho de 1999.

Agradecemos, ainda, à equipe do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, na pessoa do seu presidente, Sérgio Besserman Viana, pelo apoio na impressão desta publicação.

# **PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

## **RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA**

### **EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO E DE METANO PELOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS BRASILEIROS**

**Elaborado por:**

**Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE**

**Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais - IVIG**  
Cidade Universitária - Centro de Tecnologia - Bloco I-2000 Sala 129 - Ilha do Fundão  
21945-970 - Rio de Janeiro - RJ

**Programa de Planejamento Energético da COPPE - PPE**  
Cidade Universitária - Centro de Tecnologia - Bloco G Sala 101 - Ilha do Fundão  
Caixa Postal 68513 - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ

**Equipe responsável:**

*Coordenador*  
Prof. Luiz Pinguelli Rosa

*Pesquisadores*  
Prof. Bohdan Matvienko Sikar  
Dr. Marco Aurélio dos Santos  
B.Sc. Elizabeth Matvienko Sikar

*Revisão*  
Prof. Adilson Elias Xavier  
M.Sc. Ednaldo Oliveira dos Santos

*Acompanhamento Técnico da Eletrobrás nos Experimentos de Campo e na Revisão do Relatório*  
Carlos Frederico Menezes  
Ronaldo Sérgio M. Lourenço

***Ministério da Ciência e Tecnologia***  
**2002**

## **Publicação do Ministério da Ciência e Tecnologia**

*Para obter cópias adicionais deste documento ou maiores informações, entre em contato com:*

### **Ministério da Ciência e Tecnologia Secretaria de Políticas e Programas de Ciência e Tecnologia Departamento de Programas Temáticos Coordenação Geral de Mudanças Globais**

Esplanada dos Ministérios Bloco E 2º Andar Sala 244  
70067-900 - Brasília - DF  
Telefone: 61-317-7923 e 317-7523  
Fax: 61-317-7657  
e-mail: [cpmg@mct.gov.br](mailto:cpmg@mct.gov.br)  
<http://www.mct.gov.br/clima>

#### **Revisão:**

Mauro Meirelles de Oliveira Santos  
Newton Paciornik  
Ricardo Leonardo Vianna Rodrigues

#### **Revisão de Editoração:**

Mara Lorena Maia Fares  
Anexandra de Ávila Ribeiro

A realização deste trabalho só foi possível com o apoio financeiro e administrativo do:

#### ***Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS***

Escritório Central  
Avenida Presidente Vargas, 409, 13º Andar - Centro  
CEP.: 20071-003 - Rio de Janeiro - RJ  
Caixa Postal 1639  
Tel.: 21-2514-5151  
Fax.: 21-2507-8487  
<http://www.eletronbras.gov.br>

#### ***Fundo Global para o Meio Ambiente - GEF***

#### ***Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD***

*Projeto BRA/95/G31*

SCN Quadra 02 Bloco A - Ed. Corporate Center 7º Andar  
70712-901 - Brasília - DF  
Telefone: 61-329-2000  
Fax: 61-329-2099  
e-mail: [registry@undp.org.br](mailto:registry@undp.org.br)  
<http://www.undp.org.br>

#### ***U.S. Country Studies Program***

PO-2, Room GP-196  
1000 Independence Avenue, SW  
Washington, D.C. 20585 USA  
Telefone: 1-202-426-1628  
Fax: 1-202-426-1540/1551  
e-mail: [csmt@igc.apc.org](mailto:csmt@igc.apc.org)  
<http://www.gcric.org/CSP/webpage.html>

Agradecemos à ELETROBRÁS, nas pessoas do Dr. Luciano Nobre Varella, Chefe do Departamento de Engenharia e Meio Ambiente e do Dr. Rogério Neves Mundim, Chefe da Divisão de Meio Ambiente. Agradecemos à equipe administrativa do GEF, do PNUD e do U.S. Country Studies Program e, em particular, a algumas pessoas muito especiais sem as quais a realização deste trabalho não teria sido possível: Emma Torres, Richard Hosier e Vesa Rutanen, todos do PNUD/Nova York; Cristina Montenegro, do PNUD/Brasil, de 1985 a 1999, por seu apoio e incentivo em todos os momentos; e Jack Fitzgerald e Robert K. Dixon, do U.S. Country Studies Program, que propiciaram o

encaminhamento do programa. A todas essas pessoas, por sua liderança neste processo, nosso mais sincero agradecimento.

### **AGRADECIMENTOS DA EQUIPE DA COPPE/UF RJ**

Agradecimentos especiais ao corpo técnico das empresas que nos forneceram as condições ideais para a realização do trabalho de campo: à CHESF – Ronaldo Jucá e Rosa Lúcia Lima Reis; à CEMIG – Maria Edith Rolla, Francisco Antônio Chagas Pinto, Nasser José Bhering Nasser, Affonso Pelli, Sonia Maria Ramos e Antonio Trindade; à CODEVASF – Marcelo José de Melo e Edson Vieira Sampaio; à COPEL – Luiz Carlos de Freitas, Luiz Augusto Marques Ludwig e Geraldo Arnaldo Stumm; à ELETRONORTE – Andrea Figueiredo, José Carlos Castro, Wilze Fray Casanova, Solange C. Nascimento, José Baia Amaral, José Elias Rosa e Roberto Keidi Miyai. Agradecimentos a Furnas Centrais Elétricas e a Serra da Mesa Energia, pela liberação dos dados referentes ao estudo da hidrelétrica de Serra da Mesa. Agradecimentos a Itaipu Binacional, pela liberação dos dados referentes ao estudo da hidrelétrica de Itaipu. Agradecimentos à ELETROBRÁS, nas pessoas do Dr. Luciano Nobre Varela e do Dr. Rogério Neves Mundim, e à equipe do Ministério da Ciência e Tecnologia, especialmente Mauro Meirelles de Oliveira Santos, Newton Paciornik e José Domingos Gonzalez Miguez, pelo apoio financeiro e técnico a este projeto.

# Índice

## Página

Prefácio	11
Introdução	12
Sumário Executivo	14
1 Introdução	17
2 Caracterização dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados	18
2.1 Reservatório de Miranda	20
2.2 Reservatório de Três Marias	20
2.3 Reservatório de Barra Bonita	21
2.4 Reservatório de Segredo	21
2.5 Reservatório de Xingó	22
2.6 Reservatório de Samuel	23
2.7 Reservatório de Tucuruí	24
3 Descrição dos Trabalhos e da Metodologia de Medição Empregada	26
4 Emissões de Gases de Efeito Estufa dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados	28
4.1 Ciclo do carbono	29
4.2 Resultados das emissões dos reservatórios por faixa de profundidade	30
4.2.1 Resultados da primeira campanha	31
4.2.2 Resultados da segunda campanha	38
4.3 Descrição da extrapolação dos dados de análise para o reservatório	50
4.3.1 O problema da relação Cota x Área dos reservatórios	52
4.3.2 O problema da extrapolação de dados pontuais para todo o reservatório	57
4.4 Resumo das campanhas e cálculo das médias das emissões por reservatório	60
5 Comparação das Emissões de Hidrelétricas e Termelétricas Equivalentes	62
6 Comentários Finais	70
7 Referências Bibliográficas	73
Anexo A – Trabalhos anteriores sobre emissão de gases de efeito estufa em reservatórios	78
Anexo B – Medições em reservatórios e em lagos naturais pelo mundo	83
Anexo C – Descrição do método de trabalho	89
Anexo D – Descrição dos processos de emissão de gases	112

## Lista de Figuras

	<b>Página</b>
FIGURA 1 – Localização das hidrelétricas estudadas e referenciadas	19
FIGURA 2 – Síntese preliminar do ciclo de carbono da floresta tropical na Amazônia	30
FIGURA 3 – Porção do reservatório mostrada como corte, exibindo faixa de área $DA$ , parte do perímetro $p$ , largura $s$ da faixa, e incremento de altura $Dh$	53
FIGURA 4 – Representação geométrica do reservatório	54

## Lista de Gráficos

	<b>Página</b>
GRÁFICO 1 – Emissão média de carbono no $CH_4$ derivada de bolhas em reservatórios hidrelétricos brasileiros	67
GRÁFICO 2 – Emissão média de carbono no $CO_2$ derivada de bolhas em sete reservatórios hidrelétricos brasileiros	67
GRÁFICO 3 – Emissão média de carbono no $CH_4$ derivada de difusão em sete reservatórios hidrelétricos brasileiros	69
GRÁFICO 4 – Emissão média de carbono no $CO_2$ derivada de difusão em sete reservatórios hidrelétricos brasileiros	69

## Lista de Tabelas

### Página

TABELA 1 – Sinopse da caracterização dos reservatórios hidrelétricos estudados e referenciados	19
TABELA 2 – Dados de fitomassa por tipo de floresta na área da hidrelétrica de Samuel	23
TABELA 3 – Resultados de inventário de fitomassa nas quadras 1 e 2 (hidrelétrica de Samuel)	24
TABELA 4 – Biomassa seca na área do reservatório de Tucuruí	25
TABELA 5 – Hidrelétrica de Miranda - valores médios de liberação de gases por bolhas	31
TABELA 6 – Hidrelétrica de Miranda - medidas com câmaras de difusão	31
TABELA 7 – Hidrelétrica de Três Marias - valores médios de liberação de gases por bolhas	32
TABELA 8 – Hidrelétrica de Três Marias - medidas com câmaras de difusão	32
TABELA 9 – Hidrelétrica de Barra Bonita - valores médios de liberação de gases por bolhas	33
TABELA 10 – Hidrelétrica de Barra Bonita - medidas com câmaras de difusão	33
TABELA 11 – Hidrelétrica de Xingó - valores médios de liberação de gases por bolhas	34
TABELA 12 – Hidrelétrica de Xingó - medidas com câmaras de difusão	34
TABELA 13 – Hidrelétrica de Segredo - valores médios de liberação de gases por bolhas	35
TABELA 14 – Hidrelétrica de Segredo - medidas com câmaras de difusão	35
TABELA 15 – Hidrelétrica de Samuel - valores médios de liberação de gases por bolhas	36
TABELA 16 – Hidrelétrica de Samuel - medidas com câmaras de difusão	36
TABELA 17 – Hidrelétrica de Tucuruí - valores médios de liberação de gases por bolhas	37
TABELA 18 – Hidrelétrica de Tucuruí - medidas com câmaras de difusão	37
TABELA 19 – Hidrelétrica de Miranda - valores médios de liberação de gases por bolhas	38
TABELA 20 – Hidrelétrica de Miranda - medidas com câmaras de difusão	39
TABELA 21 – Hidrelétrica de Três Marias - valores médios de liberação de gases por bolhas	40
TABELA 22 – Hidrelétrica de Três Marias - medidas com câmaras de difusão	41
TABELA 23 – Hidrelétrica de Barra Bonita - valores médios de liberação de gases por bolhas	42
TABELA 24 – Hidrelétrica de Barra Bonita - medidas com câmaras de difusão	43
TABELA 25 – Hidrelétrica de Segredo - valores médios de liberação de gases por bolhas	44
TABELA 26 – Hidrelétrica de Segredo - medidas com câmaras de difusão	45
TABELA 27 – Hidrelétrica de Xingó - valores médios de liberação de gases por bolhas	46

TABELA 28 – Hidrelétrica de Xingó - medidas com câmaras de difusão	47
TABELA 29 – Hidrelétrica de Samuel - valores médios de liberação de gases por bolhas	48
TABELA 30 – Hidrelétrica de Samuel - medidas com câmaras de difusão	48
TABELA 31 – Resumo das medidas com a câmara grande (17,05 L)	48
TABELA 32 – Hidrelétrica de Tucuruí - valores médios de liberação de gases por bolhas	49
TABELA 33 – Hidrelétrica de Tucuruí - medidas com câmaras de difusão	49
TABELA 34 – Resumo das medidas com a câmara grande (17,05 L) termostatzada	49
TABELA 35 – Inclinação das margens de alguns reservatórios.	53
TABELA 36 – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Miranda	55
TABELA 37 – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Três Marias	55
TABELA 38 – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Barra Bonita	56
TABELA 39 – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Tucuruí	56
TABELA 40 – Parâmetros empregados na extrapolação das emissões de CH <sub>4</sub> por bolhas	57
TABELA 41 – Investigação para a extrapolação das emissões de CH <sub>4</sub> por difusão usando faixas de profundidade	58
TABELA 42 – Parâmetros empregados na extrapolação das emissões de CO <sub>2</sub> por difusão	59
TABELA 43 – Resultados da primeira campanha de medições de gases de efeito estufa de sete reservatórios hidrelétricos	60
TABELA 44 – Resultados da segunda campanha de medições de gases de efeito estufa de sete reservatórios hidrelétricos	61
TABELA 45 – Média dos resultados das campanhas de medições de gases de efeito estufa de sete reservatórios hidrelétricos	61
TABELA 46 – Dados para cálculo das termelétricas	63
TABELA 47 – Eficiências das diversas tecnologias utilizadas nas termelétricas	63
TABELA 48 – Comparação das emissões das hidrelétricas com as de suas termelétricas equivalentes	65



## Prefácio

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima entrou em vigor no Brasil em 1994, após ratificação pelo Congresso Nacional. Nos termos da Convenção, os países assumem, entre outros, o compromisso de desenvolver e atualizar, periodicamente, inventários nacionais das emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros dos gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, além de fornecer uma descrição geral das providências para implementar a Convenção. A série de relatórios setoriais, aqui apresentada, abrange os trabalhos que serviram de base para a elaboração do primeiro inventário brasileiro de gases de efeito estufa, referente ao período 1990-1994.

Para que o Brasil atendesse seus compromissos internacionais nesse campo, foi estabelecido, sob a coordenação do Ministério da Ciência e Tecnologia, um quadro institucional, na forma de um Programa, que também envolveu, para a elaboração dos relatórios setoriais, especialistas externos e instituições com reconhecida capacidade em cada área específica. Aos coordenadores setoriais coube a tarefa de envolver instituições e especialistas nas áreas definidas, para coleta e organização de dados, informações e bibliografia. As atividades foram desenvolvidas de maneira descentralizada, dada sua natureza multidisciplinar, envolvendo cerca de uma centena de instituições e quinhentos especialistas dos setores energético, industrial, florestal, agropecuário e de tratamento de resíduos. Os trabalhos, em muitos casos, envolveram a estimativa de indicadores e coleta de informações que não estão disponíveis na literatura científica nacional e, em alguns casos, informações privadas de empresas nacionais.

A metodologia adotada pela Convenção foi desenvolvida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC, em conjunto com a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômicos - OCDE e a Agência Internacional de Energia - IEA, com o objetivo de permitir o cálculo e a apresentação das emissões antrópicas líquidas nacionais de gases de efeito estufa e encorajar sua disseminação entre os países participantes do IPCC e Partes da Convenção.

Algumas características importantes merecem ser ressaltadas. Em primeiro lugar, as emissões representam estimativas feitas em *bona fide*, ou seja, visam minimizar as incertezas e não criar viés infundado. Buscou-se a melhor estimativa possível, levando em consideração o atual estágio do conhecimento científico e a disponibilidade de recursos humanos e financeiros. Nem sempre as estatísticas existentes no País permitem a adequada avaliação das emissões e, de modo geral, em determinados setores onde não existe informação, métodos específicos foram desenvolvidos para avaliação do nível de atividade.

Adicionalmente, a coordenação do MCT, mediante a revisão detalhada dos resultados, orientou-se na busca do controle da qualidade, da confiabilidade e da transparência das informações contidas nos relatórios setoriais, disponíveis a qualquer interessado no endereço eletrônico [www.mct.gov.br/clima](http://www.mct.gov.br/clima). São encorajados comentários e sugestões que possam aprimorar o conteúdo dos relatórios, que resultarão no documento final a ser apresentado à Convenção.

Cumprе ressaltar que esta série de relatórios representa um pequeno passo na compreensão dos diferentes processos de emissões de gases de efeito estufa por atividades antrópicas no País, mas representa um grande avanço para o Brasil. O enfoque baseado na idéia de um processo de melhorias contínuas e graduais permitiu o êxito, alcançado em apenas cinco anos, no esforço de coordenação das atividades nos diferentes setores nacionais, a participação abrangente de instituições e especialistas e a capacitação e conscientização da sociedade nas questões da mudança do clima.

Esse esforço permitiu e continuará a garantir o papel de relevo do Brasil nas negociações internacionais sobre mudança do clima, ao qual se soma, do ponto de vista interno, a recente ratificação do Protocolo de Quioto pelo Brasil. Mais do que isso, boa parte desse esforço terá sido empreendida não apenas em cumprimento a disposições de uma convenção internacional, mas em proveito do País e da sociedade brasileira.

Embaixador Ronaldo Mota Sardenberg  
Ministro de Estado da Ciência e Tecnologia  
Brasília, junho de 2002

## Introdução

A questão do aquecimento global, difícil de ser compreendida por sua complexidade científica e a existência de poucos especialistas neste tema no Brasil, geralmente envolvidos com projetos considerados mais prioritários, tornam a elaboração do inventário brasileiro de emissões de gases de efeito estufa um esforço complexo e pioneiro.

Há, além dessas dificuldades, a falta de material disponível em português sobre o assunto, a falta de conhecimento sobre as obrigações brasileiras no âmbito da Convenção, a falta de recursos para estudos mais abrangentes e dúvidas sobre os benefícios que adviriam para as instituições envolvidas nesse processo.

Outra dificuldade encontrada é o fato de a mudança do clima não ser um tema prioritário nos países em desenvolvimento, cujas prioridades referem-se ao atendimento de necessidades urgentes, nas áreas social e econômica, tais como a erradicação da pobreza, a melhoria das condições de saúde, o combate à fome, a garantia de condições dignas de moradia, entre outras. Neste sentido, os países em desenvolvimento, como o Brasil, confrontam-se com padrões do século 21, antes mesmo de haverem superado os problemas do século 19. O Brasil, entretanto, é um país em desenvolvimento que possui uma economia muito complexa e dinâmica. É o quinto país mais populoso e de maior extensão do mundo, oitava economia mundial, grande produtor agrícola e um dos maiores produtores mundiais de vários produtos manufaturados, incluindo cimento, alumínio, produtos químicos, insumos petroquímicos e petróleo.

Em comparação com os países desenvolvidos, o Brasil não é um grande emissor no setor energético. Isso se deve ao fato de ser o Brasil um país tropical, com invernos moderados e por mais de 60% de sua matriz energética ser suprida por fontes renováveis. Mais de 95% da eletricidade brasileira é gerada por usinas hidrelétricas e há uma ampla utilização de biomassa (utilização de álcool nos veículos, uso do bagaço da cana-de-açúcar para a geração de vapor, uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica, etc.). Além disso, programas de conservação de energia têm buscado, desde meados da década de 80, melhorar ainda mais a produção de energia e os padrões de consumo no Brasil.

Para que o Brasil cumprisse as obrigações assumidas no âmbito da Convenção, foi estabelecido um quadro institucional na forma de um Programa, sob a coordenação do Ministério da Ciência e Tecnologia, com recursos financeiros aportados pelo PNUD/GEF e apoio adicional do governo norte-americano. Buscou-se, durante a elaboração do inventário, por sua abrangência e especificidade, envolver diversos setores geradores de informação e a participação de especialistas de diversos ministérios, instituições federais, estaduais, associações de classe da indústria, empresas públicas e privadas, organizações não-governamentais, universidades e centros de pesquisas.

Por sua própria origem, a metodologia do IPCC adotada pela Convenção tem, como referência, pesquisas realizadas e metodologias elaboradas por especialistas de países desenvolvidos, onde as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis representam a maior parte das emissões. Em consequência, setores importantes para os países em desenvolvimento, como a agricultura e a mudança no uso da terra e florestas, não são tratados com a profundidade necessária. Portanto, os fatores de emissão *default* ou até mesmo a própria metodologia devem ser analisados com a devida cautela, uma vez que não refletem, necessariamente, as realidades nacionais. Em muitos casos, não há pesquisa no Brasil que permita avaliar os valores apresentados ou a própria metodologia proposta. Onde existem pesquisas foram encontrados, em alguns casos, valores significativamente discrepantes. A avaliação de emissões decorrentes do uso intensivo de biomassa no Brasil também não encontra apoio na metodologia, muito embora tais emissões, dado o caráter renovável da biomassa, não sejam contabilizadas nos totais nacionais.

A aplicação da metodologia do IPCC pelos países em desenvolvimento impõe a esses países um ajuste a um sistema para cuja elaboração pouco contribuíram. De qualquer modo, durante sua aplicação, não abdicamos do dever de exercer alguma influência, ainda que modesta, por exemplo, em relação à mudança de uso da terra e florestas. Deve-se levar em conta que o Brasil é um dos países que têm melhores e mais abrangentes sistemas de monitoramento permanente deste setor. Estudos pioneiros foram realizados em relação às emissões de gases de efeito estufa pela conversão de florestas em terras para uso agrícola, pelos reservatórios de hidrelétricas e por queimadas prescritas do cerrado. Cuidado deve ser tomado, também, ao se comparar os resultados totais de emissões por tipo de gás de efeito estufa. Diferenças metodológicas com outros inventários internacionais de emissões de gases de efeito estufa, em especial com alguns países desenvolvidos

que não relatam adequadamente suas emissões, como, por exemplo, no caso de mudanças no uso da terra e florestas, impedem a simples comparação dos resultados.

No Brasil, a busca e coleta de informação não são adequadas por causa do custo de obtenção e armazenamento de dados e há pouca preocupação institucional com a organização ou fornecimento de informação, principalmente em nível local. Há, ainda, carência de legislação que obrigue as empresas a fornecer informações, em especial no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, muitas vezes, medições não se justificam para o inventário de emissões de gases de efeito estufa por si só, devido ao custo relativamente alto da medição, quando comparado a qualquer melhoria da precisão da estimativa.

Deve-se ter em conta que a elaboração de um inventário nacional é um empreendimento intensivo em recursos. Há que se estabelecer prioridades para realizar estudos e pesquisas de emissões nos setores e gases de efeito estufa principais, uma vez que a metodologia das estimativas e a qualidade dos dados podem melhorar com o tempo. Em virtude deste fato, os relatórios setoriais baseiam-se, normalmente, em trabalhos previamente feitos por diversas instituições nacionais.

Finalmente, é preciso lembrar que ao mesmo tempo que a avaliação das emissões anuais por cada um dos países é importante para o dimensionamento das emissões globais e para a compreensão da evolução futura do problema das mudanças climáticas, as emissões anuais de gases de efeito estufa não representam a responsabilidade de um país em causar o aquecimento global, visto que o aumento da temperatura é função da acumulação das emissões históricas dos países, que elevam as concentrações dos diversos gases de efeito estufa na atmosfera. Para cada diferente nível de concentração de cada gás de efeito estufa, há uma acumulação de energia na superfície da Terra ao longo dos anos. Como é mencionado na proposta brasileira apresentada durante as negociações do Protocolo de Quioto (documento FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.3), a responsabilidade de um país só pode ser corretamente avaliada se forem consideradas todas as suas emissões históricas, o conseqüente acúmulo de gases na atmosfera e o aumento da temperatura média da superfície terrestre daí resultante. Portanto, os países desenvolvidos, que iniciaram suas emissões de gases de efeito estufa a partir da Revolução Industrial, têm maior responsabilidade por causar o efeito estufa atualmente e continuarão a ser os principais responsáveis pelo aquecimento global por mais um século.

## Sumário Executivo

De forma a sistematizar estudos relacionados às emissões de gases de efeito estufa de atividades antrópicas no país, o Ministério da Ciência e Tecnologia coordenou alguns estudos temáticos de caráter inovador no tocante à metodologia de inventários. O presente estudo visou o desenvolvimento de uma metodologia de medição de emissão de dióxido de carbono e metano em reservatórios de água e conseqüentemente a avaliação da contribuição das hidrelétricas para a emissão dos gases de efeito estufa no país. É importante ressaltar que a metodologia atualmente disponibilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC não considera as emissões antrópicas de gases de efeito estufa originadas em reservatórios de hidrelétricas. Por outro lado, ao utilizar a metodologia do IPCC para estimar as emissões devidas à conversão de florestas para outros usos, o Inventário Brasileiro já contabiliza o carbono contido na biomassa alagada como emissões potenciais de dióxido de carbono, entretanto com velocidades diferenciadas. Todavia, ainda não contempla as emissões de metano.

O presente relatório foi elaborado conforme contrato celebrado entre o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, a agência implementadora do Fundo Global para o Meio Ambiente, e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, com a interveniência da Fundação Universitária José Bonifácio - FUJB, no âmbito do Projeto BRA/95/G31. Além disso, a COPPE contou com um contrato com a ELETROBRÁS e ainda com o apoio das empresas de geração de energia elétrica, CEMIG, COPEL, CHESF, ELETRONORTE e da CODEVASF, que forneceram o apoio logístico e os recursos humanos adicionais para a realização do trabalho de campo.

No Brasil, excetuando-se os estudos da COPPE/UFRJ para a Eletrobrás em 1992-1993, para FURNAS em 1997-1998 e para Itaipu Binacional em 1998-1999, não existia registro de estudo científico *in loco* que determinasse as emissões totais de gases de efeito estufa (ebulição e difusão molecular), através de um programa de amostragem sistematizado. Mesmo internacionalmente essas investigações não são freqüentes.

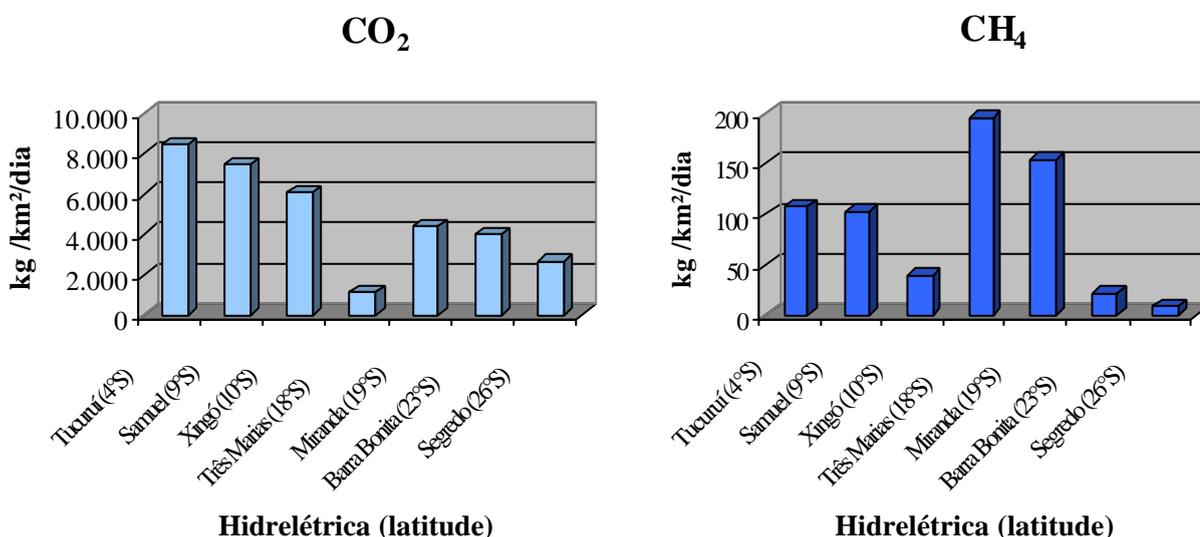
Neste projeto foram feitas medições, em dois regimes climatológicos distintos, nos reservatórios de Miranda, Barra Bonita, Segredo, Três Marias, Xingó, Samuel e Tucuruí. Empregou-se aqui dados adicionais das medições realizadas nos reservatórios de Itaipu e de Serra da Mesa. Cabe destacar que as metodologias de medição empregadas em todos os casos foram essencialmente as mesmas.

As emissões de dióxido de carbono e metano em cada um dos reservatórios selecionados, seja por bolhas seja pela troca por difusão entre água e atmosfera, foram avaliadas por amostragem, com subsequente extrapolação dos resultados para se obter um valor para o reservatório. Constatou-se uma grande variabilidade na intensidade das emissões, tendo sido identificada a influência de vários fatores entre os quais a temperatura, a profundidade no ponto de medição, o regime de ventos, a insolação, os parâmetros físico-químicos da água, a composição da biosfera e o regime de operação do reservatório.

Uma constatação importante foi a relativamente baixa correlação entre as emissões e a idade do reservatório, o que pode estar associado ao fato de as emissões serem devidas não só à decomposição do estoque de biomassa terrestre preexistente, mas também à da matéria orgânica proveniente da bacia de drenagem a montante (carbono da biomassa e do solo e eventual lançamento de esgoto e águas residuais) e da matéria orgânica internamente produzida no lago (i.e. produção de fitoplâncton).

Esse fato implica em uma maior dificuldade na separação das emissões antrópicas, objeto do inventário, das emissões que ocorreriam mesmo na ausência da barragem.

**Figura I** – Emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> dos reservatórios das hidrelétricas estudadas, por km<sup>2</sup>/dia



Devido a essas considerações, associadas ao pequeno número de reservatórios e a amostras limitadas espacial e temporalmente, os resultados obtidos possuem um certo grau de incerteza.

Comparou-se também as emissões das hidrelétricas com as de termelétricas equivalentes. Sempre lembrando que os valores estimados para as hidrelétricas incluem emissões não totalmente

antrópicas, as hidrelétricas estudadas, de um modo geral, têm emissões associadas menores que termelétricas equivalentes. Hidrelétricas com maiores densidades de potência (potência/área alagada -  $W/m^2$ ), como Itaipu, Xingó, Segredo e Miranda, têm os melhores desempenhos, bem melhores do que termelétricas com a tecnologia mais moderna, a gás natural com ciclo combinado, com eficiência de 50%. Por outro lado, algumas hidrelétricas, com baixa densidade de potência, têm desempenhos pouco acima ou piores que termelétricas equivalentes.

Com base nas metodologias de medição desenvolvidas neste trabalho, e na experiência de análise dos resultados obtidos, um novo estudo está em andamento visando a obtenção de uma maior quantidade de medidas e diminuição da incerteza dos resultados. Também está prevista a realização de estudo de avaliação das emissões previamente à construção de um reservatório, para permitir a comparação com as emissões a serem medidas após sua construção, com o objetivo de identificar o componente antrópico das emissões.

## 1 Introdução

Como objetivo principal, o trabalho propõe estabelecer uma metodologia para contabilizar as emissões de gases de efeito estufa derivadas de diferentes reservatórios hidrelétricos brasileiros.

