



Empresa de Pesquisa Energética

NOTA TÉCNICA EPE/DEA/SMA 012/2022

Emissão de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios Hidrelétricos

Maio de 2022



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



GOVERNO FEDERAL



GOVERNO FEDERAL

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME/SPE

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Adolfo Sachsida

Secretária Executiva

Marisete Fátima Dadald Pereira

**Secretário de Planejamento e Desenvolvimento
Energético**

Paulo Sérgio Magalhães Domingues



Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

**Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e
Ambientais**

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Erik Eduardo Rego

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

Heloísa Borges Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Angela Livino

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - Ministério de Minas e Energia

- Sala 744 - 7º andar

Brasília – DF – CEP: 70.065-900

Escritório Central

Praça Pio X, nº 54 – 5º Andar

Rio de Janeiro – RJ – CEP: 20090-003

NOTA TÉCNICA EPE/DEA/SMA

012/2022

**Emissão de Gases de Efeito
Estufa em Reservatórios
Hidrelétricos**

Coordenação Geral

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Coordenação Executiva

Elisângela Medeiros de Almeida

Equipe Técnica

Ana Dantas Mendez de Mattos

Federica Natasha A. Sodré

Guilherme de Paula Salgado

Hermani de Moraes Vieira

Marcos Ribeiro Conde

NT EPE-DEA-SMA 012/2022

26 de maio de 2022

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso - “*double sided*”)

IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO E REVISÕES

<i>EXECUÇÃO</i>  Empresa de Pesquisa Energética		
<i>ÁREA DE ESTUDO</i> Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais (DEA) Superintendência de Meio Ambiente (SMA)		
<i>NOTA TÉCNICA</i> NT DEA 012/2022		
<i>PRODUTO</i> EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS		
<i>REVISÕES</i>	<i>DATA</i>	<i>DESCRIÇÃO SUCINTA</i>
R0	26/05/2022	Publicação original.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	6
2 COMO O TEMA É PERCEBIDO PELAS INSTITUIÇÕES ENVOLVIDAS	7
2.1 PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA - IPCC	7
2.2 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA	8
2.3 ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE ENERGIA HIDRELÉTRICA - IHA	10
2.4 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÕES - MCTI	11
3 EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA	13
3.1 PROCESSOS DE EMISSÃO DE GEE EM RESERVATÓRIOS	13
3.2 METODOLOGIAS PARA MONITORAMENTO E BALANÇO DE EMISSÕES	16
3.3 MEDIÇÃO DE GEE EM RESERVATÓRIOS	17
3.3.1 FLUXO DIFUSIVO	17
3.3.2 EMISSÕES EBULITIVAS	17
3.3.3 DEGASSING	18
3.4 EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS DE OUTRAS FONTES A MONTANTE DO RESERVATÓRIO	19
3.5 RESULTADOS DE BALANÇOS DE EMISSÕES EM RESERVATÓRIOS BRASILEIROS	20
4 EMISSÕES DE HIDRELÉTRICAS E DAS DEMAIS FONTES	25
5. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES EM RESERVATÓRIOS	29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
7 BIBLIOGRAFIA	32

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissão de CO ₂ e CH ₄ em ecossistemas fluviais naturais	13
Figura 2- Caminhos do CH ₄ e do CO ₂ em um reservatório de água doce com hipolimnion anóxico	15
Figura 3 - Detalhe de uma câmara de difusão (1000 ml)	17
Figura 4 - Detalhe de funis invertidos para medição de bolhas	18
Figura 5 - Medição de bolhas com funis invertidos em rios, próximo à margem	18
Figura 6 - Reservatórios estudados pelo projeto Balcar	21
Figura 7 - Emissões de GEE no ciclo de vida por fonte de geração de energia elétrica (gCO ₂ eq./kWh)	26
Figura 8 - Faixas de emissão de GEE no ciclo de vida para as tecnologias avaliadas (gCO ₂ eq./kWh)	28

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Intensidade de GEE (gCO ₂ eq./kWh) no cenário floresta remoção	22
Gráfico 2 - Intensidade de GEE (gCO ₂ eq./kWh) no cenário floresta neutra	23
Gráfico 3 - Intensidade de GEE (gCO ₂ eq./kWh) no cenário floresta emissão	23

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características dos reservatórios estudados no Projeto Balcar	21
Tabela 2 - Emissões de GEE no ciclo de vida por fonte de geração de energia elétrica (gCO ₂ eq./kWh)	27