A medição experimental dos gases exalados pelos reservatórios foi empregada para determinar especificamente as emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) tanto sob a forma de bolhas, que se desprendem do fundo do lago por efeito da decomposição da matéria orgânica, quanto transportados verticalmente no gradiente do lago por difusão molecular.

O trabalho foi organizado de forma a incluir a caracterização dos reservatórios, a descrição dos trabalhos e da metodologia de coleta de campo, a análise de laboratório e dos dados, a apresentação dos resultados, os aspectos teóricos e os índices utilizados.

As medições, divididas em duas campanhas, consistiram na coleta de dados de fluxo dos gases, regime de ventos, temperatura e pH da água nos reservatórios pesquisados.

Também encontra-se aqui a comparação do emprego do método de medida da taxa de troca gasosa com as “pequenas câmaras”, com o método que utiliza uma câmara maior, usada por outros grupos de pesquisa. Outro tópico apresentado é a verificação da variabilidade e dos limites de detecção dos métodos cromatográficos aplicados para quantificar concentrações de metano e gás carbônico.

Para se chegar a uma média para cada reservatório como um todo a partir dos resultados das observações experimentais, em apenas alguns pontos do reservatório e em alguns dias do ano, houve a necessidade de se adotar um critério para a extrapolação. Para o caso das emissões por bolhas, que não ocorrem nas profundidades maiores, foi feita uma média ponderada para todo o lago; para as emissões por difusão, fenômeno que foi visto independer da profundidade, optou-se pela média simples dos valores medidos.

Quantificadas as emissões das hidrelétricas objeto deste relatório, foi feito um exercício de comparação com as emissões de plantas termelétricas hipotéticas de mesma potência. Isto permitiu quantificar um fator de mérito das hidrelétricas em relação às termelétricas virtuais, de acordo com os diversos combustíveis e tecnologias.

## 2 Caracterização dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados

A questão primordial, mobilizadora para a realização deste trabalho, foi quantificar quanto de metano e de dióxido de carbono é emitido pelos reservatórios brasileiros para a atmosfera.

A proposta escolhida foi avaliar a emissão dos referidos gases a partir da seleção de sete reservatórios localizados em várias latitudes e de diversas idades.

Para captar uma possível variação dos parâmetros de análise, estabeleceu-se um critério de escolha das condições ambientais dos respectivos reservatórios.

A alternativa encontrada foi optar por hidrelétricas que cobrissem significativamente a variação de latitude geográfica ocorrente no país, de reservatórios com tempo de fechamento grandes e pequenos, reservatórios com presença de atividade antropogênica e outros com preservação das condições naturais, e reservatórios com tempo médio de residência da água variável.

Mediram-se as emissões de metano e de dióxido de carbono em sete reservatórios hidrelétricos: Miranda (MG), Três Marias (MG), Barra Bonita (SP), Segredo (PR), Xingó (AL, BA, SE), Samuel (RO) e Tucuruí (PA). Quatorze campanhas de amostragens foram realizadas, entre 1998 e 1999.

As latitudes abrangidas vão de 2° S a 25° S e os tipos de vegetação compreendem a floresta equatorial úmida, a floresta subtemperada, a floresta mata atlântica, o cerrado e a caatinga (semi-árido), incluindo os principais ecossistemas brasileiros. As idades de inundação dos reservatórios hidrelétricos vão de um a vinte anos, o que confere boa representatividade temporal ao estudo. A Tabela 1 a seguir fornece uma descrição sucinta dos reservatórios pesquisados. A Figura 1 fornece a localização geográfica dos reservatórios estudados.

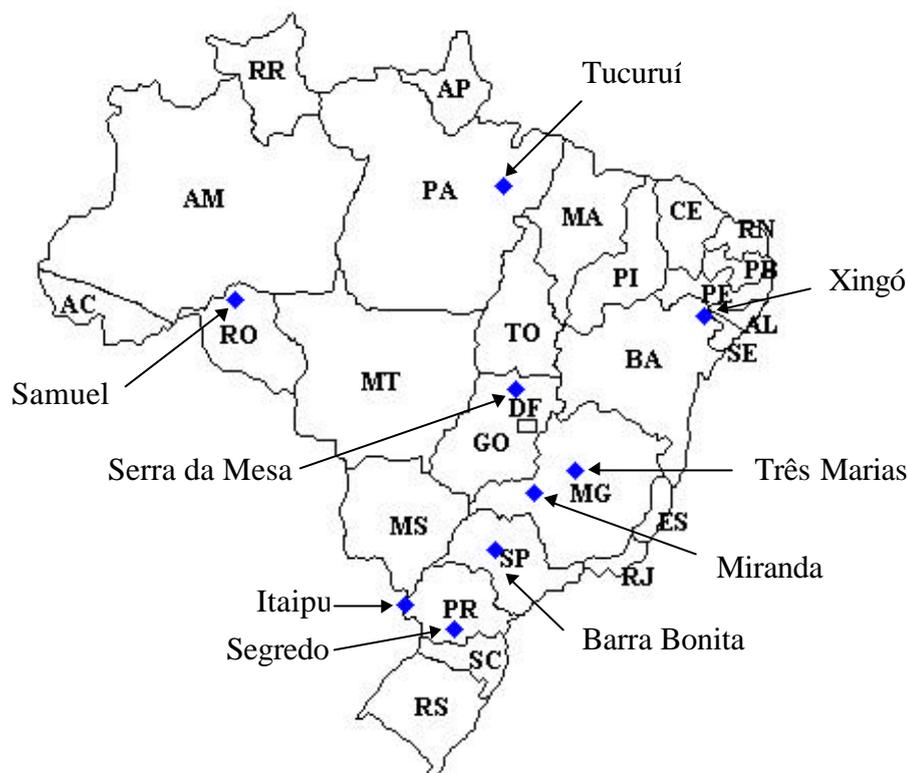
Por solicitação da Eletrobrás e com a autorização das respectivas empresas, foram incluídos também neste relatório os dados das medições realizadas nos reservatórios de Itaipu (Itaipu Binacional) e de Serra da Mesa (Furnas Centrais Elétricas S.A. e Serra da Mesa Energia S.A.).

**Tabela 1** – Sinopse da caracterização dos reservatórios hidrelétricos estudados e referenciados

Usina	Latitude	Bioma	Potência (MW)	Área do Reservatório (km <sup>2</sup> )	Densidade de Potência (W/m <sup>2</sup> )
Miranda	18°55'S	Cerrado	390	50,6	7,71
Três Marias	18°13'S	Cerrado	396	1.040	0,38
Barra Bonita	22°31'S	Mata Atlântica	140,76	312	0,45
Segredo	25°47'S	Mata Atlântica	1.260	82	15,37
Xingó	9°37'S	Caatinga	3.000	60	50,00
Samuel	8°45'S	Amazônica	216	559	0,39
Tucuruí	3°45'S	Amazônica	4.240	2.430	1,74
Serra da Mesa*	13°50'S	Cerrado	1.275	1.784	0,71
Itaipu*	25°26'S	Mata Atlântica	12.600	1.549	8,13

\* Reservatórios estudados em campanhas paralelas às deste trabalho.  
Banco de Dados Hidrelétricos da ANEEL, 2000.

**Figura 1** – Localização das hidrelétricas estudadas e referenciadas



## 2.1 Reservatório de Miranda

A hidrelétrica de Miranda pertence à CEMIG e situa-se na região do Triângulo Mineiro, próximo aos municípios de Araguari e de Uberlândia. Miranda começou a ser construída no ano de 1990 e no dia 1º de agosto de 1997 ocorreu o fechamento das comportas da barragem e o enchimento do lago. O reservatório da hidrelétrica de Miranda, situado no rio Araguari, inundou uma área de 50,6km<sup>2</sup>.

A capacidade instalada da usina é de 390 MW de potência.

A área da bacia do rio Araguari apresenta duas fases climatológicas predominantes, com a estação seca, entre junho e agosto e a estação chuvosa, entre dezembro a março. A bacia enquadra-se como de chuva tropical de natureza continental (IESA,1996).

Segundo estudos realizados na época do projeto da hidrelétrica (IESA, 1995), a área do reservatório inundou os seguintes tipos de vegetação: cerradão, cerrado, campo sujo/pasto sujo, campo de várzea, campo de murundus, pasto limpo, culturas perenes, culturas anuais, reflorestamento e reflorestamento cortado.

Numa área de cerradão, recentemente afogada pelo enchimento do reservatório hidrelétrico, parte da vegetação permanece inundada, porém ainda há algumas espécies mais resistentes que ainda permanecem vivas, como o babaçu.

## 2.2 Reservatório de Três Marias

O reservatório hidrelétrico de Três Marias, situa-se no rio São Francisco, na região do Alto São Francisco, a montante de Pirapora, a cerca de 270 km de Belo Horizonte. É um reservatório construído conjuntamente entre a CODESVASF e a CEMIG, tendo sido fechado em janeiro de 1961.

Esta usina iniciou sua operação no ano de 1962, com seis unidades geradoras de 66 MW de potência. A potência instalada na primeira etapa é de 396 MW. No projeto está previsto uma potência final de 516,85 MW. O reservatório tem 1.040 km<sup>2</sup> de área e um volume de água de 21 bilhões de m<sup>3</sup>.

Nas margens do reservatório há frações da biomassa inicial afogada pelo enchimento do lago, ainda praticamente intactas, como é o caso de troncos de árvores que se encontram parcialmente decompostos e emersos em região abrigada do reservatório.

### 2.3 Reservatório de Barra Bonita

O reservatório hidrelétrico de Barra Bonita pertence à AES Tietê S.A. e situa-se no rio Tietê, na região do médio Tietê, entre as cidades de Barra Bonita e Igarapu (SP). É um reservatório antigo: foi fechado em junho de 1962, enchendo-se completamente em maio do ano seguinte. A usina hidrelétrica de Barra Bonita tem uma potência nominal de 140,76 MW e uma área de 312 km<sup>2</sup>. É um reservatório bastante eutrofizado, pelo alto grau de poluição orgânica que recebe da região metropolitana de São Paulo.

### 2.4 Reservatório de Segredo

O reservatório de Segredo pertence à COPEL e situa-se no rio Iguaçu (PR), na região do médio curso do rio Iguaçu, próximo à desembocadura do rio Jordão, no município de Pinhão (PR). O lago tem uma área de 82 km<sup>2</sup>, para uma potência total da usina de 1.260 MW.

O reservatório tem um volume total de 3.000.000 m<sup>3</sup>. As comportas foram fechadas em junho de 1992, enchendo o lago em três meses. A barragem da usina tem 145 metros de comprimento, do tipo enrocamento com face em concreto (AGOSTINHO e GOMES, 1997).

As temperaturas médias da região oscilam entre 17 e 18° C, com mínimas absolutas de -7° C e máximas de 38° C (AGOSTINHO e GOMES, 1997).

Segundo estudo realizado pelo NUPELIA/UEM, a antiga área inundada pelo reservatório de Segredo era dominada pelas matas do tipo de araucária, vegetação bastante incidente da região sul do país, ricas em taquarais e palmáceas, e pela mata subtropical interior (AGOSTINHO e GOMES, 1997). Dois terços dessa mata original já havia sido devastada e transformada em outros tipos de culturas, tais como: matas secundárias e roçados de rotação de culturas, intercalados com áreas de capoeira, matões e matas de galeria.

O reservatório de Segredo pode ser considerado um lago profundo, podendo atingir em alguns pontos 100 metros de profundidade, com uma profundidade média de 36 metros. O tempo de renovação da água é de cerca de 50 dias e é considerado um reservatório de condições mesotróficas.

Estudos limnológicos anteriores (AGOSTINHO e GOMES, 1997), mostraram que o reservatório apresenta estratificação térmica e presença de termoclina no verão e no outono, em locais próximos à barragem.

## 2.5 Reservatório de Xingó

O reservatório da hidrelétrica de Xingó pertence à CHESF e situa-se no rio São Francisco, no baixo curso da bacia do São Francisco, nas divisas dos estados de Alagoas, Sergipe e Bahia.

A área de influência do empreendimento compreende a região a jusante do complexo hidrelétrico de Paulo Afonso, até a cidade de Piranhas em Alagoas e o povoado de Canindé do São Francisco no Sergipe.

A hidrelétrica de Xingó tem uma potência total de 3.000 MW. A área de drenagem da bacia contribuinte de Xingó é de 608.700 km<sup>2</sup>, com uma descarga média mensal de 2.980 m<sup>3</sup>/s. A área do reservatório é de 60 km<sup>2</sup> e o comprimento atinge cerca de 60 km. Xingó está encravado em uma grande canyon do São Francisco e opera praticamente a fio d'água.

O enchimento de Xingó começou em 7 de julho de 1994 e já no dia 16 do mesmo mês o reservatório encontrava-se praticamente cheio.

O clima na região da hidrelétrica é quente, com temperaturas médias em torno de 25° C e totais pluviométricos anuais entre 413 a 907 mm /ano. O trimestre mais chuvoso é entre maio/julho e o mais seco entre setembro/novembro.

Basicamente nesta região, a vegetação dominante é a caatinga, constituída por árvores de pequeno porte, arbustos caducifólios, plantas suculentas e espinháceas. É um tipo de vegetação adaptada à falta de água. Na área do reservatório de Xingó, domina a caatinga hiperxerófila, dividida entre estratos arbóreos, arbustivos e arbustivo-arbóreo. Em outras áreas de influência do reservatório podem ocorrer contatos com o cerrado ralo e com a floresta estacional decidual.

O reservatório inundou uma área de um *canyon* do vale do Rio São Francisco, o que conferiu a esta usina uma grande potência a partir de uma pequena área alagada.

## 2.6 Reservatório de Samuel

A Usina Hidrelétrica de Samuel pertence à Eletronorte e situa-se na bacia do rio Jamari, próximo a Porto Velho, capital do estado de Rondônia. A usina tem potência de 216 MW e o reservatório tem uma área de 559 km<sup>2</sup>. O fechamento das comportas deu-se em novembro de 1988 e em julho do ano seguinte o lago já estava formado.

No Reservatório de Samuel foram identificados sete tipos diferentes de formações florestais, a partir de dados da fitomassa inventariados em 13 hectares, divididos em quadras. O resultado da extrapolação da fitomassa para os diversos tipos de florestas encontradas está disposto a seguir na Tabela 2.

**Tabela 2** – Dados de fitomassa por tipo de floresta na área da hidrelétrica de Samuel

<b>Tipo de Vegetação</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>	<b>Peso Úmido (t/ha)</b>	<b>Peso Total (t)</b>
Floresta mista ciliar, estacional, inundável	2.363	3,65	196	463.148
Floresta densa, terra firme, relevo plano	34.580	53,36	525	18.154.500
Floresta aberta, terra firme, emergentes	3.693	5,7	390	1.440.270
Floresta semi-aberta, terra firme c/ afloramentos rochosos	1.524	2,35	310	472.440
Floresta aberta, terra firme, relevo mal drenado	11.370	17,55	286	3.251.820
Área desprovida de cobertura vegetal	3.935	6,07	-	-
Vegetação secundária (inclusive desmatamento)	3.565	5,50	85	303.025

Fonte: Cardenas, 1986.

No caso da divisão da biomassa total da área do reservatório em segmentos, os valores médios encontrados foram: fuste (285 t/ha); galhos (185 t/ha); galhos finos (25 t/ha); folhas (5 t/ha); serapilheira (10 t/ha).

A Tabela 3, a seguir, fornece com mais detalhes os valores de biomassa a partir da extrapolação para duas quadras da área do reservatório de Samuel.

**Tabela 3** – Resultados de inventário de fitomassa nas quadras 1 e 2 (hidrelétrica de Samuel)

<b>Variável</b>	<b>Quadra 01</b> (t/ha)	<b>Quadra 02</b> (t/ha)
Fuste	184,99	178,80
Galhos Grossos	66,92	59,59
Galhos Médios	22,63	26,82
Galhos Finos	32,77	12,54
Folhas	11,65	29,67
Casca	44,24	16,48
Cipó	4,59	10,77
Raizame	1,96	10,60
Serapilheira	9,38	5,35
Folhas Sub-Bosque	11,13	2,50
Galhos Sub-Bosque	1,83	9,09
<b>Subtotal</b>	<b>396,09</b>	<b>363,21</b>
Cipó Adicional	0,72	2,09
Serapilheira Adicional	0,96	3,43
Galhos Secos	1,15	4,59
Troncos Secos	4,18	2,93
<b>Total</b>	<b>403,10</b>	<b>375,25</b>

Fonte: Cardenas, 1986.

## 2.7 Reservatório de Tucuruí

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí pertence à Eletronorte e situa-se no rio Tocantins, no estado do Pará, a cerca de 300 km de distância de Belém, capital do estado.

Inaugurada em 1984, a primeira etapa da usina tem uma potência total de 4.240 MW, com previsão de aproveitamento de 4.125 MW numa segunda etapa.

O reservatório de Tucuruí tem uma área total de 2.430 km<sup>2</sup> e um volume total de água de 45,8 bilhões de metros cúbicos. Foi fechado em setembro de 1984, completando-se o enchimento em março do ano seguinte. Atualmente são 12 grupos geradores de 350 MW e duas unidades auxiliares de 20 MW, movimentadas por turbinas do tipo Francis. A barragem tem cerca de 8 km de extensão, sendo que cerca de 1,19 km são de estrutura em concreto.

No reservatório de Tucuruí, segundo o trabalho preliminar de foto-interpretação (CARDENAS *et al.*, 1982), foram consideradas as seguintes formações:

Zona 1 - mata alta, homogênea sobre o relevo dissecado.

Zona 2 - mata de porte médio a baixo, muito desmatada situada à margem do rio.

Zona 3 - misto de matas altas e densas com baixas e pouco densas.

Zona 4 - mata baixa, homogênea, em relevo mais suave, área desmatada, alturas e capoeiras.

Zona 5 - manchas de vegetação sobre o solo branco arenoso.

Zona 6 - vale do rio Tocantins.

Zona 7 - vale do rio Caraipé.

Zona 8 - zona de mata (inundável estacionalmente).

O trabalho também cita que, após o ano de 1979, base das fotografias aéreas, foram realizados desmatamentos pela CAPEMI. A Tabela 4, fornece resultados de estimativa da fitomassa por classe de mata e por segmento da biomassa, com base nas fotografias aéreas de 25 de junho de 1979. Os resultados somam 2.543 km<sup>2</sup>, tendo em vista que a estimativa extrapolou os limites espaciais do reservatório.

**Tabela 4** – Biomassa seca na área do reservatório de Tucuruí

Zonas/Classes de Mata	Área (ha)	Troncos (t/ha)	Galhos (t/ha)	Folhas (t/ha)	Liteira (t/ha)
1	65.000	327	213	15	12
2	57.500	220	125	16,80	18,90
3	12.750	360	233,90	16	12
4	60.750	300	194,90	12	16,90
5	2.375	149	85,90	19,78	24
6	11.312	177,3	111	14,40	14,90
7	41.537	em estudo	em estudo	em estudo	em estudo
8	3.125	147,8	176	8,96	7,04

Fonte: Cardenas, 1986.

Os estudos realizados com base em fotografias do satélite Landsat em 1979, junto com os trabalhos de campo, concluíram que o total de biomassa é: troncos 266 t/ha - 57,2%; galhos 169 t/ha - 36,3%; folhas 15 t/ha - 3,2%; liteira 15 t/ha - 3,3 %; total 465 t/ha - 100%.

Das 113 milhões de toneladas de biomassa inventariadas para os 2.430 km<sup>2</sup>, elimina-se a área correspondente à calha do antigo rio Tocantins (600 km<sup>2</sup>), ilhas (400 km<sup>2</sup>) e áreas desmatadas pela Eletronorte (400 km<sup>2</sup>), o que faz com que a área inundada com vegetação seja de 1.180 km<sup>2</sup>, o que dá um total de 55 milhões de toneladas de biomassa afogada pelo enchimento do lago de Tucuruí.

### 3 Descrição dos Trabalhos e da Metodologia de Medição Empregada

Nas campanhas foram realizadas medidas dos seguintes tipos:

- **Taxas de emissão de gás na forma de bolhas, usando-se funis para capturá-las após a sua liberação espontânea.**

As amostras de bolhas de ar foram coletadas empregando-se um conjunto de 16 funis coletores de bolhas (cones de napa sintética, com armação de alumínio, diâmetro de 0,75 m e acoplados a garrafas coletoras de gases).

Os funis foram dispostos em subsuperfície (em torno de um metro de profundidade) acopladas a garrafas plásticas que serviam como bóias e ancorados por poitas de pedras com cerca de 10kg cada uma. A escolha do sítio de amostragem e a seqüência dos funis seguiram parâmetros como tempo de enchimento do local (cota do reservatório), profundidade, presença de vegetação semi-afogada, região geográfica do reservatório.

Os funis permaneciam por 24 horas no local, onde, durante este período, as bolhas que se desprendiam do fundo eram capturadas. No final, as garrafas coletoras eram fechadas hermeticamente dentro da água e recolhidas para posterior análise em laboratório.

- **Taxa de gás emitido por difusão, utilizando “câmaras de difusão”.**

Câmaras de difusão são dispositivos que se assemelham a pequenos copos invertidos, com volume total de 75 mL e capazes de conter uma “bolha” de ar atmosférico, submersa a pequena profundidade (cerca de 20 cm abaixo da superfície), com superfície de contato de 0,22 dm<sup>2</sup>, através da qual se dá a troca gasosa, aqui chamada de difusão. Após contato de 3, 6 e 12 minutos, alíquotas da “bolha” são levadas ao laboratório e a variação da concentração de cada gás é estimada cromatograficamente, podendo-se dela calcular a taxa de emissão ou absorção, conforme o caso.

No laboratório cromatográfico, instalado nos alojamentos próximos aos reservatórios, foram feitas 800 análises cromatográficas de amostras de gás ou gás dissolvido na água provenientes do reservatório.

- **Taxa de emissão.**

Para obter taxas de emissão por bolhas, foram usados os valores medidos para as diversas faixas de profundidade e estabelecidas funções matemáticas aproximadas que descreviam as taxas de emissão

em função da profundidade. Uma das funções empregadas foi uma reta e as outras, funções exponenciais.

Multiplicando-se os pares correspondentes de área e taxa, obtinha-se a massa total de gás emitido para cada faixa de profundidade do reservatório. A soma destes valores representa a massa emitida pelo reservatório todo. A partir das massas totais foram calculadas as taxas médias do reservatório para cada gás.

Uma descrição detalhada da metodologia de medição e de análise das amostras de gases dos reservatórios hidrelétricos estudados é apresentada no Anexo C. Já os processos de geração de gases na água, são descritos no Anexo D.

## 4 Emissões de Gases de Efeito Estufa dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados

A primeira pesquisa sobre emissões de gases do efeito estufa em hidrelétricas, realizada em 1993-1994, através de projeto com a Eletrobrás, enfatizava, teoricamente, a decomposição do estoque de biomassa preexistente na área do reservatório.

Deu-se atenção às emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ), objeto das medições, embora a metodologia de análise adotada explicitasse que nem toda a emissão se dava por esta via, incluindo a presença do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nos cálculos. Admitia-se, por hipótese, que as emissões pelos processos biológicos e físico-químicos na água do reservatório, formado pela barragem, permaneciam, com menor intensidade, após decair a decomposição do estoque inicial de biomassa. A medição era feita por funis que detectavam mais o metano emitido por ebulição (bolhas).

Nessa concepção, foi desenvolvido um modelo matemático para descrever a emissão no lago ao longo do tempo, em função do decaimento da decomposição da biomassa. Admitiu-se, por observações empíricas, que nem toda a biomassa se decompõe no prazo de muitos anos após o fechamento, resistindo por muitas décadas ou secularmente. Assim, a biomassa vegetal foi decomposta em duas partes: raízes, troncos e galhos grossos, que resistem no tempo; folhas e galhos finos, que se decompõem em alguns anos.

O modelo impunha a conservação da massa do carbono, cuja taxa de variação era dada por uma equação diferencial ordinária com um termo de fonte caracterizado por um decaimento exponencial. Os parâmetros eram a constante de tempo deste decaimento, a densidade de biomassa no local e o seu conteúdo em carbono, a fração da biomassa que se decompõe no horizonte de cem anos, a fração de carbono emitido sob forma de  $\text{CH}_4$  e a emitida como  $\text{CO}_2$ , a vazão de água carregando o gás horizontalmente. O carbono emitido para atmosfera era resultante da diferença entre o produzido no lago e o carregado pela água. Desse modelo deduz-se a constante de tempo da emissão do gás para a atmosfera, ajustada depois aos dados das medições feitas na primeira pesquisa de medições, em diferentes tempos após o fechamento das barragens, com ênfase nas grandes barragens na Amazônia.

Neste segundo projeto de pesquisa com a Eletrobrás e o MCT, cujo relatório é agora apresentado, abriu-se uma nova perspectiva ampliando o trabalho anterior. Em 1995, no seminário organizado na Eletrobrás, foi feito um confronto de metodologias com convidados do Canadá, com os quais manteve-se contato em uma Conferência da Agência Internacional de Energia em Londres e em um Workshop na Hydro Quebec, onde haviam sido apresentados os resultados anteriores.

Em consequência, foi realizado em 1997 um experimento conjunto da COPPE/UFRJ e da USP - São Carlos com o grupo da Universidade de Quebec na barragem de Curuá-Una, com ajuda também da UFPa e o apoio do CNPq/MCT. Como resultado deste experimento, o grupo da COPPE/UFRJ passou a usar câmaras de difusão, além de funis, e o grupo canadense passou a usar funis, além de câmaras de difusão, quando então foi possível observar-se que as emissões de CO<sub>2</sub> eram muito maiores.

Nesta segunda pesquisa, foram verificadas emissões altas, pontualmente, em barragens antigas, fechadas há muitos anos. Ademais, houve grandes variações nos valores medidos. Estas questões foram discutidas no Workshop Internacional realizado na COPPE/UFRJ no fim do ano de 1998, com apoio do MCT e da ANEEL além da Eletrobrás, publicado pelo Instituto Virtual de Mudanças Globais/Faperj (1999).

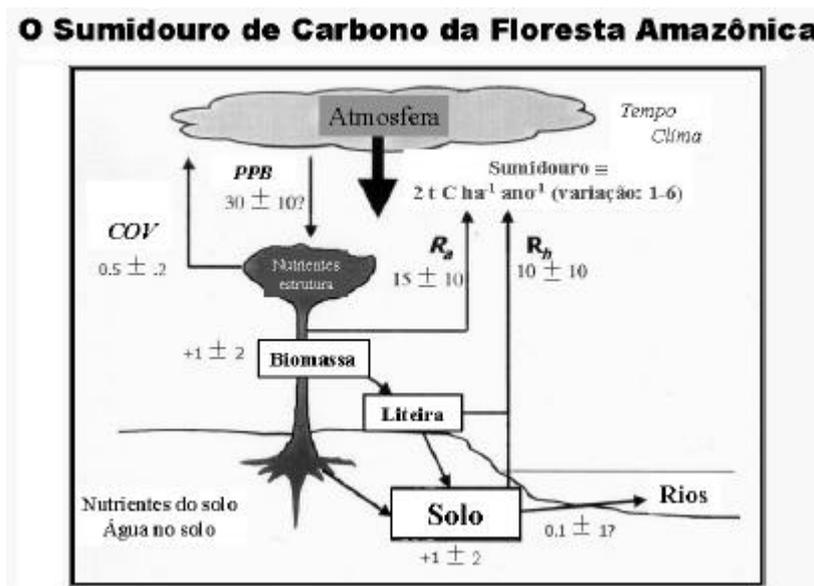
#### **4.1 Ciclo do carbono**

O carbono emitido para a atmosfera pela superfície livre da água das barragens de hidrelétricas, em parte, é oriundo de material orgânico carregado das áreas ribeirinhas para o leito dos rios afluentes e para os reservatórios hidrelétricos. Se este carbono, no caso da emissão de CO<sub>2</sub>, for da biomassa, então ele foi anteriormente retirado da atmosfera e portanto, sua emissão não tem contribuição incremental para o efeito estufa.

Surge então o problema de quantificar essas contribuições. Para tanto se fazem necessários estudos que envolvam o ciclo de carbono no sistema bacia hidrográfica/reservatório.

Mas, conforme foi referido pelo Relatório da Comissão de Mudanças Climáticas da SBPC (2000), verifica-se que, na Amazônia, há uma transferência de carbono do solo para os rios da ordem de 0,1 tC/ha/ano, conforme Figura 2. Esse carbono é de origem natural, pois fora absorvido da atmosfera. Assim, as emissões no reservatório decorrentes desse carbono não podem ser contadas como antrópicas. Logo, ainda é grande a incerteza dos valores medidos de emissões pelas barragens

**Figura 2** – Síntese preliminar do ciclo de carbono da floresta tropical na Amazônia



Unidades: t C/ha/ano. PPB= produtividade primária bruta;  $R_a$ = respiração autotrófica;  $R_b$ =respiração heterotrófica; COV= compostos orgânicos voláteis.

Fonte: Relatório da Comissão de Mudanças Climáticas da SBPC (2000).

## 4.2 Resultados das emissões dos reservatórios por faixa de profundidade

Os resultados das emissões de  $\text{CO}_2$  e de  $\text{CH}_4$  estão listados a seguir, a partir da Tabela 5 até a Tabela 34, para ebulição e difusão na série de amostragens das campanhas de coleta.

É comum avaliar-se a incerteza resultante de um conjunto de medidas com um desvio padrão ( $s$ ) para mais e para menos da média ( $\pm s$ ). Esta faixa de incerteza contém 67% dos valores possíveis, sendo que os 33% restantes ficam fora desta faixa, significando que há um erro maior que  $s$ . Essas considerações são válidas para universos com distribuição Gaussiana.

Se a distribuição de probabilidade assumida for gaussiana, por hipótese, embora não se conheça nem empiricamente nem teoricamente a estatística do fenômeno da emissão, o desvio padrão tem a definição convencional. O significado, portanto, de uma emissão de 2,1 com 137,6% significa uma grande margem de erro, podendo, no caso, a emissão variar de -0,7896 a + 4,9896 (a maioria das emissões em um grande número das medições cairia neste intervalo) centrado em 2,1 (o ponto central de máxima probabilidade da distribuição gaussiana).

Neste estudo, embora não tenha sido feita determinação do tipo de distribuição, ficou evidente que ela não é Gaussiana. Erros citados, assim, não têm significado costumeiro, sendo necessário explicar o que cada tipo de citação de erro significa. Vários critérios de avaliação de erro são possíveis.

#### 4.2.1 Resultados da primeira campanha

**Tabela 5** – Hidrelétrica de Miranda - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade metros	sítio	[N <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CH <sub>4</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CO <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia
5	A	46,9 ± 37,6%	24,4 ± 49,1%	0,12 ± 38,7%
6,5	B	55,1 ± 34,0%	51,7 ± 56,5%	0,5 ± 58,2%
10,5	B	492,9 ± 62,8%	12,7 ± 29,5%	1,3 ± 50,7%
13	C	107,2 ± 65,0%	175,6 ± 76,5%	0,55 ± 58,4%
14,5	D	14,7	1,48	0,03
22	E	48,0 ± 28,0%	59,7 ± 35,7%	0,17 ± 34,3%
23	F	25,2 ± 109,3%	2,1 ± 137,6%	0,06 ± 90,0%
40	G	1,45 ± 63,9%	<0,007	na
60	H	0,64	<0,002	na

na - não analisado

A - córrego Furnas

B - sítio Boa Vista

C - pasto e mata

D - ilha

E - pasto, antiga ponte de Furnas

F - Boa Vista, área de mata cerrado

G - pasto

H - córrego Boa Vista, área desmatada

**Tabela 6** – Hidrelétrica de Miranda - medidas com câmaras de difusão

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
15:15	6	A	155	61.182
21:25	6	A	91	-3.764
03:09	6	A	60	49.564
09:56	6	A	4572	40.257
13:19	15	B	208	2.495
21:04	15	B	26	-22.544
07:15	15	B	-454	1.181
21:04	20	C	30	-618
08:26	22	D	32	-729
16:40	22	D	54	-7.554
22:00	27	A	59	262
03:44	27	A	53	421
10:27	27	A	54	2.967
10:27	40	C	29	-584
09:15	40	C	20	223
17:19	40	C	57	16
07:44	40	C	47	568
13:53	42	B	94	-14.468
21:37	45	B	64	-502
16:18	60	A	24	-4.407
22:38	60	E	31	334
04:20	60	A	25	9101
11:04	60	A	34	1145

A - Boa Vista

B - ilha

C - Furnas

D - antiga Ponte de Furnas

E - sítio Boa Vista (próximo à barragem)

**Tabela 7 – Hidrelétrica de Três Marias - valores médios de liberação de gases por bolhas**

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
5	A	189 ± 5,6%	450 ± 2,2 %	5,2 ± 21 %
5,3	B	0,24	< 0,001	na
5,3	C	372 ± 33 %	533 ± 45 %	8,3 ± 150 %
10	A	306 ± 24 %	485 ± 50 %	3,4 ± 49 %
11,5	C	421 ± 12 %	1205 ± 17 %	11 ± 107 %
13	D	294 ± 17 %	251 ± 36 %	1,4 ± 30 %
20	A	646 ± 27 %	614 ± 32 %	2,9 ± 41 %
21	C	2,9	< 0,01	na
24,5	B	0,87	< 0,003	na
31,5	C	33	0,11	0,006
40,5	B	1,5	< 0,005	na
45	A	2,6 ± 3,5 %	< 0,01	na

na - não analisado

A - córrego dos Borrachudos

B - rio São Francisco

C - ribeirão do Boi

D - córrego do Boi Estreito

**Tabela 8 – Hidrelétrica de Três Marias - medidas com câmaras de difusão**

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
11:27	5,3	A	5,4	1.482
06:26	5,3	A	5,1	33
12:41	5,3	B	77	364
18:35	5,3	C	-47	-3.229
14:53	5,3	C	44	-6.790
12:57	10	D	80	795
18:09	10	E	146	828
06:46	10	E	24	10.060
18:20	11,5	C	226	621
15:09	11,5	C	51	-911
13:01	20	D	80	2.277
18:33	20	E	26	2.029
07:05	20	E	196	1.035
18:52	20	C	17	1.201
15:26	20	C	241	-1.615
13:03	21	B	35	828
12:33	24,5	A	-0,90	-745
06:46	24,5	A	1,1	-1.035
13:05	40,5	A	14	580
07:04	40,5	A	17	-1.325
	42	A	10	-538
	45	A	-12	-9.184
	45	A	32	-33

A - rio São Francisco

B - ribeirão do Boi

C - córrego do Boi (entrada das Bananeiras)

D - córrego dos Borrachudos

E - boca do rio Borrachudo

**Tabela 9** – Hidrelétrica de Barra Bonita - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
5,5	A	0,25	0,002	na
7	B	51 ± 4,3 %	21 ± 24 %	0,36 ± 43 %
9,5	A	2,0	0,05	0,008
16	C	56	11	0,77
17	B	28	7,6	0,15
20	D	1,6	0,07	na

na - não analisado

A - brejão (próximo à barragem)

B - foz do rio Piracicaba (Três Rios) paliteiro, dia muito chuvoso

C - foz do rio Piracicaba (Três Rios) paliteiro, rio Tietê - rio Bonito, dia muito chuvoso

D - brejão Vale Verde

**Tabela 10** – Hidrelétrica de Barra Bonita - medidas com câmaras de difusão

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
13:07	5	A	11	2.880
09:45	5,5	B	29	8.277
12:26	7	C	8,8	2.149
17:38	9	G	8,2	3.023
06:35	9	G	18	1.614
12:40	10	A	8,1	5.527
17:01	10	D	5,2	4.767
19:12	15	E	-	4.638
11:48	17	C	15	5.869
17:25	19	F	25	4.069
19:39	19	F	54	33.424
10:03	19	F	6,4	7.084
13:40	20	A	3,1	3.311
08:45	20	F	4,0	4.975
09:38	20	D	5,4	4.896

A - brejão (próximo à barragem)

B - brejão

C - rio Piracicaba (condomínio Três Rios)

D - brejão Vale Verde

E - fazenda Pujol (margem esquerda do rio Tietê)

F - pontal

G - praia MCAS

**Tabela 11** – Hidrelétrica de Xingó - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade metros	sítio	[N <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CH <sub>4</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CO <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia
5	A	0,91	<0,01	na
11	B	45	15	0,04
13	A	10	0,35	0,01
19	A	8,8	0,49	0,01
22	B	3,2	0,34	0,004
56	B	8,0	0,66	0,01
72	A	27	2,0	0,06

na - não analisado

A - E5; paliteiro; em frente a confluência do rio Talhado; 12 a 13-5-98

B - E3; adutora do sertão; 13 a 14-5-98

**Tabela 12** – Hidrelétrica de Xingó - medidas com câmaras de difusão

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
17:49	5	A	16	42.242
00:53	5	B	89	-893
17:25	5	C	13	5.958
16:00	6	D	7,4	2.195
02:05	6	D	17	4.247
22:10	6	D	110	4.105
08:39	6	D	-11	22.113
12:46	6	D	4,7	-755
13:07	22	E	16	-1.478
10:40	22	E	12	-443
13:52	56	E	11	-29
10:04	56	E	19	256
00:12	70	F	4,9	89.203
12:06	72	F	142	981
12:24	72	F	58	8.850
17:26	72	B	7,5	2.189
09:30	72	F	8,2	1.114
01:41	110	D	4,8	4.361
16:37	120	D	3,3	2.687

A - riacho do Talhado

B - E5 (Talhado)

C - barragem

D - E7 perto da barragem

E - E3 adutora do sertão

F - E5 em frente a confluência do Talhado

**Tabela 13** – Hidrelétrica de Segredo - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade metros	sítio	[N <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CH <sub>4</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CO <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia
3	A	8,2	<0,03	0,01
5,5	B	8,1	0,04	0,02
6	C	37	29	0,25
10	C	1,4	0,03	2,0
10,5	B	14	0,67	0,04
14	A	5,9	0,81	0,01
18	C	1,2	0,01	0,002
24	A	5,4	0,06	0,007
27	B	24	9,3	0,08
36	A	11	<0,04	na
41	C	1,3	<0,004	na
64	B	5,1	<0,02	0,005

na - não analisado

A - rio Capoteiro

B - paliteiro da barragem Segredo, chuva quase contínua

C - foz do rio Covó

**Tabela 14** – Hidrelétrica de Segredo - medidas com câmaras de difusão

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
11:06	5	A	0,007	1.290
11:52	5,5	B	50	0,0001
16:01	10	C	7,0	-800
01:18	10	D	4,8	-2.924
02:20	10	B	1,7	1.347
11:57	10	D	14	0
16:14	10	A	5,6	13.578
01:22	10	A	64	0
02:16	10	E	1,8	1.874
11:34	10,5	B	0,62	-4.784
15:26	10,5	D	1,4	1.383
16:57	11	E	4,5	1.332
15:09	37	D	22	-624
01:36	40	D	4,1	-365
02:37	40	B	1,8	304
12:13	40	D	0	29.264
16:31	40	A	0,60	-3.127
01:41	40	A	-2,8	35.373
09:17	40	A	2,0	-8.894
15:36	40	F	-3,2	3.610
10:42	41	A	10	259
11:16	64	B	1,6	-3.462
17:13	70	E	0,002	46.857
02:34	70	E	12	3.100
10:19	70	E	3,2	5.145

A - foz do rio Covó

B - paliteiro da barragem

C - barragem

D - Bragança

E - calha do rio Iguazu

F - rio Capoteiro

**Tabela 15** – Hidrelétrica de Samuel - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade metros	sítio	[N <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CH <sub>4</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CO <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia
4,5	A	106	67	0,92
4,5	B	62 ± 26	59 ± 50%	1,8 ± 36%
6,5	C	18	1,0	0,10
10	D	253 ± 140%	1,0 ± 141%	1,3
16	E	5,7	1,2	0,03
17	B	1,8	0,0001	0,004
25	B	673 ± 11%	<38 ± 132%	3,5 ± 12%

A - margem direita do dique, 100 m do dique, 3 a 4-6-98  
 B - 10 km a montante do dique, 2 a 3-6-98  
 C - margem direita do dique, 500 m do dique, 3 a 4-6-98  
 D - 10 km a montante do dique, castanheira, 2 a 3-6-98  
 E - margem direita do dique, 1000 m do dique, 3 a 4-6-98

**Tabela 16** – Hidrelétrica de Samuel - medidas com câmaras de difusão

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
22:46		I	2.375	6.148
12:41	4,5	A	236	10.488
17:38	4,5	B	20	3.980
23:41	4,5	C	24	9.839
11:11	4,5	D	348	16.345
12:00	4,5	E	72	14.058
23:07	4,5	C	9,3	7.302
15:49	5	C	10	3.364
14:56	10	C	11	11.956
9:31	10	F	70	15.434
16:27	16	G	6,7	2.313
14:15	17	A	4,9	7.306
16:07	20	H	5,8	5.577
23:29	20	H	4,8	3.012
18:03	24	B	15	6.319
13:40	25	A	6,6	11.013
00:08	34	H	34	11.227
17:19	30	I	17	7.343
23:20	30	I	10	4.939
15:32	30	I	5,3	3.779

A - 10 km a montante do dique  
 B - paliteiro do cabo  
 C - cabo  
 D - dique  
 E - dique margem direita

F - Catanheira  
 G - 1km do dique da margem direita  
 H - paliteiro  
 I - M1

**Tabela 17** – Hidrelétrica de Tucuruí - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
4	A	0,88	< 0,01	0,003
5	B	189 ± 54%	106 ± 59%	0,96 ± 51%
6	C	0,83	< 0,01	0,002
10,8	D	47	22	0,23
11	E	12	1,5	0,05
16	B	86	7,2	0,24
19	D	47	31	0,29
27	E	12	2,4	0,06
29	B	22	4,8	0,08
39	B	2,2	< 0,03	0,007

A - Pucuruí, macrófitas

B - região 19 (15 km a montante da barragem)

C - Caraiapé, macrófitas

D - Pucuruí

E - Caraiapé

**Tabela 18** – Hidrelétrica de Tucuruí - medidas com câmaras de difusão

Horário	Profundidade (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)
12:15	4	A	91	11.685
14:29	5	B	13	7.200
00:17	5	B	7,3	5.045
10:18	5	B	39	3.740
12:42	6	C	74	14.905
11:54	6	C	1.827	1.314
09:12	6	C	2.889	2.416
12:50	10,8	A	12	-11.761
13:15	11	C	49	2.843
00:11	11	C	0,03	1.875
09:43	11	C	-248	3.720
14:58	16	B	6,6	2.760
23:54	16	B	9,0	1.934
10:52	16	B	23	2.635
13:19	19	D	19	6.615
13:56	27	C	66	14.966
00:37	27	C	34	4.868
10:17	27	C	-563	142.723
15:34	29	B	17	1.768
23:32	29	B	7,8	1.954
16:15	39	B	12	1.975
01:01	39	B	11	2.489
11:44	39	B	25	12.296

A - Pucuruí- Funai

B - km 19 (15 km a montante da barragem)

C - Caraiapé

D - Pucuruí (atrás da ilha da Castanheira)

## 4.2.2 Resultados da segunda campanha

**Tabela 19** – Hidrelétrica de Miranda - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
5	A	121,2	56,4	0,44
5	B	69,3	72,6	0,72
5	C	71,9	66,3	0,87
10	A	98,3	42,2	0,29
10	B	6,9	0,45	0,01
10	C	19,8	4,7	0,08
17	C	19,2	3,3	0,08
20	A	43,6	5,6	0,09
23	B	13,3	3,0	0,04
37	A	4,0	<0,03	0,01
40	B	12,5	0,3	0,02
40	C	38,9	20,4	0,21

A - sítio Barragem. Temp. do ar 28°C, água 29°C. Hora 17:15. Dia 7-12-98. Coord: 18° 54' 30,7" S e 48° 01' 17,8" W.

B - sítio Furnas. Dia 8-12-98. Hora 17:20.

C - sítio Posses. Temperatura do ar 31°C, da água 28°C. Dia 9-12-98. Hora 16:45.

**Tabela 20** – Hidrelétrica de Miranda - medidas com câmaras de difusão

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
17:57	5	A	11,03	2.840	28,0	29,0	6,97	<1,0	5,22	991,18
05:37	5	A	83,60	41.358	23,0	26,0	6,90	<1,0	3,64	732,67
15:58	5	A	14,06	2.305	27,0	28,0	6,90	3,0	12,74	709,00
19:08	5	B	58,31	-1.834	29,0	28,0	?	<1,0	56,11	457,33
06:09	5	B	13,77	7.364	19,0	26,0	6,95	<1,0	10,17	735,63
13:44	5	B	21,61	1.238	30,0	28,0	6,87	1,5	17,21	944,97
17:07	5	C	38,00	3.580	31,0	28,0	5,50	2,0	12,48	470,67
06:39	5	C	6,94	4.172	22,0	25,0	6,00	<1,0	5,18	1.015,90
16:19	5	C	168,20	2.046	28,0	27,8	6,90	0,0	4,55	872,08
18:20	10	A	19,72	5.923	29,0	27,0	6,97	4,0	17,41	1.451,40
06:05	10	A	3,76	-20.194	23,0	26,0	6,90	<1,0	5,16	742,00
15:33	10	A	12,18	5.550	27,0	28,0	6,90	3,0	10,33	785,91
18:42	10	D	40,83	2.246	29,0	28,0	?	1,0	28,81	598,67
06:30	10	B	11,42	3.366	19,0	26,0	6,95	1,0	9,51	826,61
14:32	10	B	23,50	2.103	30,0	28,0	6,87	<1,0	21,83	685,74
17:34	10	C	56,09	223	31,0	28,0	5,50	2,5	55,67	402,84
06:18	10	C	7,33	3.488	22,0	25,0	6,00	<1,0	4,90	1.142,4
15:45	10	C	30,00	7.095	28,0	27,8	5,00	4 a 5	16,13	1.551,9
17:56	17	C	28,87	2.890	31,0	28,0	5,50	2,0	27,28	615,31
15:06	17	C	21,28	7.622	28,0	27,8	5,00	4,00	22,81	2.270,9
18:45	20	A	13,05	6.966	28,0	29,0	6,97	3,00	9,78	864,44
06:23	20	A	93,38	1.458	23,0	26,0	6,90	<1,0	3,41	1.043,0
15:11	20	A	14,14	3.054	27,0	28,0	6,90	3,0	17,15	1.097,5
05:57	20	C	7,31	7.884	22,0	25,0	6,00	0,5	4,89	1.180,2
17:31	23	B	51,33	5.184	29,0	28,0	?	3,0	47,90	949,74
06:50	23	B	6,99	1.306	19,0	26,0	6,95	1,0	5,14	634,00
15:03	23	B	6,33	2.237	30,0	28,0	6,87	2,5	10,35	740,10
19:30	37	A	4,58	2.095	28,0	29,0	6,97	<1,0	5,53	1.075,00
07:05	37	A	2,19	1.619	23,0	26,0	6,90	<1,0	3,42	929,48
14:47	37	A	26,40	2.377	27,0	28,0	6,90	4,0	25,89	1.112,90
18:18	40	B	26,89	3.034	29,0	28,0	?	2,0	24,91	888,15
07:07	40	B	5,85	2.602	19,0	26,0	6,95	1,5	5,65	706,50
15:30	40	B	16,18	361	30,0	28,0	6,87	6,0	17,41	525,29
18:13	40	C	19,21	743	31,0	28,0	5,50	3,5	22,15	703,96
05:34	40	C	6,84	5.179	22,0	25,0	6,00	0 a 1,5	4,34	2.138,20
14:07	40	C	15,19	7.173	28,0	27,8	5,00	1,0	15,52	2.095,50

A - barragem

B - Furnas

C - Posses

D - ponte de Furnas

**Tabela 21** – Hidrelétrica de Três Marias - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
4	A	125,2	112,9	0,63
4	B	>79,7	>402,5	>23,3
5	C	81,3	331,8	9,4
5	D	0,72	0	na
7	E	0,95	0	na
7	A	0,28	0	na
9	E	1,35	0	na
9	B	3,2	0,65	0,01
20	A	26,7	24,1	0,14
29	E	1,09	0	na
29	B	5,4	0,04	0,01

na - não analisado

A - sítio Córrego dos Borrachudos no primeiro braço esquerdo, Cabana. Temperatura do ar 24°C e da água 25°C, término da chuva e aparecimento do sol. Início dia 2-3-99, 14:25 horas; final dia 3-3-99 as 9:30.

B - sítio Córrego do Boi. Temperatura do ar 24°C e da água 25°C. Choveu durante a noite, dia ensolarado. Início dia 3-3 às 11:00 horas até dia 4-3 às 08:45.

C - sítio Córrego do Boi. Início 4-3 as 08:30 até as 14:40.

D - sítio Rio São Francisco. Temperatura do ar 28°C e da água 28°C. Início 4-3 às 10:20 horas até 5-3 às 08:57 horas.

E - sítio próximo à Barragem, em frente ao hotel

**Tabela 22** – Hidrelétrica de Três Marias - medidas com câmaras de difusão

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
14:23	4	A	6,03	3.442	24,0	25,0	7,00	0,0	6,12	685,05
09:25	4	A	falhou	3.204	25,0	28,0	7,00	1,5	falhou	1.011,60
11:14	4	B	49,13	1.239	26,0	28,0	5,70	2,0	35,89	773,65
08:24	4	B	6,82	3.027	25,0	28,0	6,30	<1,0	3,43	767,68
10:26	5	C	3,28	625	28,0	28,0	5,20	2,5	4,58	607,73
14:52	5	B	70,75	-241	32,0	30,0	7,30	?	78,35	473,89
15:40	5	C	5,66	-401	32,0	30,0	6,30	3,0	6,29	445,33
08:25	5	C	0,00	1.613	24,0	27,5	7,00	2,0	3,98	547,94
18:00	7	D	2,34	1.518	24,0	26,0	6,90	2,5	4,11	777,45
08:48	7	D	0,66	7.346	24,0	26,0	6,90	3,0	2,68	714,27
14:45	7	A	1,85	1.011	24,0	25,0	7,00	0,0	3,55	630,11
08:56	7	A	3,93	7.067	25,0	28,0	7,00	2,5	4,87	923,10
15:28	7	C	4,25	2.034	29,0	28,0	5,90	3,0	5,69	654,73
10:04	8	C	2,14	580	28,0	28,0	5,20	2,5	4,09	688,72
15:57	8	C	5,31	-168	32,0	30,0	6,30	3,0	5,75	388,41
18:33	9	D	1,72	1.582	24,0	26,0	6,90	2,5	3,46	832,90
09:08	9	D	1,56	3.990	24,0	26,0	6,90	1,0	2,94	791,18
11:46	9	B	5,91	856	26,0	28,0	5,70	1,0	7,80	770,62
08:50	9	B	11,40	4.176	25,0	28,0	6,30	1,0	3,56	527,78
15:52	16	C	5,63	4.719	29,0	28,0	5,90	1,5	7,22	613,09
15:15	20	A	3,04	2.649	24,0	25,0	7,00	0,0	2,93	946,34
09:34	20	A	2,34	3.266	25,0	28,0	7,0	3,0	3,76	1.371,9
09:28	29	D	2,10	2.512	24,0	26,0	6,90	1,5	2,54	871,98
12:15	29	B	4,26	2.018	26,0	28,0	5,70	2,5	5,82	497,49
09:15	29	B	2,10	1.559	25,0	28,0	6,30	1,0	3,86	644,04

A - córrego dos Borrachudos

B - córrego do Boi

C - rio São Francisco

D - região próxima à barragem, em frente ao hotel

**Tabela 23** – Hidrelétrica de Barra Bonita - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
5	A	5,76	<0,05	0,14
5	B	3,59	10,94	0,002
5	C	2,88	<0,03	0,002
5	D	34,55	10,39	0,19
10	E	23,76	1,91	0,02
10	B	4,61	0,0004	0,01
10	F	21,30	2,06	0,15
12	G	56,88	15,48	0,04
18	H	6,78	3,60	0,01
21	B	16,34	0,45	0,01

- A - sítio Ancoradouro P1. Localizado a 22<sup>o</sup>C 31' 18,9" S e 48<sup>o</sup>C 31' 47" W. Temperatura do ar 22°C e da água 23,5°C. Dia 3/11/98. Hora 19:14 Comentário: algas nos funis.
- B - sítio Brejão. Temperatura do ar 25°C e da água 26°C. Dia 4/11/98. Hora 18:00. Comentário: muitas algas nos gasômetros.
- C - sítio rio Piracicaba P8. Temperatura do ar 29°C, da água 28°C. Velocidade do vento 2 m / s. pH=9,05. Dia 5/11/98. Hora 16:10.
- D - sítio rio Tietê P10. Temperatura do ar 29°C e da água 28°C. Velocidade do vento 4 m / s. pH=8,6. Dia 5/11/98. Hora 16:10.
- E - sítio Ancoradouro P2 localizado a 22<sup>o</sup>C 31' 16" S e 48<sup>o</sup>C 31' 50" W. Dia 3/11/98. Hora 19:14. Temperatura do ar 22°C, da água 23,5°C. Comentário: algas nos funis.
- F - sítio rio Tietê P9. Temperatura do ar 29°C, da água 28°C. Velocidade do vento 4 m / s. pH = 8,6. Data 5/11/98. Hora 16:10.
- G - sítio rio Piracicaba P7. Temperatura do ar 29°C, da água 28°C. Velocidade do vento 2 m / s. pH=9,05. Dia 5/11/98. Hora 16:10.
- H - sítio Ancoradouro P3 localizado a 22° 31' 20,5" S e 48° 31' 53,9" W. Temperatura do ar 22°C e da água 23,5°C. Dia 3/11/98. Hora 19:14 Comentário: algas nos funis.

**Tabela 24** – Hidrelétrica de Barra Bonita - medidas com câmaras de difusão

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
10:07	5	A	28,7	8.324	20,0	23,0	7,40	3,0	18,84	962,18
15:08	5	B	15,2	551	30,5	25,5	-	0,0	11,44	672,52
15:23	5	B	18,0	4.512	30,5	25,5	-	-	10,44	643,75
23:50	5	C	20,3	2.297	19,5	23,5	-	0,0	26,64	1113,8
10:10	5	D	17,2	83	22,0	24,0	-	0,5	12,57	472,33
16:54	5	E	22,2	-1.922	29,0	28,0	9,05	2,0	14,84	262,03
18:24	5	F	9,8	1.151	25,0	26,0	-	4,0	10,93	556,22
11:15	5	G	14,0	-8.400	27,5	26,5	-	0,5	10,07	346,37
13:27	5	G	5,1	7.319	27,5	26,5	-	0,5	5,36	2129,9
10:27	10	H	31,4	6.200	20,0	23,0	-	4,0	21,23	970,18
15:54	10	B	20,3	856	30,5	25,5	-	0,0	18,92	666,76
00:06	10	I	8,67	523	19,5	23,5	-	?	7,54	657,10
09:52	10	D	19,4	-	22,0	24,0	-	0,5	12,08	-
18:00	10	J	20,5	-20.391	28,5	28,0	8,60	4,0	6,16	289
12:50	10	G	9,1	-	27,5	26,5	-	1,0	7,41	-
16:32	12	K	19,0	falhou	29,0	28,0	9,05	2,0	19,77	falhou
11:50	12	G	23,6	-	27,5	26,5	-	0,3	6,74	-
10:49	18	L	59,3	2.562	20,0	23,0	-	4,0	43,51	1617,6
16:17	18	B	falhou	falhou	30,5	25,5	-	-	falhou	falhou
00:26	18	M	13,14	2.097	19,5	23,5	-	-	11,43	761,87
09:31	21	D	15,9	18.831	22,0	24,0	6,67	1,0	13,97	591

A - ancoradouro CESP P1

B - ancoradouro CESP (próximo ao reservatório)

C - sítio P1

D - brejão

E - rio Piracicaba P8

F - rio Tietê P10

G - rio Piracicaba

H - ancoradouro CESP P2

I - sítio P2

J - rio Tietê P9

K - rio Piracicaba P7

L - ancoradouro CESP P3

M - sítio P3

**Tabela 25** – Hidrelétrica de Segredo - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade metros	sítio	[N <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CH <sub>4</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CO <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia
5	A	10,3	0,8	0,02
5	B	27,6	15,4	0,10
5	C	20,5	1,7	0,07
10	A	17,1	2,6	0,03
10	C	0,57	0	não analisado
11	B	0,82	0	0
20	B	0,84	0	0
20	C	138,5	14,8	0,25
35	A	0,96	0	0
42	C	161,8	5,5	0,16
48	B	0,84	0	0
58	A	0,9	<0,01	0

A - sítio Barragem / Paliteiro. Localizado a 27° 47'42" S e 52° 07' 58,4" W. pH 7,15. Temperatura do ar 27°C e da água 24°C. Velocidade do vento 5,0 m/s nordeste. Dia 23/11/98. Hora 11:00

B - sítio Rio Covó. Temperatura do ar 24°C e da água 23,5°C. Data 24/11/98. Hora 11:00

C - sítio Bragança. Temperatura do ar 24°C e da água 26°C. pH=7,1. Data 25-11-98. Hora 11:00

**Tabela 26** – Hidrelétrica de Segredo - medidas com câmaras de difusão

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	PH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
11:41	5	A	7,08	6.934	27,0	24,0	7,15	5,0	5,34	666,67
18:11	5	A	2,22	-315	30,0	28,0	7,39	0,0	2,84	412,04
05:34	5	A	3,30	2.103	20,0	25,0	7,20	5,0	4,54	508,05
11:15	5	B	8,87	4.884	24,0	23,5	7,10	3,0	4,85	820,27
17:51	5	B	3,73	11.336	29,0	26,0	7,10	<1,0	5,12	473,00
06:15	5	B	falhou	-4.688	21,0	23,0	7,20	<1,0	falhou	530,89
10:54	5	C	falhou	-597	24,0	26,0	7,10	1,0	falhou	289,19
17:45	5	C	8,39	-959	27,0	26,5	8,00	2,5	10,44	271,66
05:28	5	C	7,24	-16.218	20,0	25,0	7,10	0,0	3,43	508,33
12:05	10	A	5,96	1.707	27,0	24,0	7,15	3,0	5,93	1071,10
18:29	10	A	3,04	5.447	30,0	28,0	7,39	0,0	2,36	414,33
05:51	10	A	2,14	3.377	20,0	25,0	7,20	5,0	3,77	426,76
18:14	10	B	4,24	453	29,0	26,0	7,10	<1,0	5,22	547,30
06:32	10	B	3,27	-165	21,0	23,0	7,20	0,0	3,39	480,94
11:10	10	C	5,82	378	24,0	26,0	7,10	<1,0	2,67	445,12
18:04	10	C	9,24	-2.825	27,0	26,5	8,00	3,0	9,62	219,92
05:44	10	C	9,96	401	20,0	25,0	7,10	0,0	3,77	532,87
11:36	11	B	5,79	5.913	24,0	23,5	7,10	2,0	6,50	808,47
11:52	20	B	2,51	2.608	24,0	23,5	7,10	2,0	4,42	998,44
18:27	20	B	4,89	-7.069	29,0	26,0	7,10	<1,0	3,72	434,67
06:49	20	B	3,24	-2.101	21,0	23,0	7,20	?	3,46	470,48
11:25	20	C	6,26	-4.697	24,0	26,0	7,10	<1,0	2,87	415,33
18:21	20	C	12,64	-3.921	27,0	26,5	8,00	1,0	3,65	319,05
06:01	20	C	4,53	-1.699	20,0	25,0	7,10	<1,0	5,30	444,52
12:27	35	A	3,58	1.471	27,0	24,0	7,15	2,0	4,89	667,93
18:49	35	A	14,59	305	30,0	28,0	7,39	0,0	1,91	418,00
06:08	35	A	3,32	10.809	20,0	25,0	7,20	1,0	4,64	453,67
11:41	42	C	4,59	-355	24,0	26,0	7,10	<1,0	3,63	305,41
06:18	43	C	10,57	696	20,0	25,0	7,10	<1,0	4,71	567,08
12:10	48	B	2,50	2.717	24,0	23,5	7,10	1,0	2,92	766,95
18:48	48	B	7,51	520	29,0	26,0	7,10	<1,0	3,00	524,34
07:06	48	B	6,33	-759	21,0	23,0	7,20	?	2,53	335,77
12:53	58	A	5,08	-9.627	27,0	24,0	7,15	1,0	3,08	553,67
19:07	58	A	3,14	7.367	30,0	28,0	7,39	0,0	4,01	409,00
06:25	58	A	2,96	7.593	20,0	25,0	7,20	2,0	4,18	445,00

A - Barragem

B - rio Covó

C - Bragança

**Tabela 27** – Hidrelétrica de Xingó - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
4	A	2,8	1,26	0
5	B	46,4	2,08	0,07
5	C	29,9	32,2	0,13
5	D	193,0	407,3	1,9
6	C	11,1	0,78	0,01
11	B	38,8	2,04	0,06
12	A	12,0	16,0	0,0004
21	B	8,6	0	0,01
22	A	3,2	1,93	0

A - sítio riacho Cabeça de Nego, penúltimo braço direito antes da barragem. Paliteiro entre as margens, distantes entre si por 100m. Temperatura do ar 31°C, água 30°C; pH 7,66. Início 25-3-99 às 11:00 horas; fim 25-3-99 às 14:55 horas.