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as mudanças climáticas são um tema central e determinante na discussão energética mundial e no planejamento do setor, principalmente com a perspectiva de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Recentemente, a importância do tema também cresceu sob a ótica de adaptação das infraestruturas energéticas existentes e futuras frente às alterações climáticas. Nesse sentido, há um movimento político global para que os países busquem voluntariamente fontes energéticas renováveis menos emissoras, conforme pode ser observado por meio dos compromissos de contribuição de redução de emissões apresentados pelos países no âmbito do Acordo de Paris. As usinas hidrelétricas, historicamente, sempre foram vistas como uma das principais opções de geração de energia renovável, com baixas emissões. Todavia, ultimamente cresceram os questionamentos de que as emissões atribuídas a uma usina hidrelétrica poderiam ser expressivas ao se contabilizar aquelas associadas aos reservatórios. Quando uma área é alagada e são alteradas as condições locais, alteram-se também os processos nos ecossistemas e, conseqüentemente, o balanço geral de carbono.

Tais questionamentos impulsionaram uma gama de estudos a fim de se aprofundar sobretudo na dinâmica do carbono em reservatórios hidrelétricos, a partir de métodos de medição das emissões nos diversos processos observados. De forma geral, há consenso de que é um assunto complexo, já que inúmeras variáveis influenciam na dinâmica de um reservatório, como, por exemplo, a descarga de efluentes domésticos a montante do barramento. Assim, frequentemente, é difícil isolar os efeitos atribuídos à formação do reservatório ou assumir padrões dada as distintas condições de cada reservatório. Diante desses desafios, instituições vêm se posicionando sobre a questão e se empenhando para tratar as incertezas e buscar respostas mais precisas, a partir do desenvolvimento de ferramentas para padronizar métodos e possibilitar comparações.

Nesta Nota Técnica, pretende-se discutir as principais questões que perpassam o tema, incluindo como ele é percebido pelas principais instituições que atuam na área de energia e de mudanças climáticas em nível internacional e nacional. Em outra escala, serão explicados os processos de emissões de GEE em reservatórios e suas variáveis relevantes, assim como metodologias utilizadas para a medição. Também serão discutidos os resultados de estudos que chegaram a um balanço de emissões de reservatórios e suas conclusões. Por fim, serão listadas as medidas de mitigação frequentemente adotadas para minimizar as emissões oriundas de reservatórios hidrelétricos.

2 COMO O TEMA É PERCEBIDO PELAS INSTITUIÇÕES ENVOLVIDAS

A fim de compreender melhor os aspectos políticos e o arcabouço institucional em que o tema das emissões associadas a reservatórios hidrelétricos está inserido, foi essencial trazer a visão das instituições que exercem maior influência nos encaminhamentos da questão e que servem como referência técnica e política para o tema. Dessa forma, chegou-se a três organizações internacionais (IPCC, IHA e IEA) e uma nacional (MCTI).

2.1 Painel Intergovernamental Sobre Mudança do Clima - IPCC

O IPCC (International Panel on Climate Change) é uma organização das Nações Unidas que tem como objetivo avaliar informações científicas relacionadas a mudanças climáticas para subsidiar as políticas climáticas governamentais mundiais e nacionais. O IPCC conta com cientistas voluntários de alto nível, independentes e ligados a organizações e governos, para avaliar as publicações científicas de todo o mundo a fim de sintetizar e divulgar o conhecimento da mudança do clima, identificar os consensos na comunidade científica e as lacunas de conhecimento. O grupo avalia as causas das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros e como a adaptação e a mitigação podem reduzir os riscos. Os Relatórios produzidos são fundamentais para embasar as negociações internacionais sobre mudanças do clima. O IPCC se organiza em três grupos de trabalho: o grupo I trata da ciência física das mudanças climáticas; o grupo II trabalha com impactos, adaptação e vulnerabilidade; e o grupo III com mitigação (IPCC, 2021). Além dos relatórios, o órgão é responsável pela principal referência metodológica para cálculo das emissões, intitulada Diretrizes do IPCC para os Inventários Nacionais de GEEs, publicada em 2006 e revisada periodicamente.

O Relatório sobre energias renováveis e mitigação da mudança do clima (IPCC, 2011), fruto do grupo de trabalho III, traz uma discussão das tecnologias de todas as fontes renováveis e sua contribuição atual e potencial para gerar energia de forma sustentável, destacando o seu papel para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O capítulo 5 é dedicado exclusivamente à energia hidrelétrica, apresentando um panorama geral desta fonte. Neste documento, as emissões são abordadas na avaliação do ciclo de vida dos projetos hidrelétricos.

O IPCC aponta a dificuldade para se generalizar as emissões ao longo do ciclo de vida de projetos hidrelétricos, considerando a diversidade de condições de clima e cobertura do solo e a gama de tecnologias possíveis. Além disso, na maior parte dos casos, os impactos são alocados apenas na geração de energia elétrica, poucos dos estudos

revisados consideraram as emissões líquidas associadas à formação do reservatório. Este fato pode enviesar as análises das emissões em todo ciclo de vida do projeto.

Quanto às emissões atribuídas à alteração do uso do solo, o IPCC afirma que qualquer mudança no uso da terra afeta estoques e fluxos de GEEs terrestres. Na esfera dos sistemas energéticos, tais emissões são especialmente relevantes para bioenergia, hidrelétricas, mineração e extração de petróleo.

Particularmente para hidrelétricas, foram feitas algumas considerações a partir de estudos que envolveram diversas universidades e países. A primeira é que há decomposição de matéria orgânica e emissão de GEEs em qualquer sistema de água doce, natural ou artificial. A segunda é que condições ecológicas similares implicam em sistemas aquáticos com emissões similares. Outra inferência é que há casos em que os sistemas aquáticos absorvem mais CO₂ do que emitem. O IPCC ainda orienta que para a avaliação das emissões líquidas de reservatórios deve-se partir de uma estimativa das emissões naturais do ecossistema (antes do reservatório), além de descontar a fixação de carbono do ecossistema (antes e depois do reservatório).

Ainda que admita a importância das emissões relacionadas à implantação de reservatórios de água, estas não foram consideradas. A justificativa para a exclusão foram: a existência de lacunas significativas para toda a variedade de tecnologias e combustíveis; e a grande incerteza na quantificação de emissões líquidas de GEE. Quanto aos reservatórios de UHEs, no capítulo específico da fonte, também foi destacada a falta de consenso da comunidade científica sobre o tema.

2.2 Agência Internacional de Energia - IEA

A IEA (International Energy Agency) é uma organização internacional que trabalha com governos e indústria com a missão de garantir energia sustentável e segura para todos. A agência está no centro do diálogo global sobre energia, fornecendo análises respaldadas, dados, recomendações de políticas e soluções para os países membros e associados. São 30 países membros e oito associados, dentre eles, o Brasil. As análises são construídas sobre áreas temáticas, como eficiência e segurança energética, e abarcam produção de dados e estatísticas, treinamento, inovação e cooperação internacional. Com a compreensão da relevância do setor de energia para o combate às mudanças climáticas, este tema se tornou fundamental para o planejamento, a análise e a formulação de políticas energéticas, integrando diversos estudos produzidos pela Agência (IEA, 2021).

A IEA aborda as fontes e tecnologias a partir de programas de cooperação tecnológica. Neste contexto se insere o Grupo de Trabalho em Hidroeletricidade - IEA Hydro, que é uma plataforma global para o avanço da tecnologia hidrelétrica, incentivando o uso sustentável dos recursos hídricos para o desenvolvimento e gestão da energia hidrelétrica. No âmbito desta plataforma, são desenvolvidos diversos estudos e cabe destacar para esta NT o Anexo XII – Hidrelétricas e Meio Ambiente. O Anexo XII surgiu a partir do reconhecimento das incertezas e das posições divergentes que permeiam as emissões de GEE em reservatórios de UHEs. Assim, desenvolveu-se uma força tarefa para aumentar o conhecimento acerca do tema, intitulada “Gerenciamento do balanço de carbono em reservatórios de água doce” que está em andamento desde 2007.

Os objetivos da força tarefa são:

- aumentar o conhecimento dos processos associados às emissões de GEE do reservatório;
- estabelecer diretrizes para estudos de planejamento sobre o balanço de carbono em reservatórios;
- padronizar métodos de avaliação de fluxo de GEE;
- desenvolver uma metodologia para medir, modelar e gerenciar o balanço de carbono em reservatórios.