B - sítio Carranca, próximo à barragem, com uma faixa de paliteiro nessa profundidade. Temperatura do ar 32°C, água 28°C; pH 7,8. Início 24-3-99 às 10:02; fim 25-3-99 às 09:05.

C - sítio entrada do Talhado. Início 25-3-99 às 16:00 horas, fim 26-3-99 às 14:11.

D - sítio riacho Uruçu, braço direito do reservatório. Início 26-3-99 às 09:20; fim 26-3-99 às 14:36.

**Tabela 28** – Hidrelétrica de Xingó - medidas com câmaras de difusão

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
09:50	2	A	92,90	15.510	29,0	29,0	7,28	0,0	27,18	528,33
14:48	4	B	33,68	16.438	32,0	30,5	7,40	1,0	26,55	531,00
10:57	4	B	32,95	13.671	31,0	30,0	7,66	1,0	28,14	412,00
11:05	4	C	9,60	-5.543	31,0	29,0	7,90	0,0	7,98	317,61
10:45	5	D	4,46	11.201	32,0	28,0	7,80	0,0	2,75	373,67
16:09	5	D	5,37	-1.320	34,0	29,0	8,10	1,5	3,37	295,65
16:33	5	E	falhou	-3.135	33,0	30,0	7,25	2,5	falhou	105,18
17:01	5	E	9,73	-1.337	33,0	30,0	7,25	3,0	10,41	235,27
09:29	5	A	49,93	3.149	29,0	29,0	7,28	2,0	50,48	679,67
14:58	5	A	62,76	-1.724	34,0	30,0	7,90	0,0	46,79	411,50
15:18	5	A	82,85	2.091	34,0	30,0	7,90	1,0	7,45	399,00
15:36	5	A	48,16	838	34,0	30,0	7,90	1,0	15,10	423,00
17:22	6	E	falhou	-1.253	33,0	30,0	7,25	3,0	falhou	11,19
10:21	6	C	11,19	falhou	31,0	29,0	8,00	3,5	11,28	falhou
09:07	7	A	falhou	17.239	29,0	29,0	7,28	1,0	falhou	717,00
15:10	10	B	42,45	-1.359	32,0	30,5	7,40	1,0	20,98	398,13
09:45	11	D	9,99	-3.069	32,0	28,0	7,80	2,5	5,65	412,55
16:31	11	D	3,54	-5.614	34,0	29,0	8,10	0,0	4,16	353,67
10:43	11	C	12,28	-2.235	31,0	29,0	8,00	1,0	3,60	332,94
10:31	12	B	48,23	612	31,0	30,0	7,66	2,0	42,62	532,53
15:34	17	B	25,04	-1.057	32,0	30,5	7,40	2,5	18,00	105,33
10:13	21	D	6,86	912	32,0	28,0	7,80	1,5	7,72	400,33
16:52	21	D	4,81	-341	34,0	29,0	8,10	0,0	3,64	310,65
10:04	22	B	46,60	falhou	31,0	30,0	7,66	2,0	41,46	falhou

A - riacho Uruçu, um braço do reservatório

B - riacho Cabeça de Nego, penúltimo braço antes da barragem

C - Cacamonhê, um braço direito do reservatório

D - Carranca, próximo à barragem

E - boca do Talhado

**Tabela 29** – Hidrelétrica de Samuel - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade metros	sítio	[N <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CH <sub>4</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia	[CO <sub>2</sub> ] kg/km <sup>2</sup> /dia
4	A	47,7	24,0	0,79
5	B	77,6	37,6	1,20
9	A	29,8	12,7	0,30
10	B	4,00	0,19	0,02
16	A	2,00	0,04	0,01
21	B	1,42	0,07	0,01

A - sítio Dique Direito, dentro do início do paliteiro. Coord. S 8° 44' 38,5'' e W 63° 25' 43''.

B - sítio no meio do paliteiro, em frente à Ilha da Castanheira. Coord. S 8° 46' 43,4'' e W 63° 23' 43,1''.

**Tabela 30** – Hidrelétrica de Samuel - medidas com câmaras de difusão

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
11:12	4	A	14,61	11.814	28,5	29,5	6,90	1	9,15	2.570,30
15:08	4	A	10,89	9.184	31,0	31,0	6,90	1	9,54	2.336
11:29	5	B	10,75	4.145	30,0	29,5	7,00	0	10,81	1.520,70
14:54	6	C	11,97	24.283	32,0	31,5	6,40	1	14,12	3.213,10
11:29	9	A	6,99	7.150	28,5	29,5	6,90	2	6,46	2.399,10
11:07	10	B	9,18	4.672	30,0	29,5	7,00	0	8,47	1.403,20
17:11	10	B	9,27	3.420	29,5	32,0	6,99	-	6,51	1.365,40
13:57	10	B	15,86	2.209	30,0	33,0	7,00	<1	8,27	801,10
16:03	16	A	9,73	4.813	31,0	31,0	6,90	0	8,72	1.833,00
10:22	21	B	6,13	4.416	30,0	29,5	7,00	0	7,95	1.398,96
16:52	21	B	6,53	3.302	29,5	32,0	6,99	-	9,04	1.325,95
09:35	21	B	17,16	4.331	30,5	30,5	6,92	0	6,52	932,33
09:53	21	B	11,76	4.753	30,5	30,5	6,92	0	5,99	1.049,27

A - dique direito

B - ilha da Castanheira

C - lago Espanha, um lago natural

**Tabela 31** – Resumo das medidas com a câmara grande (17,05 L)

Horário	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)
15:10	4	A	52,29 (nt)	3.786 (nt)	31,0	31,0	7,06	1,5
10:24	21	B	2,10	1.551	31,0	29,5	7,00	0
09:19*	21	B	11,52	911	30,5	30,5	6,92	0
09:19*	21	B	1,61	413	30,5	30,5	6,92	0
13:40	10	B	8,11	1.606	30,0	33,0	7,00	<1,0
13:40	10	B	7,85	1.284	30,0	33,0	7,00	<1,0

nt - não termostatizado

\* - condições de luz com filme 100 ASA: F16 e 1/1000 segundo

A - dique direito

B - ilha da Castanheira

C - lago Espanha, um lago natural

**Tabela 32** – Hidrelétrica de Tucuruí - valores médios de liberação de gases por bolhas

Profundidade	sítio	[N <sub>2</sub> ]	[CH <sub>4</sub> ]	[CO <sub>2</sub> ]
metros		kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia	kg/km <sup>2</sup> /dia
5,5	A	6,64	1,15	0,03
6	B	170,7	0,92	0,50
9	A	34,8	21,2	0,07
12	B	23,9	0,12	0,04
21	B	0,55	0	n.a.
23	A	2,75	0	0

A - sítio Repartimento, região de macrófitas. Temperatura do ar 33°C e da água 32°C; pH 7,6. Funis colocados dia 9-6-99 e retirados dia 10-6-99.

B - sítio km 19, aproximadamente 7 km à montante da barragem, margem esquerda. Temperatura do ar e da água 31°C; pH 7,5. Funis colocados dia 10-6-99 e retirados dia 11-6-99.

**Tabela 33** – Hidrelétrica de Tucuruí - medidas com câmaras de difusão

Horário	Amostra	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)	Conc. CH <sub>4</sub> (ppm)	Conc. CO <sub>2</sub> (ppm)
18:06	5C	6	A	4,44	32.961	31,0	31,0	7,5	<1	6,03	487,33
18:19	6P	6	A	6,84	2.118	31,0	31,0	7,5	<1	5,50	-
11:45	1C	9	B	8,95	-457	33,0	32,0	7,6	<1	7,28	260,35
12:00	2P	9	B	6,37	-1.451	33,0	32,0	7,6	<1	7,30	323,78
10:57	8C	9	B	13,04	4.251	30,0	31,0	7,5	1	13,40	658,80
11:11	8P	9	B	7,86	481	30,0	31,0	7,5	1	7,14	762,33
09:32	13C	9	C	9,63	3.443	28,5	30,0	7,3	3	10,77	1619
09:49	14P	9	C	8,69	2.912	28,5	30,0	7,3	3	7,00	1.209,98
15:47	16C	10	D	13,41	1.750	31,5	32,0	7,5	0	10,76	706,20
16:01	17P	10	D	8,29	25.846	31,5	32,0	7,5	0	7,69	625,33
17:30	11C	14	C	28,53	1.926	31,0	31,0	7,5	3	13,48	1.033,39
17:46	12P	14	C	14,71	4.417	31,0	31,0	7,5	3	11,58	784,42

Câmaras de difusão de 50 mL a 25 cm (C) e 50 cm (P) da superfície.

A - próximo à barragem      B - Repartimento      C - km 19      D - Caraiapé

**Tabela 34** – Resumo das medidas com a câmara grande (17,05 L) termostalizada

Horário	Amostra	Prof. (m)	Sítio	Difusão CH <sub>4</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Difusão CO <sub>2</sub> (kg/km <sup>2</sup> /dia)	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	pH	Vento (m/s)
18:00	7G	6	A	7,45	941	31,0	31,0	7,5	<1,0
11:25	3G	9	B	4,72	1.077	33,0	32,0	7,6	<1,0
11:35	4G	9	B	4,08	679	33,0	32,0	7,6	<1,0
10:42	10G	9	B	3,55	1.057	30,0	31,0	7,5	1,0
09:22	18G	9	C	10,5	3.070	28,5	30,0	7,3	3,5
15:44	15G	10	D	0,68	-1.263	31,5	32,0	7,5	0,0
15:44	15G(2)	10	D	0,64	654	31,5	31,5	32,0	0,0
17:17	12G	14	C	18,2	3.478	31,0	31,0	7,5	3,0

A - próximo à barragem      B - Repartimento      C - km 19      D - Caraiapé

### 4.3 Descrição da extrapolação dos dados de análise para o reservatório

Para se avaliar a emissão em cada um dos reservatórios selecionados, foi eleito o procedimento por amostragem em diversos pontos do reservatório, com subsequente extrapolação dos resultados para se obter um valor para o reservatório todo.

Este modo de proceder contrasta com o que, às vezes, é chamado de “o procedimento da torre”, onde se mede a flutuação da concentração no ar do gás, neste caso CO<sub>2</sub>, a certa altura sobre o reservatório, e se mapeiam velocidades de vento, horizontais e verticais. A partir de medidas executadas sob diversas direções do vento, pode-se calcular a emissão do reservatório. Não foi utilizado o procedimento da torre pois além de seu alto custo e à falta de portabilidade do equipamento, a torre alcançava apenas uma pequena área quando contrastada com a área total do reservatório.

As medidas seguiram uma rotina bem estabelecida, contrastando com a “generalização” dos resultados, que devem ser vistos com reservas e podem constituir fonte de incertezas, afetando os resultados finais.

Devido às condições existentes, as medidas precisavam ser pontuais, não apenas no sentido local, mas também temporalmente. De fato apenas duas séries de medidas eram exequíveis e ocorreram com um intervalo de seis meses. Essa escassa frequência temporal também constitui fonte de incerteza mas, em termos práticos, não seria viável aumentá-la.

Quanto aos critérios de se obter médias ponderadas das taxas de emissão expressas, por exemplo, em kg CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/dia, e válidas para um dado reservatório, houve evolução nos procedimentos.

Em trabalho prévio realizado, sob auspícios da Eletrobrás, extensivo aos reservatórios de Balbina, Samuel e Tucuruí em 1993, observou-se que havia forte relação com tipo de ambiente e a taxa de emissão de metano por bolhas. Os ambientes percebidos como diferentes eram paliteiro, calha e aqueles ocupados por vegetação terrestre, entre períodos anuais de inundação. Ao incluir dados de outros reservatórios, novas variáveis passaram a ser percebidas como importantes no estabelecimento do regime de emissão. Essas eram: profundidade do local, tipo de vegetação inundada, idade do afogamento, temperatura da água, regime de ventos e intensidade da correnteza.

Tais características complementam o critério anteriormente adotado, na medida em que a idade do afogamento aumenta, a profundidade do local determina predominantemente a emissão por bolhas, embora afete pouco a difusão. Uma característica surpreendente constatada e que afeta a troca

difusiva, incluindo a difusão e a absorção, foi a concentração do gás carbônico dissolvido na água, apresentando uniformidade numa grande faixa de latitudes, temperaturas, etc.

Independentemente das demais características, a tensão osmótica do CO<sub>2</sub> fica em torno dos 1.000 ppm (expressa como concentração de CO<sub>2</sub> no ar que estaria em equilíbrio com o dissolvido na água).

Também foi possível fazer esta medida para um lago natural, lago Nahuel Huapi, situado em latitude 42° S, em clima temperado de altitude (700 m) e se confirmou a uniformidade da tensão osmótica com 978 ppm de CO<sub>2</sub>. No lago Loch Ness, em latitude 57° N, foram constatados 1.200 ppm.

A relativa uniformidade de concentração de gás carbônico na água proporciona um grande significado aos ventos no estabelecimento dos regimes de emissão. Na ausência de vento, logo acima da superfície da água, estabelece-se uma camada de alta concentração de CO<sub>2</sub>, onde ocorre a mesma pressão parcial (1000 ppm CO<sub>2</sub>) do gás dissolvido na água. Em alturas maiores, existem no ar 360 ppm de CO<sub>2</sub>, valor médio da atmosfera terrestre. Com o gradiente de concentração uniforme, o cálculo para esta situação resulta em pequeno valor, pois é obtido a partir da divisão da diferença entre as concentrações pela distância, que é muito grande. Como a taxa de difusão é proporcional ao gradiente, há pouca difusão.

Na presença de vento, a constante mistura de ar superficial promove a difusão, pois continuamente leva o CO<sub>2</sub> despreendido e o repõe com ar de mais baixa concentração do gás. O regime de ventos tem forte dependência com a latitude. Em pequena faixa equatorial há tendência à calmaria, entretanto, nas baixas latitudes tropicais, ocorrem os ventos alísios fortes e constantes.

No reservatório de Xingó, esse regime de vento é prontamente percebido. No limite dos trópicos há nova faixa de pouco vento, como por exemplo em Barra Bonita, podendo-se notar o aumento de intensidade do vento ao se avançar para latitudes temperadas, como no caso do reservatório de Segredo.

Com estas variáveis em mente, estabeleceu-se um plano de coleta de gases fortemente calcado em faixas de profundidade. Esse enfoque engloba o critério anterior: as baixas profundidades coincidem com as áreas periodicamente expostas e colonizadas por nova vegetação terrestre e as maiores coincidem com as regiões de “calha”.

Assim, podem-se obter dados precisos sobre que proporção do reservatório situa-se em cada faixa de profundidade, eliminando-se a necessidade do julgamento subjetivo sobre a quantidade de área que é ocupada por, digamos, paliteiros.

#### **4.3.1 O problema da relação Cota x Área dos reservatórios**

No reservatório de Serra da Mesa notou-se, nos primeiros meses após o enchimento do lago, nítida dependência entre a taxa de emissão de  $\text{CH}_4$  por bolhas e a profundidade. Por isso foi usada uma tabela cota x área, fornecida por Furnas, para a extrapolação das medições para toda a área do reservatório.

Nos reservatórios estabilizados essa dependência permanece, mas não é tão evidente, para a faixa de zero a cerca de 20 metros de profundidade. Para o resto da área não há emissão de bolhas e a difusão é essencialmente uniforme. Nesse caso também era necessário o conhecimento da topografia dos reservatórios para que as extrapolações pudessem ser feitas.

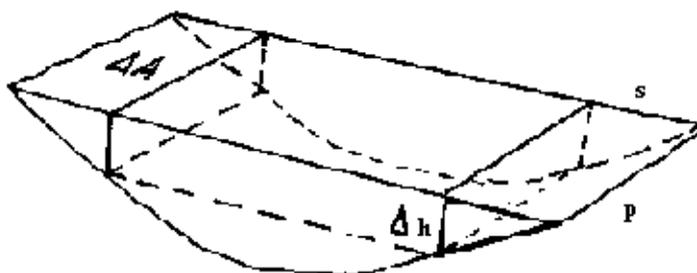
Normalmente as curvas cota x área seriam obtidas do SIPOT - Sistema do Potencial Hidrelétrico Brasileiro, junto à Eletrobrás. Infelizmente não estavam disponíveis tais tabelas para todos os reservatórios do presente trabalho.

Devido a esse fato, procedeu-se a um cálculo teórico da relação cota-área, empregando-se um modelo geométrico para todos os reservatórios pesquisados, sendo os resultados aferidos com alguns dados disponíveis pelo SIPOT. Os valores calculados no modelo geométrico, aferidos com os dados disponíveis, mostraram uma discrepância entre 15 a 20%.

As tabelas obtidas não estão completas e reproduzem áreas para as regiões pouco profundas, que, no entanto, são as mais importantes. É possível estender, por cálculo, tais tabelas para regiões mais profundas.

A Figura 3 mostra as seções de corte representadas para o cálculo empregado no modelo geométrico.

**Figura 3** – Porção do reservatório mostrada como corte, exibindo faixa de área  $\Delta A$ , parte do perímetro  $p$ , largura  $s$  da faixa, e incremento de altura  $\Delta h$



Para a realização do cálculo de áreas é apreciada a inclinação das margens de alguns reservatórios; por processo baseado em modelo geométrico, usando os símbolos da Figura 3, também se pode calcular a largura  $s$  da faixa notando que

$$\Delta A = p.s, \text{ ou} \quad s = \Delta A/p$$

e a inclinação em percentual será:

$$i = 100 \Delta h/s$$

A partir dos perímetros e faixas de área disponíveis para alguns reservatórios, obteve-se a seguinte tabela de inclinações:

**Tabela 35** – Inclinação das margens de alguns reservatórios.

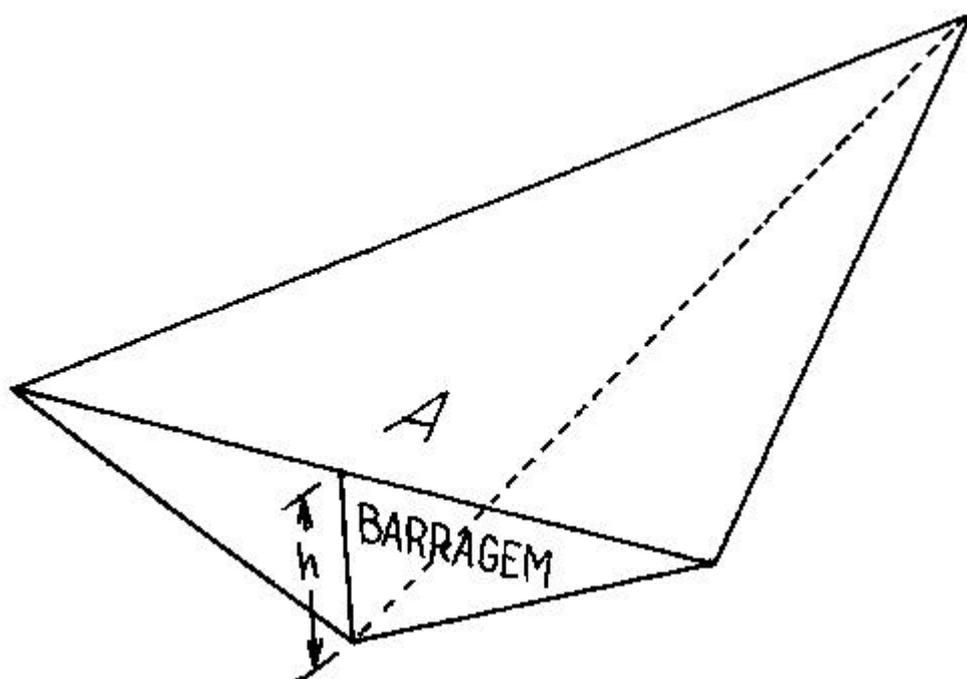
Reservatório	Inclinação (%)
Samuel	0,7
Tucuruí	5,0
Barra Bonita	4,3
Três Marias	5,0
Miranda	7,8

Da Tabela 35, conclui-se que o reservatório de Samuel apresenta um padrão diferenciado, por ter baixíssima inclinação de seu fundo. As demais da tabela apresentam um comportamento similar.

Com isto, pode-se apresentar um modelo muito simples do corpo de água de um reservatório com a finalidade de estender, por cálculo, as tabelas parciais de profundidade em confronto com a área disponível.

Na Figura 4, a represa é idealizada como pirâmide. A área da superfície  $A$  diminui quando o nível baixa, ou seja, quando a altura da água  $h$  diminui.

**Figura 4** – Representação geométrica do reservatório



Ao considerar que a forma da superfície da água aqui é um triângulo (Figura 4), calcula-se a sua área multiplicando a base pela semi-altura. A base é proporcional à altura da água  $h$ . A semi-altura também é proporcional a  $h$ , sendo  $c$  a constante de proporcionalidade. Deste modo  $A$  é proporcional ao quadrado de  $h$  ou

$$A = c h^2$$

Essa relação será usada da seguinte maneira: a partir das áreas conhecidas para alguns níveis do reservatório cheio, será calculada a constante  $c$  que, em seguida, será usada para calcular as áreas para níveis mais baixos. Nas listagens dadas a seguir, estão dispostos os dados para verificação do modelo geométrico para alguns reservatórios selecionados.

São mostradas a seguir algumas tabelas onde constam áreas calculadas:

**Tabela 36** – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Miranda

<b>Cota (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b>Área Medida (10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Calculada (10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>)</b>
695,99	66,40	50,60	50,60
695,30	65,71	48,99	49,55
694,53	64,94	47,91	48,40
693,75	64,16	46,75	47,24
692,99	63,40	46,28	46,13
689,59	60,00		41,32
684,59	55,00		
679,59	50,00		28,69
674,59	45,00		
669,59	40,00		18,36
664,59	35,00		
659,59	30,00		10,33
654,59	25,00		
649,59	20,00		4,59
644,59	15,00		
639,59	10,00		1,15
634,59	5,00		
629,59	0,00		0,00

Queda de 66,4 m.

**Tabela 37** – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Três Marias

<b>Cota (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b>Área Medida (10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Calculada (10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>)</b>
572,50	50,20	1.040,00	1.040,00
562,86	40,56	788,38	678,92
556,90	34,60	593,42	494,06
549,96	27,66	416,92	315,74
549,20	26,90	315,75	298,63
545,00	22,70		212,66
540,00	17,70		129,29
535,00	12,70		66,56
530,00	7,70		24,47
525,00	2,70		3,01
522,30	0		0,00

Queda de 50,2 m.

**Tabela 38** – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Barra Bonita

Cota (m)	h (m)	Área Medida (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	Área Calculada (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )
451,50	21,40	310,50	312,00
450,00	19,90	283,28	269,79
445,00	14,90	203,92	151,25
440,00	9,90	131,87	66,77
439,50	9,40	124,33	60,20
435,10	5,00		17,03
430,10	0		0,00

Queda de 21,4 m.

**Tabela 39** – Cota, altura, área medida e calculada do reservatório de Tucuruí

Cota (m)	h (m)	Área Medida (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	Área Calculada (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )
72,00	65,50	2.430,00	2.430,00
70,00	63,50	2.229,80	2.283,87
65,00	58,50	1.779,60	1.938,36
60,00	53,50	1.428,80	1.621,18
51,60	45,10	927,65	1.152,06
46,50	40,00		906,24
36,50	30,00		509,76
26,50	20,00		226,56
16,50	10,00		56,64
6,50	0		0,00

Queda 65,5 m.

Em alguns casos, esse modelo é bastante razoável, como por exemplo no caso de Miranda, nas profundidades entre 66,40 e 63,40 metros, onde há uma forte coincidência entre os valores do SIPOT, e os calculados. Em outros, o modelo mostra-se apenas razoável, como no reservatório de Três Marias e chega a ser muito ruim no caso de Barra Bonita, em profundidades entre 14 e 9 metros.

Para os três reservatórios onde os dados de área x profundidade não estavam disponíveis, calculou-se a extensão da área de ebulição simplesmente a partir do modelo da “pirâmide invertida”. Já que o modelo fornecia valores bons, principalmente para as áreas rasas que interessavam, apenas as áreas da ebulição foram calculadas. Os resultados assim obtidos eram suficientes para se obter as médias desejadas, não havendo necessidade de “completar” a tabela além da faixa de ebulição.

### 4.3.2 O problema da extrapolação de dados pontuais para todo o reservatório

Para tornar claro o problema do método da amostragem empregado, segue-se aqui uma discussão a respeito das técnicas de medição empregadas especificamente neste novo estudo.

A Tabela 40 mostra os parâmetros empregados na extrapolação por faixas de profundidade (média ponderada) utilizando-se os dados da segunda campanha de medições. Nessa tabela,  $x_0$  é a profundidade máxima até onde ocorre ebulição, começando da margem.

Na coluna “Emissão de CH<sub>4</sub> por bolhas” são dados dois valores. O primeiro é a intensidade média de emissões na área onde elas ocorrem. O segundo é a taxa média calculada sobre a área total do reservatório e não em relação somente à área que emite.

**Tabela 40** – Parâmetros empregados na extrapolação das emissões de CH<sub>4</sub> por bolhas

Hidrelétrica	Área total (km <sup>2</sup> )	$x_0$ (m)	Área que emite (km <sup>2</sup> )	Emissão de CH <sub>4</sub> por bolhas (kg/km <sup>2</sup> /dia)	
				Na área que emite	Taxa média
Miranda	50,6	36,8	40,54	23,07	18,48
Três Marias	1.040	24,1	759,18	76,60	55,92
Barra Bonita	312	37,8	312,00	3,06	3,06
Segredo	82	70,2	61,23	2,50	1,86
Xingó	60	19,4	21,76	53,95	19,56
Samuel	559	17,4	462,54	16,45	13,61
Tucuruí	2.430	24,6	1481,97	4,05	2,47

Dados referentes à segunda campanha de amostragem.

Cabe ressaltar que a extrapolação baseou-se em um modelo geométrico teórico que apresentou pequenas distorções em relação aos dados fornecidos pelas empresas. Em alguns casos, como por exemplo em Barra Bonita, o modelo forneceu o valor de  $x_0$  maior que a profundidade máxima do reservatório. Neste caso tomou-se a profundidade máxima do reservatório como valor de  $x_0$  e não o valor fornecido pelo modelo. A memória de cálculo das emissões por ebulição está contida no Anexo C deste relatório.

Na Tabela 41 são apresentadas as médias de difusão de metano por faixa de amostragem, obtidas na segunda campanha de amostragem. Nela constam também as variabilidades expressas como porcentagens, bem como as latitudes geográficas dos reservatórios. Nota-se grande e aparentemente aleatória variabilidade (de até 140%) dos resultados, e também que não há prevalência de emissões para profundidades menores de sítios de amostragem. Por exemplo, no reservatório de Samuel,

onde a variabilidade não passou de 44%, há essencialmente independência da difusão em relação à profundidade do sítio, ao contrário do caso das emissões por bolhas. A interpretação dada foi que todos os valores representam um valor único flutuando entre os valores encontrados. Portanto, as médias apresentadas não servem para o cálculo da emissão total, sendo justificável fazer, para cada reservatório, uma média aritmética simples de todas as medidas de difusão de metano.

**Tabela 41** – Investigação para a extrapolação das emissões de CH<sub>4</sub> por difusão usando faixas de profundidade

Hidrelétrica	Latitude	Emissões de CH <sub>4</sub> por difusão (kg/km <sup>2</sup> /dia)			
		5 m	10 m	17 - 23 m	37 - 40 m
Miranda	19° S	46,20 ± 110%	22,76 ± 7,5%	26,96 ± 101%	13,70 ± 68%
Três Marias	18° S	4 - 5 m	7 - 9 m	16 - 29 m	-
		20,24 ± 140%	3,73 ± 81%	3,25 ± 44%	-
Barra Bonita	23° S	5 m	10 - 12 m	18 - 21 m	-
		16,72 ± 41%	19,00 ± 39%	29,45 ± 88%	-
Segredo	26° S	5 m	10 - 11 m	20 - 35 m	42 - 58 m
		5,83 ± 46%	5,50 ± 49%	6,17 ± 71%	5,34 ± 51%
Xingó	10° S	2 - 6 m	10 - 12 m	17 - 22 m	-
		36,97 ± 83%	23,30 ± 88%	20,83 ± 93%	-
Samuel	9° S	4 - 5 m	9 - 10 m	16 - 21 m	-
		12,06 ± 15%	10,33 ± 37%	10,26 ± 44%	-
Tucuruí	4° S	6 m	9 - 10 m	14 m	-
		5,64 ± 30%	9,53 ± 26%	21,62 ± 45%	-
Lago Espanha	9° S	6 m	-	-	-
		11,97	-	-	-

Dados da segunda campanha de amostragem.

Na Tabela 42, são apresentadas as médias de difusão de dióxido de carbono, comparando-as com a faixa de amostragem de profundidade superior a nove metros, obtidas na segunda campanha.

**Tabela 42** – Parâmetros empregados na extrapolação das emissões de CO<sub>2</sub> por difusão

Hidrelétrica	Latitude	Emissões de CO <sub>2</sub> por difusão (kg/km <sup>2</sup> /dia)		Proporção das experiências em que houve absorção de CO <sub>2</sub>
		Média	³ 9 m*	
Miranda	19° S	3.796 ± 208%	2.725 ± 189%	5,5%
Três Marias	18° S	2.369 ± 85%	2.733 ± 47%	12%
Barra Bonita	23° S	1.537 ± 519%	1.126 ± 957%	20%
Segredo	26° S	601 ± 903%	713 ± 632%	43%
Xingó	10° S	2.440 ± 297%	-1.519 ± 140%	58%
Samuel	9° S	6.807 ± 86%	4.341 ± 31%	0
Tucuruí	4° S	6.516 ± 168%	4.312 ± 181%	17%
Lago Espanha	9° S	24.283	-	-

Dados referentes à segunda campanha de amostragem.

\* A hipótese da uniformidade da difusão sobre o reservatório simplifica o procedimento do cálculo mas destrói parte da informação. A coluna <sup>³</sup> 9m foi inserida apenas para registrar algumas discrepâncias em relação à hipótese de uniformidade.