Nesse sentido, já foram publicados os seguintes relatórios técnicos que compõem as Diretrizes para a análise quantitativa das emissões líquidas de GEE de reservatórios:

- a. Volume 1: Programas de Medição e Análise de Dados. Outubro de 2012. Países membros: Brasil, Finlândia, Japão, Noruega e Estados Unidos.
- b. Contém recomendações de procedimentos para realizar campanhas de medição de GEE e análise de dados e para estimar as incertezas das emissões líquidas.
- c. Volume 2: Modelagem. Novembro de 2015. Países membros: Austrália, Brasil, China, Finlândia, França, Japão, Noruega e Estados Unidos.
- d. Apresenta uma referência para as análises quantitativas e para a modelagem de emissões líquidas de GEE e alterações no estoque de carbono.
- e. Volume 3: Gestão, Mitigação e Alocação. Janeiro de 2018. Países membros: Austrália, Brasil, China, Finlândia, Japão, Noruega, Estados Unidos e União Europeia.

Traz orientações para a gestão das emissões de reservatórios com probabilidade de emissões líquidas significativas, listando medidas de mitigação para reduzir as emissões. Também traz orientações para a alocação adequada de emissões, considerando os usuários dos serviços de água.

Vale mencionar a importância da contribuição brasileira para a Força Tarefa do Grupo de Trabalho em Hidroeletricidade da IEA Hydro, por meio do projeto estratégico “Monitoramento de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas”, que inclui o projeto Balcar, e é coordenado pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás).

2.3 Associação Internacional de Energia Hidrelétrica - IHA

A IHA é uma associação sem fins lucrativos cujo compromisso é o desenvolvimento responsável de usinas hidrelétricas. Ela atua em mais de 120 países e seus membros incluem os principais desenvolvedores, operadores e fabricantes de energia hidrelétrica do mundo, bem como organizações envolvidas em pesquisa, política, planejamento e financiamento. Os estudos da Associação buscam compreender a contribuição da energia hidrelétrica para a mitigação e adaptação ao clima, assim como os riscos associados aos projetos e às infraestruturas (IHA, 2021).

A IHA defende que a energia hidrelétrica é parte da solução para as mudanças climáticas, tornando possível que os países zerem suas emissões líquidas de carbono. Isso é possível graças aos atributos de flexibilidade e armazenamento dessa fonte que permitem o crescimento de outras fontes renováveis variáveis, como a eólica e a solar. No que tange às medidas de adaptação, ressalta a importância dos reservatórios para o abastecimento, o controle de enchentes e a irrigação (IHA, 2021).

Por outro lado, como já colocado, o IPCC alertou para o fato que poucos estudos avaliaram as emissões líquidas de reservatórios. A IHA também reconhece que a pegada de carbono da energia hidrelétrica é questionada, particularmente em função das emissões associadas à implantação de reservatórios. Embora muitos estudos tenham sido desenvolvidos, a complexidade dos processos bioquímicos e as especificidades de cada usina hidrelétrica são apontados como grandes desafios. A falta de consenso científico para quantificar essas emissões representa um obstáculo para a formulação de políticas energéticas e climáticas.

Diante disso, a IHA desenvolveu, junto com a UNESCO e com a cooperação de institutos científicos, uma ferramenta de cálculo das emissões de GEE atribuídas à criação e à operação de reservatórios hidrelétricos. A ferramenta, lançada em 2017, se chama G-res e seu uso é endossado por IEA, UNESCO e Banco Mundial. Um desafio listado para o uso da ferramenta é a necessidade de coletar dados primários em levantamentos de campo para um resultado consistente.

2.4 Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações – MCTI

O MCTI é o órgão do governo brasileiro responsável por periodicamente relatar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) informações atualizadas sobre diversas iniciativas no âmbito da agenda climática nacional. A mais recente comunicação foi a Quarta Comunicação Nacional do Brasil enviada à UNFCCC em 2020 (MCTI, 2020). O órgão também produz o Inventário Nacional de Emissões Antrópicas por Fonte e Remoções por Sumidouros de GEEs.

O MCTI desenvolveu um sistema computacional, chamado SIRENE, para disponibilizar os resultados e outras informações relacionadas à contabilização das emissões. O Ministério tem como referência metodológica as diretrizes e outros documentos elaborados pelo IPCC. O SIRENE tem por missão não só conferir segurança e transparência ao processo de elaboração de inventários de emissões, mas também ser suporte à tomada de decisão no âmbito de políticas, planos, programas e projetos na área de mudanças climáticas, no que tange à geração de conhecimento científico e à adoção de medidas de mitigação. Os estudos são divididos por setores: Tratamento de Resíduos; Agropecuária; Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Floresta; Energia; e Processos Industriais. A metodologia de cada um deles é detalhada nos relatórios setoriais específicos (SIRENE, 2021).