Durante a segunda campanha, nas medições de CO<sub>2</sub> por difusão, constatou-se a absorção do CO<sub>2</sub> atmosférico pelos reservatórios em parte das experiências, com exceção do reservatório de Samuel. No reservatório de Xingó 58% das experiências mostraram absorção. Porém as médias tomadas sobre a área toda foram de emissão.

Portanto, no caso da difusão molecular, foi constatado que não havia nenhuma dependência entre as taxas de difusão e a profundidade do sítio de amostragem. Devido à alta interação entre os processos químicos e biológicos na camada superficial de água (zona eufótica), os dados de emissão difusiva apresentaram aleatoriedade. Por isso, as médias dos valores encontrados em um dado reservatório foram calculadas tomando-se médias aritméticas das taxas medidas em cada campanha.

#### 4.4 Resumo das campanhas e cálculo das médias das emissões por reservatório

A seguir, procedeu-se à soma das partes advindas do transporte por bolhas e por difusão molecular e obteve-se a emissão total do reservatório para o período de tempo considerado. A taxa de emissão foi calculada tomando por base os dados obtidos nas medições experimentais, indicando o valor médio para as duas campanhas de cada reservatório. Esse valor será empregado para a extrapolação pelo período de um ano.

Os resultados são o produto de duas campanhas de coletas de dados e a extrapolação dos valores adotada é uma hipótese conservadora para o caso das emissões da hidrelétrica, pois as emissões são projetadas como constantes ao longo do período de tempo avaliado.

Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 43 e na Tabela 44.

**Tabela 43** – Resultados da primeira campanha de medições de gases de efeito estufa de sete reservatórios hidrelétricos

Hidrelétrica	Área	Bolhas		Difusão		Total		Total/ano	
		kg/km <sup>2</sup> /dia		kg/km <sup>2</sup> /dia		kg/km <sup>2</sup> /dia		kg/km <sup>2</sup> /ano	
	km <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>						
Miranda	50,60	29,16	0,25	233,26	4.980	262,42	4.981	95.784	1.817.886
Três Marias	1.040,00	273,09	3,52	55,12	-142	328,21	-139	119.796	-50.640
Barra Bonita	312,00	4,81	0,15	14,37	6.434	19,18	6.434	7.001	2.348.295
Segredo	82,00	1,71	0,11	8,27	4.789	9,98	4.790	3.642	1.748.187
Xingó	60,00	1,95	0,01	28,04	9.837	29,99	9.837	10.946	3.590.509
Samuel	559,00	19,33	0,65	164,27	8.087	183,60	8.088	67.014	2.952.028
Tucuruí	2.430,00	13,15	0,14	192,21	10.433	205,36	10.433	74.956	3.808.191

Hidrelétrica	Total/Ano		Total do Reservatório/Ano		Total do Reservatório/Ano	
	kg/km <sup>2</sup> /ano		kg/ano		t/ano	
	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>
Miranda	71.838	495.787	3.634.993	25.086.821	3.635	25.087
Três Marias	89.847	-13.811	93.440.861	-14.363.422	93.441	-14.363
Barra Bonita	5.251	640.444	1.638.175	199.818.574	1.638	199.819
Segredo	2.731	476.778	223.966	39.095.822	224	39.096
Xingó	8.209	979.230	492.564	58.753.779	493	58.754
Samuel	50.260	805.099	28.095.466	450.050.120	28.095	450.050
Tucuruí	56.217	1.038.598	136.607.354	2.523.792.274	136.607	2.523.792

**Tabela 44** – Resultados da segunda campanha de medições de gases de efeito estufa de sete reservatórios hidrelétricos

Hidrelétrica	Área	Bolhas		Difusão		Total		Total/ano	
		kg/km <sup>2</sup> /dia		kg/km <sup>2</sup> /dia		kg/km <sup>2</sup> /dia		kg/km <sup>2</sup> /ano	
	km <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>						
Miranda	50,60	18,48	0,19	27,41	3.796	45,89	3.796	16.749	1.385.579
Três Marias	1.040,00	55,92	4,01	8,43	2.369	64,34	2.373	23.485	866.121
Barra Bonita	312,00	3,06	0,05	19,54	1.537	22,60	1.537	8.251	561.048
Segredo	82,00	1,86	0,03	5,71	601	7,58	601	2.766	219.263
Xingó	60,00	19,56	0,09	30,64	2.440	50,20	2.440	18.323	890.535
Samuel	559,00	13,61	0,43	10,83	6.807	24,44	6.808	8.922	2.484.739
Tucuruí	2.430,00	2,47	0,07	10,90	6.516	13,37	6.516	4.878	2.378.519

Hidrelétrica	Total/Ano		Total do Reservatório/Ano		Total do Reservatório/Ano	
	kg/km <sup>2</sup> /ano		kg/ano		t/ano	
	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>
Miranda	12.562	377.885	635.629	19.120.990	636	19.121
Três Marias	17.614	236.215	18.318.244	245.663.329	18.318	245.663
Barra Bonita	6.188	153.013	1.930.663	47.740.050	1.931	47.740
Segredo	2.074	59.799	170.099	4.903.516	170	4.904
Xingó	13.742	242.873	824.513	14.572.386	825	14.572
Samuel	6.692	677.656	3.740.590	378.809.750	3.741	378.810
Tucuruí	3.659	648.687	8.891.016	1.576.309.405	8.891	1.576.309

Na Tabela 45, apresenta-se finalmente a média das duas campanhas, em valores expressos em tonelada de carbono equivalente por ano, para cada um dos gases.

**Tabela 45** – Média dos resultados das campanhas de medições de gases de efeito estufa de sete reservatórios hidrelétricos

Hidrelétrica	Média das duas campanhas			
	kg/km <sup>2</sup> /dia		t/ano	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C-CH <sub>4</sub>	C-CO <sub>2</sub>
Miranda	154,15	4.388	2.135	22.104
Três Marias	196,28	1.117	55.880	115.650
Barra Bonita	20,89	3.985	1.784	123.779
Segredo	8,78	2.695	197	22.000
Xingó	40,09	6.138	659	36.663
Samuel	104,02	7.448	15.918	414.430
Tucuruí	109,36	8.475	72.749	2.050.051

## 5 Comparação das Emissões de Hidrelétricas e Termelétricas Equivalentes

Com os resultados deste trabalho pode-se comparar as emissões das hidrelétricas pesquisadas com as emissões de termelétricas virtuais de potência equivalente.

Para tal comparação, falta calcular a emissão das termelétricas equivalentes, caracterizadas como aquelas que gerassem a mesma quantidade anual de energia de cada hidrelétrica, empregando-se diferentes combustíveis e eficiências da tecnologia, desde a turbina a vapor empregando-se carvão e óleo combustível até a turbina a gás natural e a ciclo combinado.

No caso da hidrelétrica, variam de um caso a outro a potência por área inundada ( $W/m^2$ ), a densidade de biomassa ( $tC/m^2$ ) e o fator de capacidade.

Um problema teórico que se coloca e tem até hoje repercussão na literatura especializada internacional é a utilização do potencial de aquecimento global (GWP), definido (IPCC, 1990, 1992, 1996) para comparar os efeitos no aquecimento global de emissões de  $CH_4$  e de  $CO_2$  simultâneas, na comparação de emissões de hidrelétricas, variando sensivelmente no tempo, com as de termelétricas, constantes ao longo dos anos, desde que funcionem continuamente. Generalizou-se o GWP para comparar também emissões não simultâneas, mas essa utilização ainda é assunto controverso. O conceito foi aqui empregado para facilitar comparações com outros trabalhos publicados no exterior.

Avaliou-se a energia média gerada em um ano de funcionamento de cada hidrelétrica, tomando a sua capacidade instalada, expressa em MW, multiplicada por um fator de capacidade médio das hidrelétricas brasileiras, que gira em torno de 50% e o número de horas do ano (8.760), resultando na quantidade de energia gerada, expressa em MWh/ano. Em lugar do fator de capacidade convencional, foi usado um fator, denominado de energia incremental, que leva em conta o acréscimo da energia assegurada total do sistema interligado devido a cada usina hidrelétrica.

Para o cálculo do carbono emitido pela tecnologia termelétrica, a energia anual gerada pela hidrelétrica foi multiplicada pelo fator de emissão de carbono ligado a cada um dos combustíveis, expresso em  $tC/MWh$  (Tabela 46), e dividida pela eficiência média de cada tecnologia (Tabela 47). A eficiência variou de 30% a 37%, no caso do ciclo simples movido a óleo diesel, carvão mineral gás natural ou óleo combustível, chegando a 50% no caso do ciclo combinado a gás natural.

**Tabela 46** – Dados para cálculo das termelétricas

Combustível	Fator de emissão	Fator de conversão	Fator de emissão
	tC / TJ	MWh/TJ	tC / MWh
Carvão-vapor	25,8	0,0036	0,09288
Óleo combustível	21,1	0,0036	0,07596
Óleo diesel	20,2	0,0036	0,07272
Gás natural	15,3	0,0036	0,05508

IPCC, 1997

**Tabela 47** – Eficiências das diversas tecnologias utilizadas nas termelétricas

Combustível	Tecnologia	Eficiência
Carvão-vapor <sup>1</sup>	ciclo simples	37%
Óleo combustível <sup>1</sup>	ciclo simples	30%
Óleo diesel <sup>1</sup>	ciclo simples	30%
Gás natural <sup>2</sup>	ciclo simples	30%
Gás natural <sup>2</sup>	ciclo combinado	50%

<sup>1</sup> Schaeffer *et al.*, 2000.<sup>2</sup> Neto *et al.*, 2001.

No caso do cálculo das emissões das termelétricas a gás natural (basicamente metano), foram consideradas as emissões fugitivas devidas principalmente às perdas no transporte e distribuição desse combustível. Tais perdas ocorrem, em sua maior parte, em pequenos vazamentos nas juntas existentes em toda a malha de distribuição, incluindo gasodutos, tubulações e componentes. Eventualmente, também ocorrem vazamentos por acidente ou por operações de manutenção ou manobra do sistema. Segundo dados da Petrobras (1999), as emissões fugitivas são estimadas em 4,7% para o caso brasileiro. Este percentual, levando em consideração o GWP do CH<sub>4</sub> em relação ao CO<sub>2</sub>, que é de 7,6 em unidades de massa de carbono para 100 anos (IPCC, 1996), reflete-se num aumento de 27% na emissão de carbono equivalente de CO<sub>2</sub>.

A Tabela 48 resume a comparação das emissões das hidrelétricas com as de suas termelétricas equivalentes. Nela, as emissões das hidrelétricas são consideradas como a média das medições realizadas nas duas campanhas de amostragem extrapoladas para cada reservatório como um todo (conforme Tabela 45).

Como se pode notar, há hidrelétricas (Itaipu, Xingó, Segredo) que emitem muito pouco carbono em comparação com suas térmicas equivalentes; há hidrelétricas intermediárias, como Miranda, e hidrelétricas que emitem bem mais carbono, como por exemplo Três Marias e Samuel. É importante

ressaltar que, para cada caso, ainda não se tem quantificada a matéria orgânica continuamente drenada da bacia a montante para se poder separá-la da biomassa afogada pelo reservatório (ver item 4.1). Os resultados comparados focalizam, com maior evidência, que o problema deve ser investigado caso a caso, pois grandes variações podem ocorrer de uma hidrelétrica para outra.

**Tabela 48** – Comparação das emissões das hidrelétricas com as de suas termelétricas equivalentes

Hidrelétrica	Área km <sup>2</sup>	Latitude	Potência MW	Média das duas campanhas			Emissões da Termelétrica Equivalente <sup>2</sup>					Mérito - RI (Emis. Termelétrica / Emis. hidrelétrica)				
				Índice de Emissão de CH <sub>4</sub> kg/km <sup>2</sup> /dia	Índice de Emissão de CO <sub>2</sub> kg/km <sup>2</sup> /dia	Emissão da hidrelétrica <sup>1</sup> tC/ano	Carvão <sup>3</sup> ciclo simples tC-CO <sub>2</sub> /ano	Óleo <sup>4</sup> ciclo simples tC-CO <sub>2</sub> /ano	Diesel <sup>5</sup> ciclo simples tC-CO <sub>2</sub> /ano	Gás <sup>6</sup> ciclo simples tC-CO <sub>2</sub> /ano	Gás <sup>7</sup> ciclo combinado tC-CO <sub>2</sub> /ano	Carvão c. simples	Óleo c. simples	Diesel c. simples	Gás c. simples	Gás c. comb.
Fucuruí	2.430	3°45'S	4.240	109,4	8.475	2.602.945	4.661.873	4.702.228	4.501.659	4.330.284	2.598.170	1,79	1,81	1,73	1,66	1,00
Samuel	559	8°45'S	216	104,0	7.448	535.407	237.492	239.547	229.330	220.599	132.360	0,44	0,45	0,43	0,41	0,25
Xingó	60	9°37'S	3.000	40,1	6.138	41.668	3.298.495	3.327.048	3.185.136	3.063.880	1.838.328	79,16	79,85	76,44	73,53	44,12
Serra da Mesa	1.784	13°50'S	1.275	51,1	3.973	895.373	1.401.860	1.413.995	1.353.683	1.302.149	781.289	1,57	1,58	1,51	1,45	0,87
Três Marias	1.040	18°13'S	396	196,3	1.117	540.335	435.401	439.170	420.438	404.432	242.659	0,81	0,81	0,78	0,75	0,45
Miranda	50,6	18°55'S	390	154,2	4.388	38.332	428.804	432.516	414.068	398.304	238.983	11,19	11,28	10,80	10,39	6,23
Barra Bonita	312	22°31'S	140,76	20,9	3.985	137.341	154.765	156.105	149.447	143.757	86.254	1,13	1,14	1,09	1,05	0,63
Itaipu	1.549	25°26'S	12.600	20,8	171	93.269	13.853.680	13.973.602	13.377.571	12.868.296	7.720.978	148,54	149,82	143,43	137,97	82,78
Segredo	82	25°47'S	1.260	8,8	2.695	23.497	1.385.368	1.397.360	1.337.757	1.286.830	772.098	58,96	59,47	56,93	54,77	32,86
Conjunto das 9			23.518			4.908.166	25.857.739	26.081.572	24.969.088	24.018.532	14.411.119	5,27	5,31	5,09	4,89	2,94

<sup>1</sup> Inclui o carbono do CH<sub>4</sub> (com GWP conforme IPCC, 1996) e do CO<sub>2</sub>: (CH<sub>4</sub> x 12/16 x 7,6 + CO<sub>2</sub> x 12/44) x 365 / 1000;

<sup>2</sup> Potência da hidrelétrica x 0,5 x 365 x 24 x fator de emissão de CO<sub>2</sub> / eficiência do combustível. Foi usado um fator, denominado energia incremental (50%), que leva em consideração o acréscimo de energia assegurada total num sistema interligado devido a cada hidrelétrica.

<sup>3</sup> Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do carvão mineral, ciclo simples: 0,09288 tC/MWh, com eficiência de 37%;

<sup>4</sup> Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do óleo combustível, ciclo simples: 0,07596 tC/MWh, com eficiência de 30%;

<sup>5</sup> Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do óleo diesel, ciclo simples: 0,07272 tC/MWh, com eficiência de 30%.

<sup>6</sup> Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do gás natural, ciclo simples: 0,05508 x 1,27 tC/MWh, com eficiência de 30%;

<sup>7</sup> Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do gás natural, ciclo combinado: 0,05508 x 1,27 tC/MWh, com eficiência de 50%;

No caso do gás natural, os fatores de emissão incluem o fator 1,27, devido a 4,7% de perdas fugitivas e considerando o GWP molar de 7,6 para o metano.

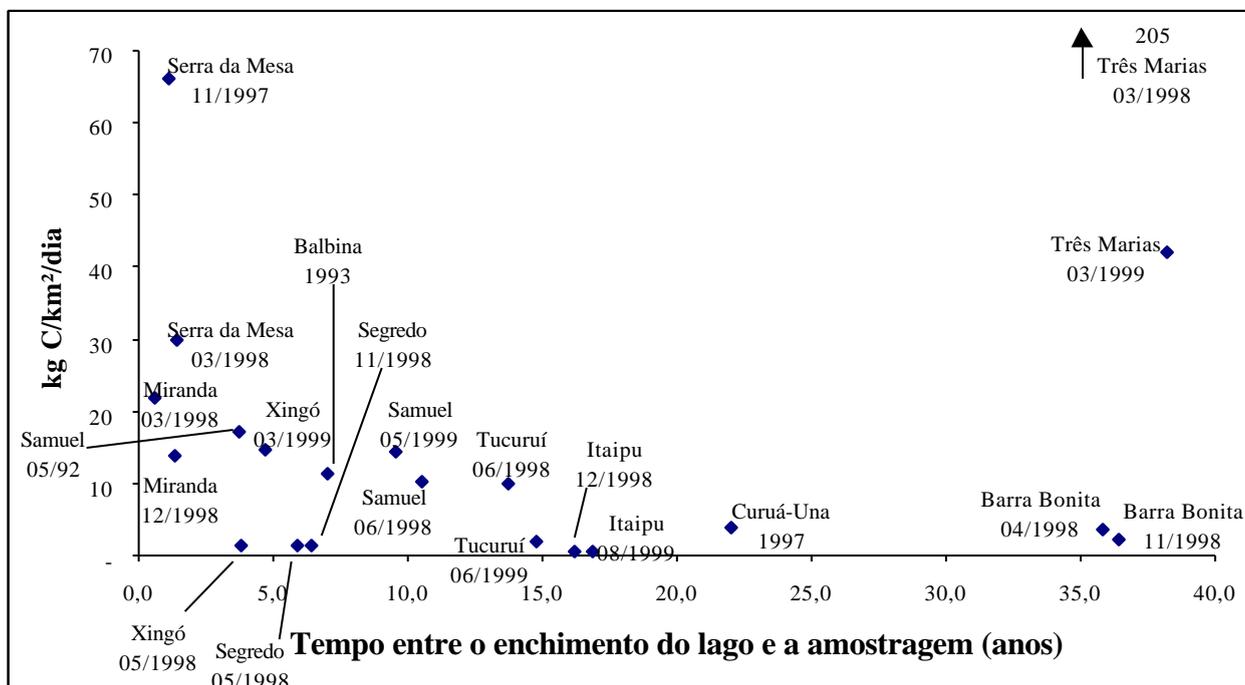
Nos Gráficos 1 a 4, a seguir, mostram-se os resultados médios encontrados nos reservatórios pesquisados e em outros reservatórios estudados anteriormente. Além dos sete reservatórios, foram acrescentados os dados referentes ao reservatório de Curuá-Una (medidas de bolhas), onde se realizou uma experiência conjunta com cientistas canadenses, em 1997, Itaipu e Serra da Mesa, objetos de estudos específicos encomendados pelas respectivas empresas. Nesses estudos anteriores, conforme já foi dito, enfocaram-se apenas as emissões de metano por bolhas, pois se acreditava serem as mais significativas.

Em termos gerais, para o caso do metano emitido por bolhas, pode-se notar que há uma tendência de apresentação de um decaimento entre os resultados apresentados na primeira campanha de amostragens em relação à segunda. Reservatórios mais jovens tendem a apresentar mais emissões por bolhas que os mais antigos.

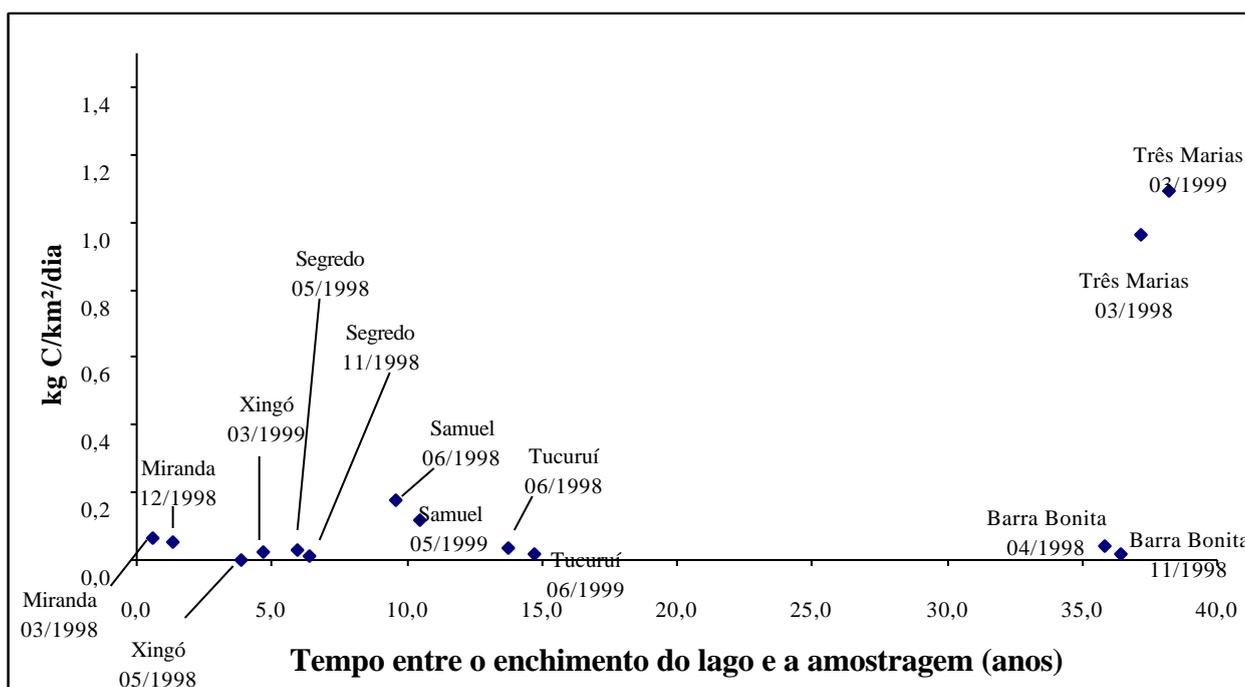
Excetuando-se o caso de Três Marias, todos os casos mostraram uma forte correlação entre o aumento da idade do reservatório e a diminuição do fluxo de gases. Este efeito pode ser verificado facilmente no caso do  $\text{CH}_4$  por ebulição, mostrado no Gráfico 1, que mostra no eixo  $x$  o número de anos decorridos entre o enchimento da barragem e a amostragem, e no eixo  $y$ , o fluxo médio de carbono equivalente de metano emitido por bolhas.

Para o caso do dióxido de carbono emitido por bolhas, a situação mostra-se diferente. Além de apresentar níveis de emissão bastante inferiores em relação aos do metano (cerca de 100 vezes menor), não foi possível notar nenhum tipo de dependência com a idade do reservatório. A baixa presença do  $\text{CO}_2$  nas bolhas pode ser explicada pela sua grande solubilidade na água, implicando desta forma, em baixa segregação do gás por bolhas. O Gráfico 2 ilustra esse comportamento da emissão independente da idade do lago.

**Gráfico 1** – Emissão média de carbono no CH<sub>4</sub> derivada de bolhas em reservatórios hidrelétricos brasileiros



**Gráfico 2** – Emissão média de carbono no CO<sub>2</sub> derivada de bolhas em sete reservatórios hidrelétricos brasileiros



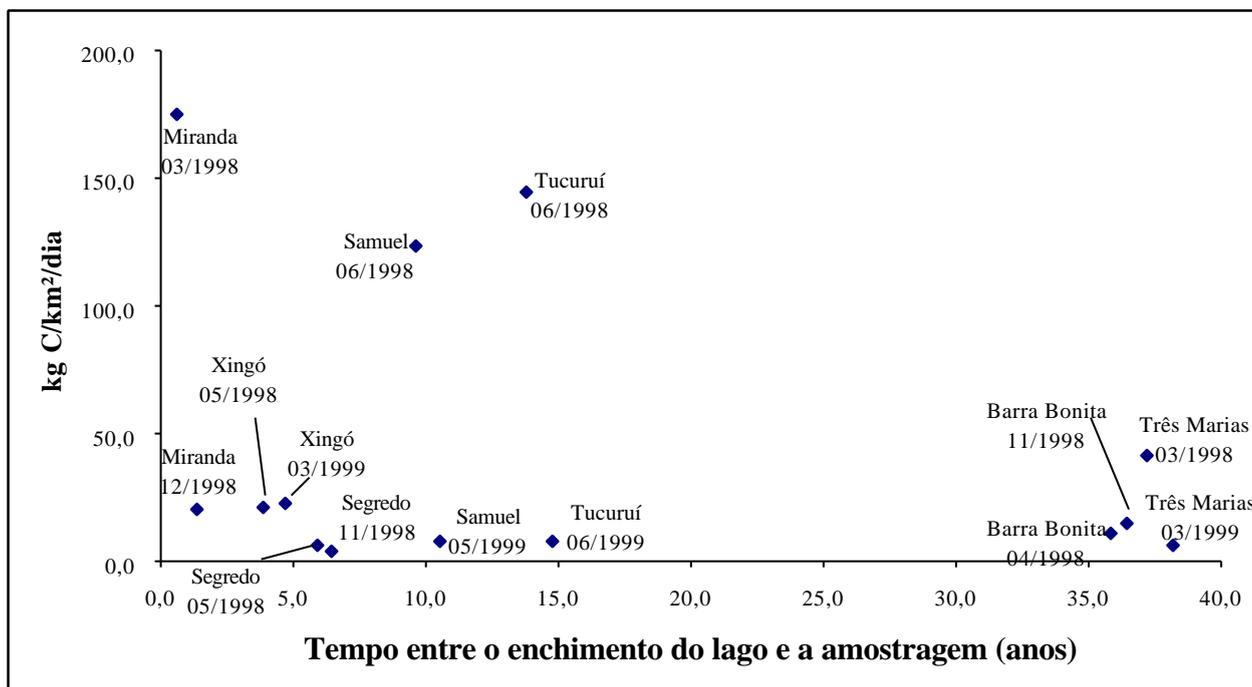
O outro processo de transporte de gás medido foi a difusão molecular. Neste caso, não foi encontrado um tipo de padrão de representação dos dados médios que explicasse um decaimento das emissões de metano e de dióxido de carbono.

Os dados médios de emissão por difusão molecular das duas campanhas são representados nos Gráficos 3 e 4 para o CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, respectivamente, onde se pode observar as emissões confrontadas com a idade dos reservatórios. Há um comportamento diferente do encontrado para o metano por ebulição. No caso da difusão, para ambos os gases, há reservatórios mais antigos que apresentam fluxos maiores que reservatórios recentemente fechados, ou seja, não há dependência dos fluxos medidos com a idade de fechamento da barragem.

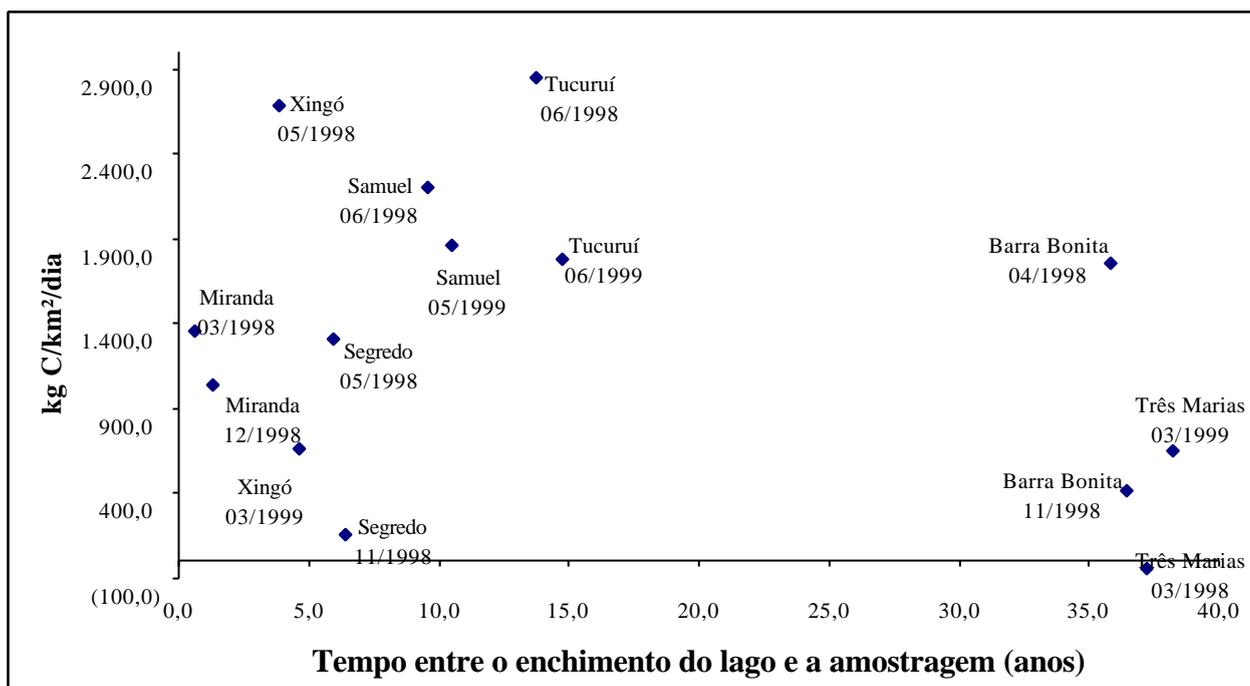
Os fluxos de gases no processo de difusão são bem maiores que por ebulição, especialmente no caso do dióxido de carbono, que apresenta maior solubilidade em água. A totalidade do CO<sub>2</sub> (99,99%) que sai para a atmosfera, sai por difusão molecular do gás na água. No caso do CH<sub>4</sub>, há uma faixa de variação que vai de 14% a 90% de emissão do gás pelo processo de difusão molecular.

Nota-se, entretanto, que quando os resultados são comparados para um mesmo reservatório há uma tendência de resultados médios menores na segunda campanha. Porém, precisar-se-ia de mais medidas para uma afirmação mais rigorosa.

**Gráfico 3** – Emissão média de carbono no CH<sub>4</sub> derivada de difusão em sete reservatórios hidrelétricos brasileiros



**Gráfico 4** – Emissão média de carbono no CO<sub>2</sub> derivada de difusão em sete reservatórios hidrelétricos brasileiros



## 6 Comentários Finais

Pelas comparações realizadas entre os reservatórios estudados, pode-se concluir que há uma grande variação entre os dados de emissão de gases de efeito estufa, o que sugeriria mais cuidado na escolha de futuros projetos por parte do setor elétrico brasileiro.

A intensidade de emissão de gases em um reservatório não é invariante no tempo. Há flutuações com períodos de duração irregular. No entanto, a variação é modulada por um conjunto de influências, sendo as principais: a temperatura, o regime de ventos, a insolação, os parâmetros físico-químicos da água e a composição da biosfera. Para o caso do CO<sub>2</sub>, essas influências podem combinar-se de maneira a se perceber uma tendência de as taxas de emissão serem uma tênue função da latitude, de forma que em latitudes mais altas os reservatórios tenderiam a apresentar menores taxas de emissão. Porém tal ordenação não está sempre presente, como por exemplo para o metano.

O fato de as emissões em áreas com vegetação diferente, como a floresta amazônica, caatinga ou cerrado não serem muito diferentes entre si, bem como a relativamente baixa correlação entre as emissões e a idade do reservatório, podem estar ligados ao fato de as emissões serem devidas não só à decomposição do estoque de biomassa terrestre preexistente, mas também da matéria orgânica da bacia de drenagem a montante e da matéria orgânica internamente produzida no lago.

A utilização dos resultados das medições foi privilegiada, em detrimento dos cálculos teóricos, com base no estoque inicial de biomassa.

A emissão de CH<sub>4</sub> pelas hidrelétricas é sempre desfavorável, pois, mesmo que o carbono tenha se originado de fontes naturais, ele se torna um gás de maior GWP no cômputo final. A emissão de CO<sub>2</sub> pode ser atribuída, em parte, ao próprio ciclo natural do carbono, entre a atmosfera e a água do reservatório. Uma outra parte pode ser atribuída à decomposição da matéria orgânica, causada pela hidrelétrica.

Os dados das duas campanhas não permitiram uma análise temporal de longo termo do comportamento das emissões, tendo em vista as restrições logísticas e financeiras impostas.

Há que se considerar as variações de emissão dos gases inter e intra-reservatórios, visto que os reservatórios apresentam diferentes regimes de circulação de águas, que proporcionam condições diferenciadas de qualidade de água e geração de matéria orgânica. A diferença marcante entre as emissões de bolhas de metano, que são praticamente inexistentes nas áreas da antiga calha fluvial

dos rios inundados e as altas taxas encontradas nas regiões abrigadas dos reservatórios, mostram claramente este padrão diferenciado das emissões nos reservatórios.

Em todos os reservatórios estudados, o dióxido de carbono é mais emitido por difusão. Porém, como este gás faz parte do ciclo natural do carbono, foram verificadas, em algumas medições, absorção de CO<sub>2</sub> pelo corpo d'água do reservatório, via fotossíntese da produção primária do lago. No caso do metano, este gás sempre é emitido tanto por bolhas quanto por difusão molecular.

Em alguns reservatórios foi possível notar que o regime de operação também pode influir na emissão dos gases. Dependendo da operação da usina, o reservatório pode deplecionar-se de forma rápida, possibilitando que os braços dendríticos rasos sejam expostos periodicamente à colonização por vegetação terrestre. Essas regiões mostraram intensa metanogênese devido à decomposição de tal vegetação. Esse efeito ocorreu nos reservatórios de Três Marias e Samuel.

Uma aferição dos métodos de análise cromatográfica, durante a segunda série de campanhas, confirmou que a variabilidade das taxas de emissão é menor que 5%. Dessa forma, deve-se concluir que as grandes variações das taxas de emissão constatadas entre os resultados da primeira e segunda séries de campanhas representam a realidade e não são imperfeições do procedimento analítico.

A principal controvérsia científica encontra-se na extrapolação das emissões medidas em partes selecionadas do reservatório para a área total do reservatório.

As emissões podem variar de acordo com a profundidade e com a distribuição da biomassa submersa. As emissões também variam no tempo, provavelmente com um pico rápido, que acontece logo após a submersão, depois da qual seguem a uma taxa desconhecida. Estudos de monitoramento por períodos de tempo longos devem ser estimulados, para se caracterizar a curva de comportamento das emissões.

Também há evidências de que os fluxos de carbono dentro do sistema reservatório são complexos, sendo que o carbono pode fluir para o reservatório a partir da bacia de drenagem. Este é um tópico a ser desenvolvido em trabalhos ulteriores.

Em termos gerais, pode-se dizer que o risco de emissões de gases de efeito estufa pode ser reduzido:

- evitando-se a baixa densidade de potência na escolha dos reservatórios (W/m<sup>2</sup>);
- desmatando-se o reservatório antes da inundação (independentemente do ponto de vista econômico).

Deste estudo também se pode concluir que a energia hidrelétrica não é uma fonte isenta de emissões atmosféricas, tal qual se afirmava em estudos ambientais da década de 70 e 80. O reservatório de uma hidrelétrica emite gases de origem biogênica, tais como o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Porém, os estudos comparados de emissão de gases da superfície do reservatório com as emissões de tecnologias de geração termelétrica mostram que, na maioria dos casos analisados, as hidrelétricas apresentaram resultados melhores, demonstrando que em termos comparativos são uma solução viável de abatimento das emissões na geração de energia elétrica.

## 7 Referências Bibliográficas

- AGOSTINHO, A.A. e GOMES, L.C., 1997. *Reservatório de Segredo - Bases Ecológicas para o Manejo*. COPEL/EDUEM/UEM.
- ALVALD, P.C.; KIRCHORFF, V.W.J.H. e PAVÃO, H.G., 1998. O Metano na Atmosfera - Produção de Metano em Regiões de Queimadas e Áreas Alagadas - *Revista Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento*.
- ASELMANN, I. e CRUTZEN, P., 1989. Global Distribution of Natural Freshwater Wetlands and Rice Paddies, Their Primary Productivity, Seasonality and Possible Methane Emissions. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 8: 307-358.
- BARTLETT, K.B. e HARRIS, R.C., 1993. Review and Assessment of Methane Emission from Wetlands, *Chemosphere*, 26, 261-320.
- BAK, PER (Niels Bohr Institute - Dinamarca), 1995. *How Nature Works - The Science of Self Organized Criticality*. Universidade de Oxford.
- BRUCE, LAURETTA., 1990. A Comparasion of Emissions from Hydropower vs. Coal-Fired Power Generation in the Amazon. In *Tropical Foretry Response Options to Global Climate Change - Conference Proceedings*, IPCC/EPA/USP, São Paulo.
- CARDENAS, J. D. R.; KAHN, FRANCIS LOUIS e GUILLAUMET, J. LOUIS., 1982. Estimativa da Fitomassa do Reservatório da UHE de Tucuruí. In *Limnologia, Macrófitas, Fitomassa, Degradação de Fitomassa, Doenças Endêmicas, Solos* (SEPLAN/CNPq/INPA), INPA, Manaus, Vol. 2.
- CARDENAS, J. D. R., 1986. Estudos de Ecologia e Controle Ambiental na Região do Reservatório da UHE de Samuel. In *Seguimento da Estimativa da Fitomassa*, convênio ECN/MCT/CNPq/INPA.
- CLARKE, FRANK H., 1990. *Optimization and Nonsmooth Analysis*, SIAM - pág. 3.
- DEVOL *et al.*, 1988. *Journal of Geophysical Research*, 95, 1583.
- DUCHEMIN, E.; LUCOTTE, M. e CANUEL, R., 1995. Production of the Greenhouse Gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> by Hydroelectric Reservoirs of the Boreal Region. *Global Biogeochemical Cycles*, n° 9 (4) , 529-540.
- DUCHEMIN, E.; CANUEL, R.; FERLAND, P. e LUCOTTE, M., 1999. *Étude sur la Production et l'Émission de Gaz à Effect de Serre par les Réservoirs Hydroélectriques de l'Entrepise et de Lacs Natureles* (Vol. 2). Université du Quebec, Montreal, 47p.

- FEARNSIDE, P. M., 1992. *Carbon Emissions and Sequestration in Forests: Case Studies from Seven Developing Countries* (Volume 2). Publicação EPA/LBL (em preparação) LBL-32758, Brasil.
- FURCH, K., 1984. Water Chemistry of the Amazon. In *The Amazon Limnology and Landscape Ecology*, ed. H. Sioli, Haia, Junk, 167.
- GALY LACAUX, C.; DELMAS, R.; JAMBERT, C.; DUMESTRE, J.F.; LABROURE, L.; RICHARD, S. e GOSSE, P., 1997. Gaseous Emissions and Oxygen Consumption in Hydroelectric Dams: A Case Study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles*, n° 11: (4), 471-483.
- GIBBS, R.J., 1972. Water Chemistry of the Amazon River. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, pág. 1061.
- HAMILTON, L.D., 1984. Health and Environmental Risks of Energy Systems. *Symposium on Risks and Benefits of Energy Systems*. IAEA/UNEP/WHO, IAEA-SM-273/51.
- HAMILTON, S.K.; SIPPEL, S.J. e MELACK, J.M., 1995. Oxygen Depletion and Carbon Dioxide and Methane Production in Waters of the Pantanal Wetland of Brazil. *Biochemistry*, n° 30(2), 115-141.
- IESA (Internacional Engenharia S.A), 1995. *CEMIG Usina Hidrelétrica de Miranda - Projeto Executivo - Monitoramento da Cobertura do Solo e da Cobertura Vegetal - Relatório Final - Estudos Ambientais* - .
- \_\_\_\_\_, 1996. *CEMIG Usina Hidrelétrica de Miranda - Projeto Executivo - Programa de Enchimento do Reservatório - Relatório Final - Estudos Ambientais*.
- IPCC, 1990. *Cambio Climático - Evaluacion Científica del IPCC* - editado por Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattemberg, K. e Maskell, K.; traduzido por Instituto Nacional de Meteorologia, 1992.
- \_\_\_\_\_, 1992. *Climate Change 1992 - The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* - editado por Houghton, J.T.; Callander, B.A. e Varney, S.K., Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_, 1996. *Climate Change 1995 - The Science of Climate Change* - editado por Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattemberg, K. e Maskell, K., Cambridge University Press.
- IPCC, OECD, IEA, 1997. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Bracknell: Reino Unido.

- IZRAEL, YU A., 1987. Energy Development and its Effects on the Environment. *Energy* Vol 12 n° 10/11.
- JONES, J.B. e MULHOLLAND, P.J., 1998. Methane Input and Evasion in a Hardwood Forest Streams: Effects of Subsurface Flow Shallow and Deep Pathways. *Limnology and Oceanography*, n° 43 (6) , 1243-1250.
- JUNK, W. J., 1985. *The Amazon Floodplain - A Sink or Source for Organic Carbon?* - Universidade de Hamburgo, Scope/UNEP, Heft 58.
- KLING, G.W.; KIPPOT, G.W. e MILLER, M.C., 1992. The flux of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from Lakes and Rivers in Artic Alaska. *Hidrobiologia*, n° 240: 1-3, 26.
- LUCOTTE, M.; CHAMBERLAND, A.; DUCHEMIN, E.; CANUEL, R. e BARRETE, N., 1997. Monitoring of the Emission of Greenhouse Gases by Hydroelectric Reservoirs of Northern Quebec: First Results and Perspectives. In Rosa, L. P. & Dos Santos, M. A. (eds.): *Hydropower plants and greenhouse gas emissions*. Apresentado no Internacional Workshop on Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs. Eletrobrás, Rio de Janeiro, Brasil (11-12/09/1996) e no International Workshop on Greenhouse Gases from Hydroelectric Reservoirs: Production, fate and means of study. Universidade Federal do Pará, Santarém, Pará, Brasil (1-4/02/1997).
- NETO, V. e TOLMASQUIM, M.T., 2001. A Avaliação econômica da Co-Geração em ciclo combinado com gaseificação de biomassa e gás natural no setor sucroacoleiro. *Revista Brasileira de Energia*, SBPE, v. 8, n. 2, 35-59 p.
- NUSSENZVEIG, MOYSÉS; GOMES, MARCELO (UFPe) *et al.*, 1999. *Complexidade e Caos*, UFRJ.
- OECD, 1991. Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks - OECD Expert Meeting, *Background Report*.
- PEARSE, FRED, 1987. Acid Rain. *New Scientist*, 5.
- PETROBRAS, 1999. *Programa de Desenvolvimento Sustentável para a PETROBRAS*. PETROBRAS/COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.
- PHELPS, A. R.; PETERSON, K. M. e JEFFRIES, M. O., 1998. Methane Efflux from High-Latitude Lakes During Ice Melt - *Journal of Geophysical Research - Atmosphere*, n° 3: (22), 29029-29036.
- RICHEY, J. E., 1982. *The Amazon River System: A Biogeochemical Model in Transport of Carbon and Mineral in Major World Rivers*, ed E.T. Degens, Universidade de Hamburgo, UNEP, 365.

- SBPC, 2000. *Relatório da Comissão de Mudanças Climáticas*. SBPC, 30 p.
- SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LOGAN, J.; CHANDLER, W. e DE SOUZA, J. C. 2000. Developing countries & global climate change: electric power options in Brazil. *Pew Center on Global Climate Change*, 38 p.
- SEINPE, 2001. *Balanco Energético do Estado do Rio de Janeiro 1980/1999*, Secretaria de Estado de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo - SEINPE, Rio de Janeiro, 196 p.
- SELLERS, P.; HESSLEIN, R.H. e KELLY, C.A., 1995. Continuous Measurement of CO<sub>2</sub> for Estimation of Air-Water Fluxes in Lakes: An In Situ Technique. *Limnology and Oceanography*, nº 40 (3), 577-581.
- SHALARD, R., 1980. *Woods Hole Oceanogra*, Doct. Thesis., Massachusetts Institute of Technology.
- SIOLI, H., 1967. Studies in Amazonian Waters. *Simpósio sobre Biota Amazônica*, 3 pág. 9.
- STRIEGL, R.G. e MICHMERHVIZEN, C. M., 1998. Hydrologic Influence on Methane and Carbon Dioxide Dynamics at Two North-Central Minnesota Lakes. *Limnology and Oceanography*, nº 43.
- UNITED NATIONS, 1986. *Economic Commission for Europe. Air Pollution Studies N° 3 - Transboundary Air Pollution. Effects and Control*. U.N. - Nova York.
- \_\_\_\_\_, 1986 a. *Economic and Social Council - Effects of Environmental Measures on the Construction and Operation of Power Plants*.
- UTSUMI, M.; NOJIRI, Y.; NAKAMURA, T.; NOZAWA, T.; OTSUKI, A. ; TAKAMURA, N.; WATANABE, M. e SEKI, H., 1998. Dynamics of Dissolved Methane and Methane Oxidation in Dimict Lake Nojiri During Winter. *Limnology and Oceanography*, 43(1), 10-17.
- VOSS *et al.*, 1987. Cost-Optimal Emission Control Strategies. *Seminário UNDP - Banco Mundial sobre Planejamento de Energia*. Viena.

## **ANEXOS**

## Anexo A

### Trabalhos Anteriores sobre Emissão de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios

As emissões de gases de efeito estufa, no caso da geração de energia elétrica, podem ser divididas em dois grupos:

- 1) O CO<sub>2</sub> na queima de combustíveis fósseis, principalmente na operação de usinas termelétricas, e o CH<sub>4</sub> por escape na exploração, armazenamento e transporte do gás natural;
- 2) Na alteração do uso do solo, principalmente devido ao enchimento de reservatórios das usinas hidrelétricas em regiões florestadas, sob a forma de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

O primeiro caso não constitui grande problema, pois a documentação sobre estimativas de emissão de gases derivados do uso de combustíveis fósseis é considerável e o tema foi objeto de constantes debates em nível nacional e internacional (CNUMAD-92, IPCC-1991, RIO CIÊNCIA-92, OECD *Expert Meeting* - 1991), somados às características dos aproveitamentos termelétricos, que podem fornecer dados sobre o consumo de combustível utilizado na geração de energia.

Dados sobre emissões de poluentes atmosféricos (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, material particulado) estão disponíveis na literatura internacional e podem ser utilizados com confiança e confrontados com as estimativas do caso brasileiro: Hamilton (1984); Pearse (1987); *United Nations* (1986); *United Nations* (1986a); Voss *et al.* (1987); Izrael (1987).

No segundo caso, estritamente ligado à construção e operação de hidrelétricas em regiões florestadas, o acervo é bem reduzido, mesmo no panorama internacional.

O relatório OECD (1991) dedicou um capítulo especial para as alterações do uso do solo e florestas como fontes de emissão de gases, onde considera a inundação de áreas como uma das atividades potenciais de emissão de CH<sub>4</sub>.

O relatório não apresenta, entretanto, conclusões sobre o método a ser empregado nas estimativas, mas considera necessários novos estudos, principalmente porque essa fonte de emissão varia enormemente com o tipo de ecossistema que é alagado. A construção de hidrelétricas é apontada como uma grande fonte de CH<sub>4</sub> neste tipo de atividade, enfatizada significativamente em nível nacional. A metodologia não apresenta medições em barragens devido a hidrelétricas, mas

estabelece ordens de grandeza de emissões de CH<sub>4</sub> em áreas naturalmente alagadas [Tabela A1] (Aselmann, I. e Crutzen ,1989).

**Tabela A1** – Emissão média de metano de áreas naturais

Categoria	Taxa da Emissão	Período de Produção
	kg C-CH <sub>4</sub> /km <sup>2</sup> /dia	dias
Áreas úmidas com vegetação em decomposição	11 (11-38)	178
Brejos	60 (21-162)	169
Pântanos	63 (43-84)	274
Charcos	189 (103-299)	249
Várzeas	75(37-150)	122
Lagos	32(13-67)	365

Fonte: Aselmann e Crutzen, 1989.

No caso brasileiro, além dos trabalhos da COPPE/UFRJ, há o conhecimento de dois trabalhos, embora considerados preliminares pelos autores: Bruce (1990) e Fearnside (1992).

O trabalho de Bruce procura estabelecer uma comparação entre as emissões de gases derivados das duas tecnologias: hidrelétrica de 112 MW de potência em média (Balbina) e uma térmica de igual capacidade de geração de energia. Como parâmetros básicos de comparação, utiliza a vida útil do projeto, a capacidade de geração de energia, a densidade de biomassa florestal afogada, no caso da hidrelétrica, e o tipo de combustível empregado, no caso da termelétrica. A estimativa desse trabalho utiliza dois cenários de emissões possíveis, no caso da hidrelétrica:

- todo carbono emitido sai sob a forma de CO<sub>2</sub>;
- 5% do carbono emitido sai sob forma de CH<sub>4</sub>;

O método empregado, neste caso, foi multiplicar a área inundada do reservatório pela densidade de carbono existente na floresta alagada (155 tC/ha). Posteriormente é obtido um índice parametrizado pela potência da usina (tC/MW), que é comparado com o índice de emissão de uma usina térmica semelhante.

O resultado pode ser criticado pelo fato de não terem sido considerados outros parâmetros de sensibilidade, que podem influir nos cálculos, tais como a parcela da biomassa que pode ser imediatamente decomposta e gaseificada após o enchimento do reservatório, ou a eficiência de cada tecnologia, trazendo como consequência uma ponderação maior nas emissões devidas à hidreletricidade.

Já o trabalho de Fearnside é um apanhado das fontes de emissão e sumidouros de carbono nas florestas, publicado em um seminário sobre florestas tropicais e mudanças globais, sob a responsabilidade do *Lawrence Berkeley Laboratory* (EUA) e USP, com financiamento da EPA - *Environmental Protection Agency* (EUA) e do IPCC.

A participação do desmatamento e das queimadas na região amazônica e a sua contribuição para o aquecimento global são bem exploradas. A questão da alteração do uso do solo e seus impactos ecológicos também são abordados (expansão da fronteira agropecuária, produção de carvão vegetal e utilização de lenha e barragens artificiais). Segundo esse trabalho, a construção das barragens em áreas de florestas tropicais apresentam sérios impactos ecológicos, entre os quais a contribuição de gases causadores do efeito estufa.

Fearnside considera que, na Amazônia, as barragens são, na maioria dos casos, piores do que as térmicas que utilizam combustíveis fósseis, sob o ponto de vista das emissões dos gases. A emissão de CH<sub>4</sub> derivado de barragens pode atingir (caso todas as usinas planejadas para a Amazônia fossem construídas) a mesma ordem de magnitude das emissões das várzeas naturais amazônicas (considerada como uma das maiores fontes mundiais de metano).

Entretanto, o trabalho não utiliza dados da região, confiando na média das emissões em lagos naturais do mundo (43 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia). Acredita, inclusive, que o dado é conservador para os lagos artificiais da região amazônica, pois estes apresentam condições favoráveis à decomposição anaeróbica da matéria orgânica do fundo. As emissões, segundo o autor, são significativas e, para os reservatórios com enchimento em 1988 (Samuel), as emissões totalizaram 20 x 10<sup>6</sup> t de carbono no CO<sub>2</sub> que escapou para a atmosfera.

A crítica que se pode fazer à abordagem de Fearnside é justamente a falta de medições *in loco* e a extrapolação de dados sem critério científico, que podem com certeza superestimar as emissões devidas às hidrelétricas.

De acordo com a metodologia OECD para o IPCC, é recomendado que verificações empíricas sejam realizadas a fim de estabelecer critérios e metodologias de cálculo de emissões próximas à realidade dos ecossistemas afetados.

Nas hidrelétricas brasileiras, a possibilidade de situações diferenciadas, que por sua vez podem afetar os cálculos, é numerosa (desmatamento prévio antes do enchimento, composição e densidade da biomassa afogada, variações sazonais de cota dos reservatórios, etc.) implicando necessariamente em estudos de caso, antes da criação de indicadores gerais, ou críticas ao enchimento dos reservatórios.

Estudos sobre a presença de carbono na água de rios da Amazônia vêm sendo publicados por diversos autores ao longo dos últimos anos: Sioli (1967); Gibbs (1972); Furch (1984); Shalard (1980). Os rios transportam materiais sólidos dissolvidos na água, entre eles carbono orgânico.

Segundo Junk (1985), há forte interação entre as terras inundadas e os rios, sendo difícil obter medidas diretas do carbono que vai de um sistema para outro. Tal problema se relaciona com a estimativa das taxas de decomposição da biomassa, sendo importante para o presente estudo.

É possível diferenciar entre vegetais lenhosos e não lenhosos, mas é difícil fazer essa diferenciação entre material lenhoso da floresta nas áreas inundadas e nas não inundadas. Tipos diferentes de vegetais se decompõem de forma muito diferenciadas sob a água. As taxas de decomposição variam nas fases terrestre e aquática. As plantas com baixo conteúdo de celulose e lignina, como herbáceas, se decompõem muito facilmente.

Segundo Richey (1982), 50% do peso das plantas herbáceas são perdidos em duas semanas após o enchimento, sendo de 70 a 90 % do peso perdidos após 4 meses de exposição à água. Esses dados variam muito para outros casos, podendo-se tomar em média 40% do peso sendo perdido em quatro meses, entre as plantas que se decompõem (RICHEY, 1982). A situação é outra no caso da madeira de troncos e galhos de árvores, sendo verificado pelos autores que árvores de duas áreas inundadas têm decomposição reduzida na falta de oxigênio, podendo resistir por longos períodos (RICHEY, 1982).

A metodologia da OECD para estimativa de emissão de carbono refere-se à emissão de CH<sub>4</sub> por áreas inundadas, entre elas os reservatórios de hidrelétricas. Há uma variedade de situações de áreas inundadas, como pântanos, planícies e lagos. Os dados de Aselmann e Crutzen (1989) para emissão média de metano vão desde 11 kg C/km<sup>2</sup>/dia até 189 kg C/km<sup>2</sup>/dia. O período anual de produção de

CH<sub>4</sub> varia de 122 a 365 dias. Convertendo os valores acima para emissão anual, ela vai de 4 g C/m<sup>2</sup>/ano a 69 g C/m<sup>2</sup>/ano.

Mais especificamente, Devol *et al.* (1988) mediram o fluxo de CH<sub>4</sub> em áreas inundadas pelo rio Amazonas no início do período de cheias. A emissão média encontrada foi de 75 kg C/km<sup>2</sup>/dia na floresta inundada, de 90 kg C/km<sup>2</sup>/dia em lagos e de 590 kg C/km<sup>2</sup>/dia onde havia plantas flutuantes. Convertendo-os em valores anuais, tem-se, respectivamente, 27, 33 e 215 g C/m<sup>2</sup>/ano.

Outro ponto importante para comparação é a presença do carbono na água, sob forma de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. A alta presença de CO<sub>2</sub> nas águas das terras inundadas é maior do que a concentração de equilíbrio com a atmosfera (JUNK, 1985; RICHEY, 1982).

Junk (1985) concluiu, independentemente dos reservatórios, que as terras inundadas na Amazônia são uma importante fonte de carbono, que é normalmente transportado pelos rios. Furch (1984) encontrou valores médios do carbono total nas águas da Amazônia entre 8,7 e 16,2 mg C/L.

## Anexo B

### Medições em Reservatórios e em Lagos Naturais pelo Mundo

Medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> foram realizadas em 25 lagos e quatro rios na região norte do Alasca, encontrando-se importante presença de ambos os gases. O fluxo de gás para a atmosfera proveniente dos corpos d'água variou de -6,5 (absorção) até 59,8 mmol de CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/dia e de 0,08 a 1,02 mmol de CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dia. A emissão média de carbono fixou-se em torno de 24 g C/m<sup>2</sup>/ano (65,75 kg C/km<sup>2</sup>/dia). (KLING *et al.*, 1992)

---

Estudos de emissão de metano nas áreas alagadas tropicais tiveram um grande avanço na década de 80, principalmente na Amazônia e em áreas de florestas equatoriais africanas. (BARTLETT *et al.*, 1993)

As medições foram realizadas em florestas alagadas, corpos d'água sem vegetação e corpos d'água com cobertura vegetal. Os fluxos medidos variaram de 7,5 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia a 967 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia e, nas áreas alagadas com cobertura vegetal, foi medido um fluxo médio de 200 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia.

---

Fluxos difusivos de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> na interface água-ar foram calculados a partir da concentração dos gases na água em planícies de inundação vegetadas no Pantanal, baseados em dados coletados ao longo do período de um ano. (HAMILTON *et al.*, 1995)

Os resultados revelaram que é cerca de duas vezes maior o fluxo de CO<sub>2</sub> que sai da água em relação ao que entra de O<sub>2</sub>. Os fluxos médios medidos foram:

O<sub>2</sub>: 0,18 nmol/cm<sup>2</sup>/s;

CO<sub>2</sub>: 0,34 nmol/cm<sup>2</sup>/s;

CH<sub>4</sub>: 0,017 nmol/cm<sup>2</sup>/s.

---

Segundo trabalhos desenvolvidos pelo *U.S. Geological Survey*, concluiu-se que as emissões anuais de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> em lagos da região central do Minnesota dependem (são proporcionais) à contribuição hidrológica de carbono pelas águas da bacia de drenagem contribuinte. (STRIEGL *et al.*, 1998). As emissões médias anuais foram estimados em:

Lago William: 1,6 mol CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/ano;

Lago Shingobee: 1,9 mol CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/ano;

Lago Shingobee: 8,0 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/ano.

---

Medidas de concentração de metano realizadas em testemunhos de sedimentos em lagos de tundra e taiga no Alaska indicam que a concentração de metano aumenta na medida em que as amostras são retiradas de regiões mais profundas do sedimento (PHELPS *et al.*, 1998).

Medições de fluxo de metano também foram realizadas empregando-se câmaras de difusão indicando forte desprendimento do gás logo após o degelo do lago. Os valores medidos com as câmaras variam de 2,07 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/ano (5,6 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia), em 1995, a 1,49 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/ano (4,0 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia), em 1996, sendo esta medida realizada cerca de dez dias após o degelo do lago. Estimativas de emissão também foram realizadas empregando-se o modelo de difusão na camada limite e por medidas de concentração de metano na água, chegando a valores de 1,79 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/ano (4,9 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia), dez dias após o degelo, e de 2,28 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/ano (6,2 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia), na estação do verão.

---

Experimentos para a investigação de taxas de emissão de CH<sub>4</sub> em riachos do estado do Tennessee, Estados Unidos, foram realizados, revelando supersaturação desse gás na camada limite da água. Os valores encontrados variam de 17,6 a 41,4 vezes maiores do que a concentração de equilíbrio na atmosfera adjacente (JONES *et al.*, 1998). As taxas de emissão situaram-se numa faixa de 0,4 a 13,2 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia. Segundo esse trabalho, diferenças de resultados de concentração x taxas de emissão podem ser atribuídas a variações na descarga subsuperficial e na concentração da água subterrânea. Os resultados sugerem que a principal fonte de metano é o solo orgânico inundado.

---

Emissões de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> foram determinadas em 11 pontos de amostragem para dois reservatórios hidrelétricos no Canadá, inundados em 1978 e em 1983. A campanha de coleta de dados perdurou por dois anos seguidos e os fluxos de CH<sub>4</sub> para atmosfera situaram-se entre 5 a 10 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia, enquanto que para o CO<sub>2</sub> os valores variaram de 500 a 1.000 kg CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/dia. (DUCHEMIN *et al.*, 1995)

Foram determinados dois tipos de fluxos:

- regulares: 88% do total, no caso do CH<sub>4</sub>, e 87%, no caso do CO<sub>2</sub>;

- acima da média: que refletem condições de forte vento e colunas de água menores que um metro.

Perfis de concentração de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> de gás dissolvido na coluna d'água revelaram que a oxidação e a advecção horizontal são os fatores-chave de controle para a emissão de gases para a atmosfera.

---

Medições de gases de efeito estufa também foram realizadas no reservatório da hidrelétrica de Petit Saut, na Guiana Francesa, fechado em 1994 e com cerca de 300 km<sup>2</sup> de área (GALY LACAUX *et al.*, 1997). Os resultados encontrados foram os seguintes:

- Fluxos difusivos de metano: medições realizadas entre março de 1994 e fevereiro de 1995 (de 120 a 3.240 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia);
- Fluxos de metano por bolhas: medição realizada em março de 1994 (2-3 metros de profundidade, 1.404 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia, e 6 metros de profundidade, 936 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia) e em setembro de 1994 (5 a 6 metros de profundidade, 600 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia, e 7 a 9 metros, 240 kg CH<sub>4</sub> km<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>);
- Fluxos difusivos de dióxido de carbono: média das emissões em três diferentes locais do reservatório em kg CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/dia (setembro de 1994, 1.296; dezembro de 1994, 4.800; maio de 1995, 5.328; setembro de 1995, 10.248).

---

Um trabalho experimental desenvolvido para medir fluxos contínuos de emissão de gases de efeito estufa de lagos foi desenvolvido por uma equipe de pesquisadores dos Estados Unidos. Segundo esse estudo, três parâmetros são fundamentais para o cálculo de emissões de acordo com o modelo de cálculo de fluxo na camada limite água-ar, a saber (SELLERS *et al.*, 1995):

- Concentração de CO<sub>2</sub> na água (dissolvido);
- Concentração de CO<sub>2</sub> no ar, imediatamente superior à camada d'água;
- Velocidade do vento.

A frequência das medidas é fundamental para a precisão dos resultados pois os fatores variam conforme mudam as condições ambientais. Para se ter medidas de alta frequência, é preciso de um medidor contínuo de concentração de CO<sub>2</sub> na água, no ar e de velocidade do vento.

A partir dessas medidas, chegou-se à conclusão que, em lagos eutróficos e rasos, alterações diárias podem ocorrer devido às altas taxas de respiração e fotossíntese. Em lagos oligotróficos, a concentração de CO<sub>2</sub> na água e no ar tendem ao equilíbrio.

---

Uma pesquisa realizada no ano de 1992, em 1993-1994 (inverno) e 1994-1995 (inverno) no Lago Nojiri no Japão (4,4 km<sup>2</sup>) revelou que o fluxo difusivo de metano não é o sumidouro significativo de CH<sub>4</sub> naquele lago (UTSUMI *et al.*, 1998).

A taxa média de emissão foi de 4,5 kg CH<sub>4</sub>/dia para todo o lago, o que corresponde a uma taxa de 1,02 kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia. Os autores chegaram à conclusão que o principal sumidouro de CH<sub>4</sub> é a oxidação na coluna d'água, removendo cerca de 94% do CH<sub>4</sub> no período analisado. A taxa de oxidação situou-se em 67,8 kg/dia para o lago todo, correspondendo a 15,4 kg/km<sup>2</sup>/dia.

---

Outra pesquisa realizada pelo *U. S. Geological Survey* dos Estados Unidos em lagos do estado de Minnesota descobriu que apenas uma pequena proporção do CH<sub>4</sub> dissolvido na água é originária de fontes externas, sendo que uma parcela do metano pode estar dissolvida em águas subterrâneas que alimentam o lago (STRIEGL *et al.*, 1998). A maior parte do CH<sub>4</sub> dissolvido na água em lagos temperados do norte é produzida por decomposição anaeróbica no sedimento do lago. O CH<sub>4</sub> que é produzido em águas mais profundas pode ser transformado, à medida que migra para regiões superiores, em biomassa ou em CO<sub>2</sub> pelas bactérias metanotróficas, podendo também ser emitido para a atmosfera.

Os lagos tendem a emitir CH<sub>4</sub> continuamente para a atmosfera durante o período de degelo, enquanto que, no caso do CO<sub>2</sub>, o fluxo pode ser positivo ou negativo, dependendo das condições de fotossíntese ou respiração biológica do lago.

Muitos lagos são emissores líquidos de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, em bases anuais. Porém, as relações entre carga de carbono para os lagos, processos dentro do lago e emissões gasosas para a atmosfera não são bem conhecidas.

---

Medições de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> foram realizadas em dois lagos naturais dos EUA, empregando-se câmaras de difusão, entre o mês de maio e de outubro de 1992. Foram empregadas 12 câmaras para cada lago, sendo as câmaras de 0,25 m de diâmetro e 0,30 m de altura, empregando-se nas coletas

seringas, a cada 30-45 minutos. A concentração do gás foi determinada por cromatografia gasosa (STRIEGL *et al.*, 1988).

Nesse caso, foi detectado que 67% das emissões de CH<sub>4</sub> e 46% das emissões de CO<sub>2</sub> ocorrem durante o primeiro dia após o degelo da camada superficial do lago. Os valores medidos para câmaras de difusão variam de 0,12 a 94,1 mmol CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dia no lago Willians e de 0,8 a 46,4 mmol de CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dia no lago Shingobee. Os fluxos de CO<sub>2</sub> são respectivamente 0,36 a -0,15 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/dia (lago Willians) e de 0,29 a -0,12 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/dia (lago Shingobee).

Segundo os cálculos realizados, o lago Willians recebe cerca de 2,0 mol C/m<sup>2</sup>/ano, por carga hidrológica e perde cerca de 1,5 mol C/m<sup>2</sup>/ano para a atmosfera.

No lago Shingobee, as cargas são da ordem de 6,5 a 8,6 mol de C/m<sup>2</sup>/ano e as perdas pela atmosfera, 9,9 mol C/m<sup>2</sup>/ano.

Nesse mesmo estudo, estimou-se que cerca de 62% (lago Willians) e 79% (lago Shingobee) do CH<sub>4</sub> produzido nos lagos é também consumido internamente e a diferença emitida para a atmosfera.

---

O Laboratório de Ozônio do INPE vem estudando as emissões de metano proveniente de áreas alagadas e da queima da biomassa (ALVALD *et al.*, 1998).

Desde 1994, o INPE, em conjunto com a UFMS, realiza um programa experimental na região do Passo da Lontra, no Pantanal mato-grossense. Nesse experimento, mede-se a emissão de metano em uma lagoa perene da região. Foram empregadas câmaras estáticas flutuantes, onde são coletadas amostras de ar em tempos regulares, em cilindros de aço inoxidável. As amostras são encaminhadas ao laboratório do INPE para cromatografia gasosa, empregando-se um cromatógrafo com detetor de ionização de chama.

Foram realizadas campanhas mensais nos anos de 1997 e 1998, no período de verão (janeiro, fevereiro e março) onde ocorre a inundação do Pantanal, trazendo maior número de nutrientes para a lagoa. O fluxo médio neste período foi de  $101,2 \pm 111,60$  kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia em áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, com a temperatura média da água em torno de 33° C. No período de inverno (maio, junho e julho), o fluxo médio foi de  $1,0 \pm 0,6$  kg CH<sub>4</sub>/km<sup>2</sup>/dia, com a temperatura da água de 23° C. Foi verificado um desnível da água de um metro entre o verão e o inverno, correspondente a uma variação sazonal de 1 para 100 nas medições realizadas.

Em um estudo recente desenvolvido pela UQAM para a Hydro Quebec (DUCHEMIN *et al.*, 1999), que analisa as amostras coletadas no último verão em alguns reservatórios e lagos naturais no Canadá, demonstra que os dados provenientes de câmaras de difusão e do método da camada limite dos reservatórios hidrelétricos são da mesma ordem de magnitude nos lagos naturais pesquisados. Os valores encontrados são os seguintes:

**Tabela B1** – Valores médios de fluxo de dióxido de carbono e metano em reservatórios hidrelétricos e lagos naturais no Canadá

Reservatório	Observação	Fluxo de CO <sub>2</sub> (kg /km <sup>2</sup> /dia)	Amostras	Fluxo de CH <sub>4</sub> (kg /km <sup>2</sup> /dia)	Amostras
Gouin	80 anos idade	1.165 +/- 685	11	4,5 +/-2,8	18
Lagos de referência	a Gouin	1.700 +/- 950	10	9,4 +/- 3,6	9
Manic 5	35 anos idade	1.170 +/- 470	19	15 +/- 10	24
Lagos de referência	a Manic 5	1.010 +/- 405	16	2,2 +/- 2,3	14
Lago Brome	poluído	1.360 +/- 400	9	11,5 +/- 1,4	12
Lago St-Louis	Rio St-Lawerence	2.090 +/- 820	10	36,5 +/- 10	12
Lago Croche	menos poluído	730 +/- 170	10	9,3 +/- 2,9	11

Fonte: Duchemin *et al.*, 1999.

## Anexo C

### Descrição do Método de Trabalho

#### 1 Método de Amostragem dos Gases

##### 1.1 Amostragem dos gases por funis

##### 1.1.1 Procedimentos para captura das 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).

Na maioria dos casos, os funis eram colocados em um *transect*, partindo de regiões mais rasas até locais mais profundos. Nas regiões mais rasas, eram colocados cinco funis, diminuindo esse número à medida que se caminhava para áreas mais profundas.

Os funis eram submersos e ar totalmente retirado, para se evitar contaminação pelo ar atmosférico presente. Em seguida, as garrafas coletoras, cheias de água, eram acopladas aos funis.

A escolha do sítio de amostragem e a seqüência dos funis foram determinadas por parâmetros como: densidade da vegetação alagada, tempo de enchimento do local (cota do reservatório), profundidade, presença de vegetação semi-afogada, região geográfica do reservatório.

Foi considerado ainda, como variável de decisão, o tempo de deslocamento de barco até o local da amostragem, bem como sua representatividade para o reservatório como um todo.

Na maioria das vezes, os funis permaneciam por 24 horas no local, onde durante esse período as bolhas que desprendiam-se do fundo eram capturadas. As garrafas coletoras eram então fechadas hermeticamente dentro da água e recolhidas, para posterior análise em laboratório. Entretanto, em algumas ocasiões, empregou-se um tempo menor do que 24 horas e os valores obtidos foram extrapolados para o tempo exato da experiência.

Pela experiência acumulada nas amostragens de gases com funis, admite-se que há uma forte correlação inversa entre profundidade e emissão de gases por bolhas. Assim, era incluído um número maior de funis nas regiões mais rasas, que desprendiam mais gás.

### 1.1.2 Cálculo das médias de emissão de gases de efeito estufa por ebulição

As taxas médias de emissão de gases, em unidades de mg m<sup>2</sup>/dia, calculadas para cada reservatório, são parâmetros descritivos destinados ao uso em estimativas futuras de emissão de gases em reservatórios não estudados.

Dos reservatórios se conhece normalmente a área total, distinta da “área que emite”, não conhecida. Por isso, determinou-se as taxas de emissão referidas à área total, além das taxas referidas à “área que emite”.

Em cada reservatório, a extensão da área que emite foi estimada a partir das equações de primeiro grau, experimentais, que descrevem a emissão ebulitiva  $y$  do gás em função da profundidade  $x$  do sítio amostrado. Para cada reservatório, foi obtida uma equação  $y(x)$ , e a partir dela, foi calculada o valor de  $x_0$  tais que:

$$y(x_0) = 0.$$

Nesse modelo, cada reservatório emite na faixa delimitada pela sua margem e o lugar geométrico de profundidade  $x_0$ . Assim é definida a “área que emite”. No reservatório de Barra Bonita, no entanto, o valor  $x_0$  é maior que a profundidade máxima dele: isto apenas significa que o reservatório emite em sua área total.

São mostradas, na Tabela C1, as equações  $y$  e as “profundidades de corte”  $x_0$ .

**Tabela C1** – Funções  $y(x)$  que descrevem a taxa de ebulição de metano e os respectivos valores  $x_0$ , na segunda campanha

Hidrelétrica	$y(x)$	$x_0$
Miranda	$y = 46,13 - 1,25 x$	36,9
Três Marias	$y = 153,20 - 6,35 x$	24,1
Barra Bonita	$y = 6,13 - 0,16 x$	38,3
Segredo	$y = 4,99 - 0,07 x$	71,3
Xingó	$y = 107,89 - 5,58 x$	19,4
Samuel	$y = 32,90 - 1,89 x$	17,4
Tucuruí	$y = 8,10 - 0,33 x$	24,5

Para se calcular a extensão da “área que emite”, seria necessário lançar mão do tabelamento cartográfico da área de cada reservatório em função da profundidade, que supostamente existiu em cada projeto. Porém, somente fragmentos dessas tabelas foram encontrados.

Para suprir esta falta, foi estabelecido um modelo simples, o da “pirâmide”. Neste, o reservatório corresponde a uma pirâmide “invertida”, cuja base é o espelho da água e cuja altura é a profundidade  $h$  junto à barragem. Se for considerada uma sucessão de situações em que o nível da água baixa progressivamente, é possível definir um conjunto de pares de valores compostos pelas áreas  $A_i$  do espelho da água e dos correspondentes valores  $h_i$  das profundidades junto à barragem. Os valores  $A_i$ , neste modelo, são proporcionais ao quadrado de  $h_i$ , sendo  $c$  a constante de proporcionalidade característica em cada reservatório.

$$A_i = c h_i^2 \quad \text{Equação 1}$$

Para todos reservatórios são conhecidas as áreas  $A$  do espelho de água e as profundidades  $h$  junto à barragem, podendo-se calcular a constante  $c$ .

Usando-se este valor  $c$  e valor  $x_0$ , pode ser calculada quase diretamente a área que emite  $A_e$ . Mas primeiro calcula-se a área  $A_n$  que não emite:

$$A_n = c (h - x_0)^2 \quad \text{Equação 2}$$

A área que emite é

$$A_e = A - A_n \quad \text{Equação 3}$$

Portanto, usando-se o modelo da pirâmide, não é necessário reproduzir integralmente o tabelamento cartográfico do reservatório para se estimar a “área que emite”.

Por exemplo, para a hidrelétrica de Três Marias, na segunda campanha de medição de  $\text{CH}_4$  por ebulição, a Tabela G1 apresenta:

$$y = 153,20 - 6,35x \quad \text{Equação 4}$$

1 - A partir desta equação, calcula-se em que profundidade  $x$  a taxa  $y$  é nula:

$$\begin{aligned} 0 &= 153,2 - 6,35 x \\ x &= 24,12 \text{ m} \end{aligned}$$

ou seja, da profundidade de 24,12 m em diante não há mais emissão de bolhas.

2 - Usando-se a Equação 4, pode-se calcular a emissão média da margem até a profundidade para qual a emissão se anula. O valor desta média dada pela equação é a metade da emissão máxima:

$$y = 76,6 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$$

3 - Para o modelo da pirâmide, calcula-se a constante  $c$  a partir da Equação 1, com a área total e a profundidade máxima do reservatório:

$$c = A / h_{\text{max}}^2$$

$$c = 1.009,32 / 50,20^2 \text{ km}^2/\text{m}^2$$

$$c = 0,40052 \text{ km}^2/\text{m}^2$$

4 - A Equação 2 fornece o valor da área que não emite:

$$A_n = c (h - x_0)^2$$

$$A_{24,12} = 0,40052 \times (50,20 - 24,12)^2$$

$$A_{24,12} = 272,53 \text{ km}^2$$

5 - A área que emite, conforme a Equação 3, é:

$$A_e = 1.009,32 \text{ km}^2 - 272,53 \text{ km}^2$$

$$A_e = 736,79 \text{ km}^2$$

6 - Calculou-se então a massa  $M$  emitida por dia:

$$M = 736,79 \times 10^6 \text{ m}^2 \times 76,6 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$$

$$M = 56,44 \times 10^9 \text{ mg CH}_4/\text{dia}$$

7 - Dividindo-se  $M$  pela área total do reservatório, tem-se a emissão média do reservatório:

$$E_m = 56,44 \times 10^9 \text{ mg CH}_4/\text{dia} / 1.009,32 \times 10^6 \text{ m}^2$$

$$E_m = 55,92 \times \text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$$

A Tabela C2, a seguir, apresenta as equações de ebulição para os demais casos.

**Tabela C2** – Funções  $y(x)$  que descrevem a taxa de ebulição para os demais casos

<b>Hidrelétrica</b>	<b>CH<sub>4</sub> - 1<sup>a</sup> camp</b>	<b>CO<sub>2</sub> - 1<sup>a</sup> camp.</b>	<b>CO<sub>2</sub> - 2<sup>a</sup> camp.</b>
Miranda	$y = 60,19 - 1,1004 x$	$y = 0,6954 - 0,0226 x$	$y = 0,4662 - 0,0123 x$
Três Marias	$y = 568,4 - 14,113 x$	$y = 8,1915 - 0,261 x$	$y = 11,081 - 0,4647 x$
Barra Bonita	$y = 9,6174 - 0,2398 x$	$y = 0,3043 - 0,0118 x$	$y = 0,1084 - 0,005 x$
Segredo	$y = 5,8274 - 0,1155 x$	$y = 0,3633 - 0,0066 x$	$y = 0,0693 - 0,0005 x$
Xingó	$y = 3,902 - 0,0427 x$	$y = 0,0217 - 0,0003 x$	$y = 0,5121 - 0,0267 x$
Samuel	$y = 38,658 - 1,2384 x$	$y = 1,5636 - 0,0894 x$	$y = 1,0344 - 0,0596 x$
Tucuruí	$y = 33,962 - 0,9872 x$	$y = 0,3352 - 0,0086 x$	$y = 0,2818 - 0,0139 x$

## 1.2 Amostragem dos gases por câmaras de difusão

### 1.2.1 O processo de troca difusiva de gás medido por meio de câmaras

Na interface água-atmosfera, processa-se continuamente uma troca de gases. Os gases dissolvidos na água desprendem-se para o ar e os componentes do ar se dissolvem na água. Nesse processo, um equilíbrio dinâmico tende a se estabelecer e ele é alcançado, para um certo gás, quando sua taxa de difusão fica igual a sua taxa de dissolução.

Processos difusivos relevantes neste trabalho são facilmente representáveis se a concentração de cada gás for expressa em termos de pressão parcial. Na fase gasosa, a pressão parcial de cada componente é a fração da pressão total que é devida a este componente. Por exemplo, em um local onde a pressão atmosférica é 100 quilopascal (kPa), a pressão parcial do oxigênio é de 21 kPa pois este gás está presente na atmosfera em proporção de 21 vol%.

A concentração do oxigênio dissolvido na água pode ser expressa em termos de sua pressão osmótica. Água com oxigênio dissolvido exibindo pressão osmótica de 21 kPa estará em equilíbrio com a atmosfera mencionada. Em termos de massa por unidade de volume, a pressão osmótica de oxigênio de 21 kPa corresponde a cerca de 9 mg O<sub>2</sub>/L, a 25°C.

Quanto à nomenclatura, pode ser observado na literatura recente que o termo “pressão osmótica” como medida de concentração às vezes é substituído pelas denominações “pressão” ou “pressão parcial” ou “tensão parcial”, grandezas estas representadas em kPa.

A média mundial da concentração de gás carbônico no ar é de 360 ppm em volume, que corresponde a uma pressão parcial de 0,036 kPa; a do metano é de 1,8 ppm. Água com pressões parciais superiores desprenderá esses gases para a atmosfera. Por exemplo, encontram-se em reservatórios tipicamente tensões parciais de CO<sub>2</sub> dissolvido na água entre 0,05 e 0,15 kPa, que correspondem a concentrações atmosféricas de 500 a 1.500 ppm de CO<sub>2</sub>, em volume. Deve-se mencionar, aqui, que tais valores de pressões parciais de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> dissolvidos na água são obtidos, sem serem explicitamente procurados, no decorrer do trabalho com câmaras para medição das taxas de difusão, devido aos cálculos intermediários necessários.

### 1.2.2 Procedimento da medida de taxas de difusão

No presente trabalho, foram utilizadas câmaras resultantes de um longo processo de aperfeiçoamento, inspirado no equipamento utilizado por Lucotte *et al.* (1997).

O equipamento original era proposto para medir troca gasosa na interface água-ar. Para isso, era utilizada uma câmara de acrílico transparente, melhor descrita como uma caixa sem tampa, usada em posição invertida, tocando a superfície da água de modo a aprisionar um certo volume de ar. Periodicamente eram retiradas amostras do volume e analisadas por cromatografia.

Se houvesse difusão de, digamos, gás carbônico, sua concentração no volume da câmara cresceria com o tempo, o gráfico concentração x tempo permitiria o cálculo da taxa de difusão. As dificuldades com essas câmaras são: aquecimento do volume gasoso pela radiação solar, dificuldade de manuseio na presença de ondas, susceptibilidade a ocasional captura de bolha, duração de cerca de cinco vezes o tempo com a câmara menor, devido ao grande volume em comparação à área (grande espessura de camada gasosa, ~ 20 cm).

As modificações introduzidas foram:

- Miniaturização da câmara, diminuindo o volume de tipicamente 20 L para 40 mL o que baixou a espessura de camada gasosa para 2 cm, possibilitando a redução do tempo para 10 minutos.
- Utilização simultânea de duas câmaras idênticas para tempos de troca de 5 min e 10 min, evitando-se com isto o possível efeito da diminuição do volume resultante da amostragem repetida em câmara única.
- Uso da câmara miniaturizada na posição ligeiramente submersa, obtendo-se com isso uma redução da ação das ondas e termostatização.

### 1.2.3 Princípio de medição das taxas de troca

O uso das câmaras visa obter dados que permitam calcular as taxas de troca de gás carbônico ou de metano. No experimento, o número mínimo de equilibrações, para se determinar a taxa de troca, seria dois, por exemplo com duração de 3 e 6 minutos. Mas como será discutido adiante, adicionando-se uma terceira equilibração, por exemplo com 12 minutos de duração, é possível aumentar a confiabilidade da medição, decorrendo da redundância. O volume de 50 mL de ar introduzido em cada câmara tem uma superfície de contato com a água de 22 cm<sup>2</sup>, como se a câmara fosse um copo invertido, mantido sobre 22 cm<sup>2</sup> da superfície natural, mas com a diferença de a câmara estar submersa. Os mesmos processos de troca gasosa que se passam na superfície natural se iniciam também na superfície de 22 cm<sup>2</sup> da câmara submersa.

Em uma experiência típica de equilibração, dirigia-se ao lugar a ser amostrado e, com o barco ancorado em lugar de profundidade desejada, executava-se o experimento de equilibração. Para

isso, primeiro era tomado um volume de ~500 mL de ar, aspirando-o com a bomba de pistão provida de tubo de transferência. Esse ar era tomado a cerca de 10 cm acima do nível da água. Cerca de 35 mL eram então transferidos para um tubo de ensaio, para posterior determinação das concentrações dos gases investigados.

As câmaras eram abastecidas com os 50 mL de ar da seguinte maneira: o tubo de transferência da bomba era ligado à válvula da câmara e a câmara submersa e preenchida com água, pendendo de sua bóia. Eram transferidos os 50 mL de ar da bomba, provocando expulsão de volume igual de água de seu interior. O tempo do início da equilibração era observado, a válvula da câmara era fechada e o tubo de transferência desligado. Assim o conjunto câmara-bóia passava a flutuar quase livremente, agitado pela ondulação. Um cordão amarrado à bóia da câmara mantinha-o ao alcance.

Terminado o tempo de equilibração, por exemplo três minutos, a câmara era fechada ainda de baixo d'água, o que era possível devido a um pistão que cada câmara possuía, o qual, além de fechá-la, servia ainda para expulsar depois o ar do seu interior. Isso era feito após ligação da câmara a um tubo de ensaio, através de tubo de transferência, com manipulação apropriada de sua válvula e de seu pistão. Assim, em três experimentos de equilibração, eram obtidas três amostras de ar que passaram por equilibrações de 3, 6, e 12 minutos.

No reservatório de Xingó, por exemplo, em um dos experimentos, foram obtidas três amostras. Os respectivos resultados da análise, junto com o da amostra 9C3 inicial, não equilibrada, são mostrados a seguir, listando-se a concentração  $y$  de  $\text{CO}_2$  em função do tempo  $t$  de equilibração.

**Tabela C3** – Concentração de  $\text{CO}_2$  em função do tempo de equilibração, em experimento com câmara de difusão em Xingó

Tempo - $t$ (min)	Concentração de $\text{CO}_2$ - $y$ (ppm)
0	411,5
3	603,5
6	749,5
12	945,8

A função  $y(t)$ , que representa a concentração de  $\text{CO}_2$ , em ppm, na câmara após  $t$  minutos de equilibração, pode ser descrita por uma função exponencial da forma:

$$y = C + A \exp(-k.t)$$

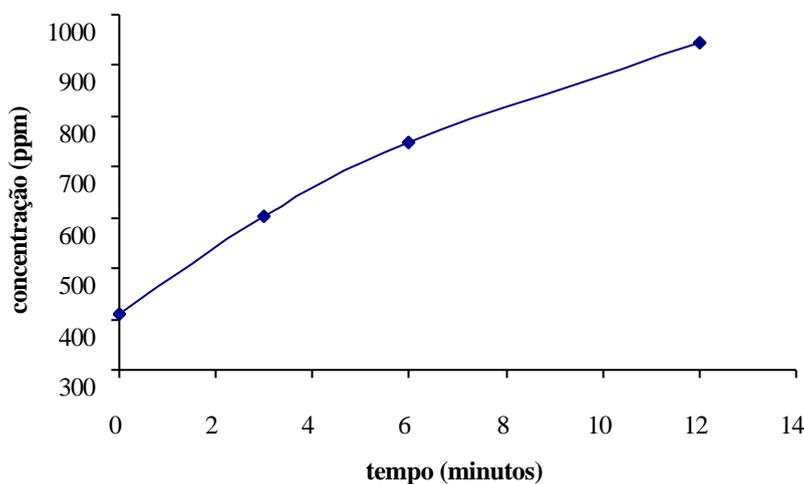
Esta forma é o resultado teórico decorrente de uma suposição simples, qual seja que a taxa de troca de gás  $dy/dt$ , entre a água do reservatório e o ar da câmara, seja proporcional à diferença das concentrações  $C$  na água e  $y$  no ar da câmara. Simbolicamente:

$$dy/dt = k (C - y)$$

onde  $k$  é a constante de proporcionalidade. Através de integração, obtém-se a função dada acima, , sendo  $A$  uma constante arbitrária de integração.

Essa função permite calcular a taxa de difusão verdadeira ou seja a taxa que prevalece entre a superfície da água e a atmosfera. No experimento de equilíbrio com câmaras, precisa ser levado em conta o efeito de saturação. As amostras foram representadas no Gráfico C1. Nota-se que existe um efeito de saturação: com o correr do tempo, a concentração de gás carbônico dentro da câmara se aproxima assintoticamente do valor  $C$ , que é a concentração deste gás dissolvido na água, neste exemplo 1171,87 ppm; a saturação acontece porque o volume contido na câmara é pequeno comparado à área da superfície de troca.

**Gráfico C1** – Pontos experimentais da concentração de CO<sub>2</sub> nas câmaras de difusão, em função do tempo de equilíbrio



A curva sólida (cor) foi ajustada estatisticamente aos quatro pontos experimentais, sendo ela:

$$y = 1.171,87 - 762,54 \exp(-0,09972 t).$$

Duas observações podem ser feitas sobre o efeito da saturação: (a) mesmo em presença da saturação, a taxa de troca no instante inicial, dentro da câmara, é idêntica à que prevalece na

superfície livre da água. Essa igualdade é consequência de a taxa ser proporcional à diferença das concentrações ( $C - y$ ); no instante inicial, a concentração  $y$  dentro da câmara ainda não foi atingida pelo efeito de saturação, sendo portanto idêntica à concentração fora da câmara. (b) a saturação é teoricamente prevista e o grau em que os experimentos seguem a previsão é uma medida da confiabilidade dos resultados.

Para se obter o ajuste da função  $y(t) = C + A \exp(-k.t)$ , optou-se pela abordagem algébrica: o tempo  $t$  é a variável independente, a concentração  $y$ , a dependente, e  $C$ ,  $A$  e  $k$  são três constantes com seus valores a determinar. Se  $y$  e  $t$  forem conhecidos experimentalmente, como o são após experimentos com câmaras, a função pode ser escrita como uma equação em que  $C$ ,  $A$  e  $k$  são três incógnitas. Usando três pares de dados experimentais, escrevem-se então três equações com três incógnitas:

$$411,5 = C + A \exp(-k.0)$$

$$603,5 = C + A \exp(-k.3)$$

$$749,5 = C + A \exp(-k.6)$$

Esse conjunto caracteriza um sistema de três equações com três incógnitas. Quando resolvido, obtém-se os seguintes valores numéricos para as constantes:

$$C = 1.212,9 \text{ ppm}$$

$$A = - 801,4 \text{ ppm}$$

$$k = 0,0913 \text{ min}^{-1}$$

Dentro do enfoque algébrico, apenas três dos quatro pares experimentais de  $(y, t)$  podem ser usados. O quarto par experimental, embora carregue informação, não pode ser usado no ajuste das constantes neste formalismo, pois o procedimento algébrico em sua exatidão não tolera pequenos desvios experimentais dentro de um conjunto onde há redundância de dados, entrando em colapso na presença do menor erro experimental.

Tais desvios, porém, são perfeitamente tolerados por outro método, o método estatístico. Ele permite usar um conjunto redundante de dados, neste caso um número maior de equações (quatro) do que número de incógnitas (três). Ajusta a função ao conjunto experimental, mesmo redundante, definindo uma função de desvio quadrático  $S$ , algo semelhante à variância, e impondo a condição que o conjunto das três constantes  $C$ ,  $A$  e  $k$  seja aquele que produz desvio  $S$  mínimo:

$$S = \sum (y_i - (C + A \cdot \exp(-t_i \cdot k)))^2$$

onde  $(y_i, t_i)$  são pares experimentais de concentração e tempo. A minimização de  $S$  implica que suas derivadas parciais em relação a  $C$ , a  $A$ , e a  $k$  devem ser nulas simultaneamente (solução por computador):

$$\frac{\partial S}{\partial C} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial A} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial k} = 0.$$

Há uma certa diferença entre a trinca de constantes obtidas anteriormente pelo método algébrico e essa, conseguida pela minimização estatística de  $S$ . O método estatístico, porém, é melhor por utilizar um número maior de dados.

Outra vantagem do método estatístico é permitir computar uma função de desvio para medir de quanto é o afastamento dos dados em relação à função ideal. Nesse trabalho, foi definido um  $s$  relativo à constante  $C$ , assim:

$$s(\%) = 100 \cdot S^{1/2} / (n C)$$

onde  $n$  é o número de pares experimentais de dados, neste caso, quatro. Pode-se dizer que  $s$  é uma espécie de desvio percentual de um ponto experimental típico em relação ao valor ideal da função. A utilidade do desvio  $s$  é no julgamento da confiabilidade de um conjunto de dados de equilíbrio. Estimativas de emissão de  $\text{CO}_2$  com  $s$  pequeno são mais confiáveis que os de  $s$  grande.

O exemplo dado acima, com as amostras de Xingó, era um caso de emissão de  $\text{CO}_2$  da água para o ar. A taxa verdadeira de emissão prevalece na câmara apenas no primeiro instante da equilíbrio, quando a concentração de  $\text{CO}_2$  dentro da câmara é idêntica à sua concentração no ar da superfície do reservatório. Nos instantes seguintes, a crescente saturação dentro da câmara reduz a taxa de emissão. Porém, pequena manipulação algébrica permite calcular a taxa verdadeira a partir da função que ficou disponível pelo ajuste aos dados:

$$y = C + A \exp(-k \cdot t)$$

Tomando sua derivada temporal resulta:

$$dy/dt = - A k \exp(-k.t)$$

Essa derivada representa a variação  $T$  da concentração  $y$  dentro dos 50 mL do volume da câmara, com o avanço do tempo, que, no caso do exemplo, foi um crescimento. Ela pode ser calculada para qualquer instante  $t$ , inclusive para o instante inicial. No instante inicial,  $t = 0$ , e assim obtém-se :

$$(dy/dt)_{t=0} = - A k$$

ou seja,  $T = - A k$

Usando os valores das constantes  $A = -762,54$  e  $k = 0,09972$ , achados pelos ajustes estatísticos, obtém-se:

$$T = 76,04 \text{ (ppm/min)}$$

que é a taxa segundo a qual a concentração de  $\text{CO}_2$  cresce dentro da câmara no primeiro instante da equilíbrio.

A taxa  $T$ , que é idêntica a  $dy/dt$ , por sua vez, é obtida usando os quatro pares de dados experimentais de equilíbrio, ajustando a eles a função  $y(t)$  e calculando  $dy/dt$  no instante de  $t=0$ .

Essa taxa, que descreve o aumento temporal da concentração dentro da câmara, pode ser transformada na taxa  $Q$  que mede quanta massa de  $\text{CO}_2$  atravessa por dia a interface de contato de  $22 \text{ cm}^2$  entre a água e o ar da câmara. Tal transformação é feita da seguinte maneira:

$$Q = \frac{T \text{ ppm/min} \times 10^{-6} \text{ ppm}^{-1} \times 50 \text{ mL} \times 1440 \text{ min/dia} \times 44 \text{ mg CO}_2/\text{mmol}}{22 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 25,11 \text{ mL/mmol}}$$

ou

$$Q = 57,35 T \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{dia}$$

Da fração constam: o volume de ar da câmara, que é de 50 mL, o fator 1440 min/dia, que converte dias para minutos, a massa milimolar do  $\text{CO}_2$ , que é 44 mg  $\text{CO}_2/\text{mmol}$ , a área da câmara de  $22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  e o volume milimolar de um gás ideal que, em Xingó, por ocasião dos experimentos, era de 25,11 mL/mmol (para um valor mais exato, têm que ser obtidas a temperatura e a pressão do local, para se fazer a conta usando a equação  $p V = n R T$  ). Deve-se observar que os dimensionais que

constam da fração simplificam-se, resultando  $\text{mg CO}_2/\text{m}^2/\text{dia}$ . No caso do  $\text{CH}_4$ ,  $Q = 20,85 \text{ T mg CH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$ , pois sua massa molar é  $16 \text{ mg CH}_4/\text{mmol}$ .

Em resumo, para as experiências de equilibração em Xingó, a taxa  $Q$  ( $\text{mg CO}_2/\text{m}^2/\text{dia}$ ) é obtida a partir da taxa  $T$  ( $\text{ppm}/\text{min}$ ), multiplicando  $T$  pelo fator 57,35.

Para o exemplo aqui usado, resulta:

$$Q = 4361 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{dia}$$

valor este derivado das amostras e que constitui emissão de  $\text{CO}_2$ . O desvio  $s$  associado a esse valor foi de 0,56%.

A hipótese de que a velocidade de troca gasosa entre a água e o ar contido na câmara seja proporcional à diferença das respectivas concentrações e que resulta na forma da função que descreve a equilibração, ficou plenamente justificada no decurso deste trabalho. A concentração de  $\text{CO}_2$  (ou metano) no instante inicial dentro da câmara é idêntica à concentração no ar ambiente e sendo assim é interessante examinar o efeito do vento que afeta a concentração no ar.

Se há constante difusão de gás da água para a atmosfera, na ausência de vento, se estabeleceria sobre a água uma camada de concentração elevada de, digamos,  $\text{CO}_2$  e este se difundiria através do ar para as grandes altitudes, onde prevalece a pressão parcial média mundial.

A turbulência estabelecida pelo vento tem dois efeitos. Chegam “pulsos” de ar com concentração menor, seja vindo das margens, seja das alturas, e ficam sobrepostos à difusão de uma segunda rota de fuga do  $\text{CO}_2$  do lago, que é a convecção. Assim, na presença de vento, se estabelece uma flutuação na concentração do  $\text{CO}_2$  no ar atmosférico, que se constata quando trazido ao laboratório como amostra do “instante inicial”. Tal flutuação descreve a contínua variabilidade das condições de troca gasosa entre água e o ar e não conduz a erro, e sim a uma avaliação mais realista da situação.

No ambiente aquático, existe um sumidouro para o  $\text{CO}_2$  dissolvido que é a fotossíntese realizada pelo fitoplâncton. A fotossíntese converte  $\text{CO}_2$  em compostos orgânicos a uma taxa de, tipicamente,  $100\text{-}300 \text{ mg C}/\text{m}^2/\text{dia}$ , tomando taxas encontradas no reservatório do Broa como exemplo. Mas, concomitantemente com a fotossíntese, a respiração libera  $\text{CO}_2$  ao longo da cadeia alimentar.

Dependendo das atividades relativas entre fotossíntese e cadeia alimentar, pode haver difusão ou absorção de  $\text{CO}_2$  atmosférico.

Durante a noite a fotossíntese diminui sensivelmente devido à falta de luz, mas a respiração e metanogênese continuam. Por esta razão, devem ser investigadas não apenas as taxas diurnas de troca difusiva de CO<sub>2</sub>, mas também as noturnas. Pela mesma razão, podem-se esperar variações de taxas difusivas em função da intensidade de iluminação. As condições podem ser de sol intenso, nublado, nuvens carregadas, etc.

Contracenando com esses fatores citados, que tendem a introduzir flutuações aparentando aleatoriedade, vem o conteúdo de CO<sub>2</sub> dissolvido na água a agir em direção da estabilização. A água é um reservatório de CO<sub>2</sub> dissolvido. Em água não muito profunda, em torno de 30 m de profundidade, com a concentração de ~500 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, há ~1500 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, que compreende a ordem de grandeza que a produção primária consegue consumir em um dia. Já na coluna da atmosfera a 360 ppm CO<sub>2</sub>, existem ~1000 mol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Os dois valores são da mesma ordem de grandeza: a massa total de CO<sub>2</sub> residente na atmosfera e a massa total dissolvida na água rasa, que se confrontam em cada metro quadrado de interface de contato.

Assim, não se deve esperar que um desses dois reservatórios predomine sobre o outro, impondo uma rígida constância de concentrações, mas devem-se esperar flutuações moderadas, sem mudanças drásticas da concentração de CO<sub>2</sub>, no decurso de um dia.

Possivelmente, em períodos mais longos, tanto a fotossíntese como a troca gasosa estão sempre presentes, mesmo com intensidade pulsante, e a troca gasosa não conseguiria alterar as concentrações rapidamente, pois seu efeito seria moderado pelos lastros dos dois reservatórios.

Sob o ponto de vista do confronto de dois reservatórios, cabe idealizar um método adicional para quantificar a taxa de troca gasosa através da interface: se for medida a concentração de um gás na água e no ar perto da interface e se forem simultaneamente avaliadas as condições de vento, é de se esperar que haja boa correlação do conjunto destes parâmetros com a taxa de troca. Tal procedimento, por ser mais simples, permitiria aumentar o número de sítios amostrados, dentro dos recursos disponíveis.

## 2 Método de Análise das Amostras

As baixas concentrações de metano foram analisadas por detetor de ionização de chama na saída de uma coluna de polímero poroso (hayesep D). Concentrações de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> foram analisadas por detetor de condutividade térmica com uma coluna de tamiz molecular 5A. O gás carbônico foi analisado pelo mesmo detetor com a coluna *hayesep D*. Os gases utilizados foram: ar sintético SS, hidrogênio UP e nitrogênio AP, adquiridos da Aga.

No laboratório cromatográfico, instalado em um dos alojamentos próximos ao reservatório, foram feitas 800 análises cromatográficas de amostras de gás provenientes do reservatório.

O cromatógrafo com detetor de condutividade térmica é o modelo U-13 da Construmaq São Carlos. O cromatógrafo de ionização de chama usa um eletrômetro Gow-Mac processando sinal provindo de detetor adaptado ao mesmo cromatógrafo.

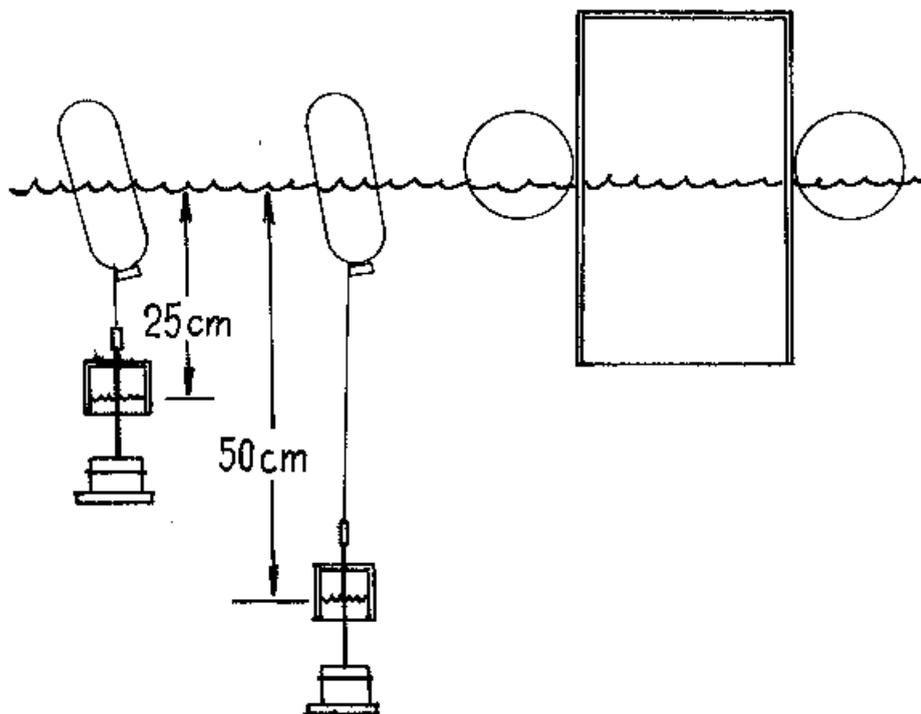
Os dois tipos de detetores fornecem áreas dos picos cromatográficos relativos aos gases analisados. Estes foram CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

### 3 Comentários Adicionais sobre a Medição das Taxas de Troca Difusiva

Em resumo, foram usadas nas medições, simultaneamente, três câmaras de 50 mL cada. São localizadas a 25 cm abaixo do nível d'água e têm uma interface água - ar, expondo os 50 mL de ar contidos à troca difusiva com o gás dissolvido na água. Nas três câmaras, a troca se processa durante tempos diferentes: 3, 6 e 12 minutos. Decorridos esses tempos, o processo de troca é interrompido e o ar de cada câmara é levado, em tubo seco, para análise da concentração de metano e gás carbônico. Verifica-se que a concentração desses gases não varia linearmente com o tempo em que foi exposto à troca gasosa, mas que existe um efeito de saturação.

Usando esse efeito de saturação, se estabelece, mediante cálculo, a taxa de troca gasosa no instante inicial da experiência, quando o efeito de saturação ainda não se manifestava. Essa é então tomada como taxa de troca verdadeira, aquela que normalmente existe entre a superfície do reservatório e o ar atmosférico.

**Figura C1** – Duas câmaras de troca gasosa, com volume de 50 mL, a duas profundidades diferentes e “câmara estática” com 18 L de volume e suportada por bóias na superfície (Não estão representados, nas câmaras, os dispositivos de alimentação e retirada do ar para equilíbrio)



Concebeu-se então uma maneira de verificar se é mensurável uma eventual diferença entre a taxa de troca difusiva quando a interface de troca não é a superfície livre do reservatório. Em vez de 25 cm de profundidade, se a posição da câmara for 50 cm abaixo do nível da água, o efeito da profundidade deverá ser cerca de duas vezes maior. Por outro lado, se o efeito da profundidade não for mensurável, taxas obtidas a partir de câmaras situadas a 25 cm e a 50 cm de profundidade deverão ser estatisticamente indistinguíveis. Com o intuito de avaliar um possível efeito foram conduzidas várias medições de taxas, usando no mesmo local do reservatório três câmaras a 25 cm de profundidade e simultaneamente outras três a 50 cm, cada trinca de câmaras produzindo uma taxa de troca gasosa por experimento. A taxa referente a 25 cm poderá ser então comparada com a de 50 cm.

As câmaras com 50 mL de volume foram por esta equipe desenvolvidas e diferem do equipamento padrão utilizado por outros grupos de pesquisa, que têm utilizado câmaras estáticas. Foram feitas também comparações entre aquelas câmaras, que são usadas em método dinâmico, e as câmaras estáticas.

Inicialmente serão apresentadas a descrição do procedimento e as taxas de troca obtidas com as câmaras dinâmicas a diferentes profundidades. (Figura C1)

As medidas com câmaras dinâmicas foram feitas em dois reservatórios, o de Tucuruí (reservatório incluído nesta pesquisa) e o de Itaipu (objeto de um outro contrato com a Itaipu Binacional). As taxas resultantes das amostragens a 25 cm de profundidade são marcadas com *C*, enquanto as referentes à profundidade de 50 cm com *P*.

Na Tabela C2 se vê que as diferenças percentuais variam entre -61% e +54%, numa distribuição aparentemente aleatória, a simetria da distribuição sugere fortemente que *P* e *C* são estatisticamente indistinguíveis.

**Tabela C2** – Comparação de taxas de difusão de metano, medidas simultaneamente a 25 cm (*C*) e 50 cm (*P*) de profundidade, em vários sítios dos reservatórios de Itaipu e de Tucuruí (As diferenças entre *P* e *C* são expressas como percentuais em relação a cada taxa *C*)

<b>Itaipu</b>							<b>(mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dia)</b>	
<i>C</i>	1,99	2,13	1,44	57,30	(1,55)		<b>MÉDIA</b>	
<i>P</i>	2,78	2,32	1,69	22,13	(19,74)			
Diferença <i>P-C</i>	40%	9%	17%	-61%	(1174%)*			
<b>Tucuruí</b>							<b>(mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dia)</b>	
<i>C</i>	4,44	8,95	13,04	9,63	13,41	28,53	<b>MÉDIA</b>	
<i>P</i>	6,84	6,37	7,86	8,69	8,29	14,71		
Diferença <i>P-C</i>	54%	-29%	-40%	-10%	-38%	-48%		

\* excluído

Quanto à comparação entre os resultados obtidos com as câmaras dinâmicas e as câmaras estáticas, foram obtidas três séries de medidas nos reservatórios de Tucuruí, Samuel e Itaipu. As medidas de Tucuruí e Samuel sugeriam que a câmara estática estava subestimando as taxas por um fator aproximado de dois.

O experimento em Itaipu foi conduzido com o ar da câmara estática circulado por bomba externa a uma taxa de 1,5 L/min, entre a bomba de cerca de 10 mL de volume e a câmara de 18 L. O efeito do bombeamento era apenas o de circular o ar contido na câmara. A bomba era ligada à câmara por dois dutos: por um deles ela aspirava o ar da câmara, sendo devolvida pelo outro. Com isso, a diferença das taxas medidas com câmaras dinâmicas e com câmaras estáticas foram reduzidas significativamente.

Para diminuir o efeito do aquecimento interno da câmara, bloqueou-se a entrada de luz solar direta na câmara em dois reservatórios pesquisados, cobrindo a câmara com um tecido branco, de malha, que bloqueava a luz solar direta mas permitia passar a claridade difusa. Ficou claro que existe vulnerabilidade da câmara estática perante a luz solar e a temperatura. Alternativamente, o uso de cobertura da câmara com papel alumínio bloqueia qualquer tipo de entrada de luz, tornando o ambiente interno da câmara ainda mais artificial, possivelmente alterando atividade fotossintética no seu interior.

**Tabela C3** – Comparação das taxas de difusão de metano obtidas mediante uso de câmaras pequenas, *C* (50 mL - processo dinâmico) e câmaras grandes, *G* (18 L - processo estático)

<b>Tucuruí</b>							(mg CH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /dia)
<i>C</i>	4,44	8,95	13,04	9,63	(13,41)	28,5	<b>Média</b>
<i>G</i>	7,45	4,72	4,08	10,05	( 0,68)	18,2	
Razão <i>C/G</i>	0,60	1,9	3,2	0,96	(excluída)	1,6	1,7
<b>Samuel</b>							(mg CH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /dia)
<i>C</i>	(14,6)	6,13	15,86				<b>Média</b>
<i>G</i>	(52,3)	2,10	8,11				
Razão <i>C/G</i>	(excluída)*	2,9	2,0				2,4

\* por falta de termostatização

A razão *C/G* compara as taxas obtidas usando câmaras pequenas e grandes. Razão igual à unidade indica concordância, que de fato houve quando o ar da câmara grande estava circulando. Com a variabilidade das medidas reportadas, a média 1,0 da razão *C/G* surpreende.

A comparação do desempenho das câmaras pequenas e grandes foi feita usando as taxas de difusão de metano. Foi escolhido o metano, e não o gás carbônico, por se tratar de um sistema mais simples. Todos resultados obtidos nas campanhas, aqui reportados, da troca difusiva de metano mostraram que havia apenas difusão desse gás para o ar mas nunca absorção. Já no caso do gás carbônico, havia tanto difusão quanto absorção, com esta última acontecendo em quase metade das coletas. No conjunto de fontes e sumidouros de gás carbônico que existe nas camadas superficiais da água, havia dominância ora de uns, ora de outros. Já o sistema metano-água-ar, com a dominância da difusão apenas, é menos complicado que o do gás carbônico, sendo assim mais apropriado para a comparação do desempenho das câmaras.

## 4 Determinação da Variabilidade e dos Limites de Detecção do Método Cromatográfico

O método cromatográfico de análise usado nas determinações da concentração de metano e gás carbônico foi examinado quanto à sua reprodutibilidade e sensibilidade. Repetiu-se vinte vezes a análise de um padrão com concentrações próximas às das amostras. Dos dois conjuntos resultantes, de vinte valores de concentração, foram calculadas as médias  $x$  e os desvios-padrões  $s$ , e desses foi calculada a variabilidade  $v$ , expressa como porcentagem:

$$v = 100 s / x \text{ [%]}$$

Em um segundo conjunto de análises, injetando sempre volume de ar igual no cromatógrafo, diminuía-se a concentração de metano ou de gás carbônico, até que a altura do pico cromatográfico tivesse altura duas vezes maior que a altura dos picos do ruído (flutuações aleatórias da linha base). A concentração que cumprisse esta condição era tomada como limite de detecção. Variabilidade e limites de detecção constam da Tabela C4.

**Tabela C4** – Variabilidade e limite de detecção das análises cromatográficas

Espécie	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Variabilidade	3,18 %	4,33 %
Limite de detecção	27,8 ppm	0,12 ppm

## 5 Concentrações de Metano e Gás Carbônico na Água

As Tabelas C5 e C6 visam caracterizar os reservatórios pela concentração dos gases metano e dióxido de carbono dissolvidos na água. As concentrações foram obtidas de duas maneiras: uma, pelo método da difusão e a outra, pelo método da dupla dessorção.

No primeiro caso, o ajuste das concentrações obtidas com as câmaras pequenas foi obtido com equações da forma:

$$y = C + A \exp(-k.t)$$

Tais funções descrevem a concentração  $y$  do gás, no ar contido na câmara, em função do tempo  $t$ . As grandezas  $C$ ,  $A$  e  $k$  são constantes. A constante  $C$  representa a concentração do gás dissolvido na água em unidades de pressão parcial, dada em ppm. Por exemplo, se a constante  $C$  em uma das medições for 900 ppm CO<sub>2</sub>, o significado disso é que na água existia CO<sub>2</sub> numa tal concentração que estaria em equilíbrio com ar contendo 900 ppm de CO<sub>2</sub>.

Para o gás dissolvido na água, sua pressão parcial, medida em ppm, e a correspondente massa de gás contido na água medida, em mg/L, relacionam-se por meio do coeficiente de solubilidade, que pode ser encontrado em tabelas. Na Tabela C5 foram listadas as concentrações dos gases na água em mg/L, mas os valores não foram obtidos das respectivas pressões parciais e coeficientes de solubilidade tabelados e, sim, pelo método da dupla dessorção:

Em um pequeno número de amostras de água superficial, tipicamente duas a quatro amostras por reservatório, eram coletados 250 mL de água da superfície, em frascos de 250 mL, e levados ao laboratório. Um volume de 25 mL dessa água era substituído por hidrogênio, sendo o frasco agitado intensamente durante 60 segundos para estabelecer partição de equilíbrio do CO<sub>2</sub> (ou CH<sub>4</sub>) entre a água e o hidrogênio. Em seguida, determinava-se, por cromatografia, a massa de CO<sub>2</sub> (ou CH<sub>4</sub>) que tinha passado da água para o hidrogênio. Por meio de duas extrações sequenciais desse tipo, era possível calcular a massa total de gás contido na amostra de água, determinando assim a concentração do gás na água em mg/L. A partir do resultado da análise cromatográfica, calculava-se também a pressão parcial de equilíbrio do gás contido na água, em ppm.

Na Tabela C6 são confrontadas concentrações de metano e dióxido de carbono dissolvidos na água, obtidas por ambos os métodos. Observa-se, para Miranda, uma pressão parcial de 109 ppm para o metano medido por dupla dessorção, enquanto que, por difusão, foi obtida uma pressão parcial de 15,8 ppm. Para o gás carbônico, a diferença foi menos drástica, mas existe também.

A explicação para essa diferença consiste em que nem todo metano e gás carbônico residentes em um volume de água estão dissolvidos. Parte destes gases encontram-se dentro de partículas que constituem sólidos em suspensão, por exemplo detritos ou plâncton morto. No método da difusão, mensura-se, principalmente, o gás molecularmente dissolvido. Já no método de dupla extração, ocorre forte agitação que libera, senão todo, pelo menos grande parte do gás das partículas.

Esse é um dos resultados deste relatório, os gases não estão homogeneamente distribuídos em solução na água, evidenciando-se que parte dos gases está associada a partículas heterogêneas em suspensão. Essa distribuição heterogênea pode contribuir à variabilidade da amostragem nos experimentos de difusão.

**Tabela C5 – Gases dissolvidos na água superficial (quantificados por dupla dessorção)**

Reservatório	Metano	Gás carbônico
	mg CH <sub>4</sub> /L	mg CO <sub>2</sub> /L
Miranda	6,20	2,60
Três Marias	0,84	0,85
Barra Bonita	3,00	1,70
Segredo	2,60	0,18
Xingó (Urucu)	0,92	19,50
Samuel	9,90	4,20
Tucuruí	5,20	0,98

**Tabela C6 – Concentração de gases na água superficial (determinada por dupla dessorção ou a partir da constante C obtida dos dados de difusão das câmaras pequenas)**

Reservatório	Dessorção	Difusão	Dessorção	Difusão
	ppm CH <sub>4</sub>	ppm CH <sub>4</sub>	ppm CO <sub>2</sub>	Ppm CO <sub>2</sub>
Miranda	109 ± 65%	15,8 ± 87%	1.580 ± 18%	964 ± 46%
Três Marias	21,2 ± 31%	8,9 ± 182%	835 ± 34%	718 ± 29%
Barra Bonita	116 ± 41%	14,5 ± 61%	236 ± 60%	795 ± 62%
Segredo	85,7 ± 5%	4,32 ± 42%	356	513 ± 37%
Xingó	760	18,3 ± 86%	1.076 ± 17%	377 ± 45%
Samuel	108 ± 13%	8,6 ± 25%	1.564 ± 18%	1.704 ± 42%
Tucuruí	153 ± 50%	8,99 ± 32%	2.344 ± 95%	770 ± 51%
			$\bar{x}$ 1.142	$\bar{x}$ 834

Para fins de caracterização das medidas é fornecido na próxima tabela um resumo dos ventos dominantes por ocasião das coletas das amostras.

**Tabela C7** – Velocidades de vento medidas durante a segunda campanha

Reservatório	Máxima	Mínima	Média
	m/s	m/s	m/s
Miranda	6	0	2
Três Marias	3	0	1,8
Barra Bonita	4	0	2,3
Segredo	5	0	3,2
Xingó	3,5	0	1,4
Samuel	2	0	0,3
Tucuruí	3	0	1,5

Pode-se atribuir à ação do vento a uniformidade de concentração prevalecente na camada superficial da água de pelo menos 0,5 m de espessura.

O método de medir troca gasosa, com o uso de câmaras pequenas, produz essencialmente os mesmos resultados que o método tradicional que usa a câmara estática. A medição da taxa de troca gasosa feita a 25 cm de profundidade produz resultados similares à medição feita a 50 cm de profundidade, como também seria se a medição fosse feita na interface água-atmosfera. Explica-se esta coincidência pela ação do vento que, embora intermitente, sempre esteve presente. Ele promove uma convecção da camada superficial da água, homogeneizando os solutos, inclusive gases dissolvidos.

## Anexo D

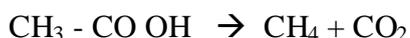
### Descrição dos Processos de Emissão de Gases

O reservatório contém, no fundo, biomassa inundada que se decompõe anaerobicamente, emitindo principalmente CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> e, secundariamente, CO<sub>2</sub>. Na decomposição aeróbica, apenas CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> são emitidos.

Além dos gases emitidos há, durante a decomposição, a formação de resíduo biologicamente inerte, que são a humina e os ácidos húmicos e fúlvicos, podendo estes últimos ser lixiviados e levados pela água. Esses compostos inertes são polímeros fenólicos e se originam principalmente da lignina, presente no material lenhoso.

Dessa forma, parte do carbono originalmente presente é emitido como gases, outra parte dele é levada pela água como ácidos húmicos e fúlvicos. Resta o resíduo fenólico, insolúvel e inerte, a humina, que pode ser incorporada ao fundo do reservatório como sedimento e, junto com sílica e argila sedimentadas, se encaminhar para a fossilização.

No fundo do reservatório, além da biomassa terrestre inundada, há algum sedimento fresco formado por detritos do plâncton. A decomposição do sedimento, efetuada principalmente por bactérias, demanda oxigênio a taxas superiores que a difusão pode suprir, estabelecendo-se assim o regime anóxico. Neste, ocorre o rearranjo das ligações químicas dentro do material orgânico, gerando energia que as bactérias necessitam. Em um primeiro estágio, resultam ácidos orgânicos que, em seguida, são decompostos sob forma de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, como pode ser exemplificado com o ácido acético sujeito à metanogênese:



Naquele ambiente, é gerado também nitrogênio gasoso, pela desnitrificação e pela decomposição de aminoácidos. Esses gases são gerados molecularmente e ficam inicialmente dissolvidos na água intersticial dentro do sedimento. Mas, no caso do metano e do nitrogênio gasoso, que são pouco solúveis, há segregação dos mesmos em bolhas. Estas crescem em tamanho até não poderem mais ser retidas no interior do sedimento, quando irrompem e sobem à superfície. O gás carbônico tende a permanecer em solução por ser mais solúvel, mas pequena fração entra nas bolhas formadas.

Nem todo metano gerado no sedimento é transportado no gradiente vertical da água por bolhas. Parte dele difunde pela água em direção à superfície. Mas em seu caminho pelas camadas superiores há concentração crescente de oxigênio.

Bactérias presentes em suspensão têm a capacidade de utilizar o metano para fins energéticos combinando-o com oxigênio, produzindo gás carbônico e possivelmente outros compostos orgânicos.

Assim, a camada oxigenada do reservatório atua como uma fonte de absorção para o metano, podendo mesmo chegar a absorver o metano contido no ar atmosférico, caso em que se estabelece um fluxo de metano na direção ar-água. De modo semelhante, a fotossíntese forma uma fonte de absorção para o gás carbônico, podendo haver um fluxo deste gás da atmosfera para a água.

O gás emitido devido à decomposição da biomassa inundada constitui apenas uma fração do total de gás emitido pelo reservatório, pois há outra fonte de emissão de gases: na água do reservatório existem organismos.

O fitoplâncton, constituído principalmente por algas, efetua fotossíntese usando o gás carbônico presente, dissolvido na água. A biomassa fitoplanctônica cresce a uma taxa típica de 100 mg a 300 mg de carbono por metro quadrado por dia, valor constatado nas grandes reservatórios amazônicos.

A biomassa gerada por fotossíntese dá início à cadeia alimentar, com seqüências do tipo algas-protozoários-microcrustáceos-peixes. Nela, há geração de CO<sub>2</sub> e, possivelmente, de CH<sub>4</sub> que, junto com os corpos dos indivíduos mortos, servem de alimento a bactérias, que por sua vez geram gases, sejam em suspensão planctônica, sejam incorporados ao sedimento.

O gás emitido pelo reservatório provém, pois, da decomposição de matéria de duas origens. Uma, da biomassa original inundada e, a outra, da biomassa formada durante a fotossíntese sempre em curso na água do reservatório. A biomassa original, ao longo de sua decomposição, vai tendo reduzido o seu estoque de carbono e caminha para a inércia biológica, devendo diminuir sua parcela de emissão de gases ao longo do tempo. Já o gás emitido em consequência do plâncton tem taxa essencialmente constante ao longo do tempo, pois sua fonte é constantemente renovada.

A biomassa gerada por fotossíntese, em águas com temperaturas acima dos 30°C C, decompõe-se sem deixar resíduo insolúvel. Pode-se estabelecer um limite superior de emissão de gases para o estado contínuo do reservatório, atingido quando a biomassa original inundada deixar de emitir gás. Este é 80 mg C/m<sup>2</sup>/dia e seria atingido se não houvessem compostos solúveis gerados na decomposição, pois estes seriam removidos por lixiviação sem que houvesse emissão de gás.

Há incerteza sobre qual fração do material fotossintético planctônico é liberada sob forma de gás. É certo, no entanto, que, na ausência de importação de substâncias orgânicas, se os gases emitidos excederem essa taxa de 80 mg C/m<sup>2</sup>/dia, a diferença certamente seria devida à decomposição de

biomassa inundada originalmente. Esse critério poderá ser útil no julgamento sobre a existência do regime contínuo em um reservatório. Em resumo, as taxas de gases emitidos podem decompor-se em duas parcelas: uma que decresce a partir do enchimento do reservatório e outra constante.

Uma das interrogações que surgirão na utilização dos resultados deste trabalho é saber se, na taxa de emissão de gases, conta apenas a idade de inundação ou se a profundidade também tem influência sobre a decomposição, de maneira a variar a proporção de partição do carbono entre gás emitido e ácidos húmicos lixiviados.