A base metodológica para o cálculo das emissões de mudança do uso da terra é explicada no relatório setorial Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Floresta. De acordo com a metodologia, pressupõem-se que as emissões atribuídas à formação de reservatórios de água poderiam ser alocadas tanto no setor de Uso da Terra, quanto no de Energia. No caso das emissões atribuídas à operação do reservatório hidrelétrico, parece mais razoável contabilizá-las no setor de Energia.

No entanto, ainda que no Inventário Nacional sejam previstas as emissões provocadas por mudanças do uso do solo, como a conversão em áreas alagadas, em nenhuma edição até agora, tampouco nas Estimativas Anuais de Emissões de GEE e nas Comunicações Brasileiras, as emissões relacionadas à formação e à operação de reservatórios hidrelétricos foram contabilizadas e alocadas para nenhum setor.

Diante do exposto, é notável que todas as instituições aqui elencadas reconhecem as incertezas que ainda permeiam o tema. Embora o conhecimento tenha avançado, as particularidades de cada projeto, assim como a complexidade dos processos trazem muitos desafios. Não obstante, essas organizações têm se empenhado na produção de conhecimento, na construção de ferramentas e na redução de incertezas.

Para melhor compreensão do contexto abordado nesta Nota Técnica, foi fundamental se debruçar sobre aspectos relevantes envolvidos na gestão das emissões em reservatórios hidrelétricos, tais como: os processos de emissão; as metodologias, os métodos e os equipamentos utilizados para as medições; os estudos de balanço de emissão em reservatório brasileiros realizados; as análises comparativas com outras fontes; e as medidas de mitigação das emissões.

3 EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA

3.1 Processos de Emissão de GEE em Reservatórios

Vários mecanismos estão envolvidos no ciclo do carbono dos ecossistemas aquáticos fluviais. Em linhas gerais, os rios recebem carbono dos ecossistemas terrestres carregados através da drenagem, sequestram o carbono atmosférico através da produção primária, enterram o carbono nos sedimentos, emitem carbono decorrente da degradação e respiração da biomassa e transportam o carbono rio abaixo até os oceanos, conforme mostrado na Figura 1.

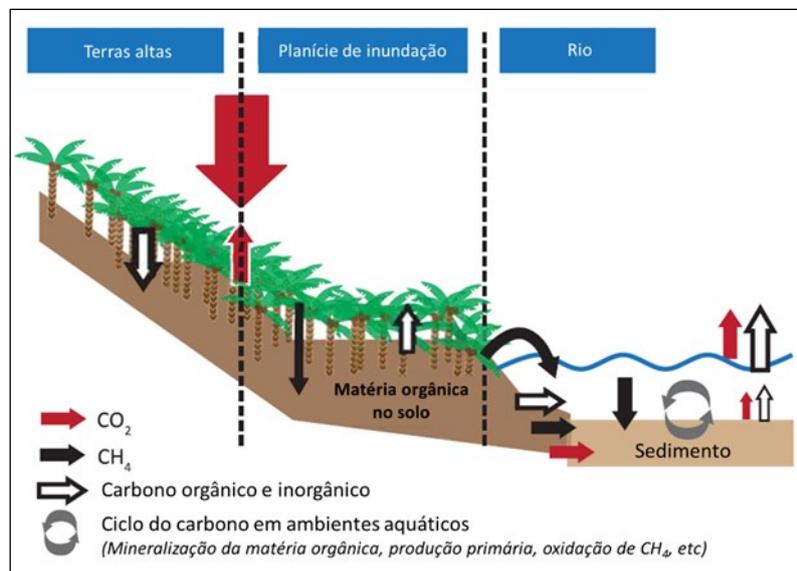


Figura 1 – Emissão de CO₂ e CH₄ em ecossistemas fluviais naturais

Fonte: Adaptado de IHA/UNESCO (2010).

A hidreletricidade, que é produzida a partir da energia contida em um fluxo de água, não leva a emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE) como acontece com a queima de combustíveis fósseis. Apesar disso, quando se constrói uma barragem e se cria um reservatório de água, ocorre o alagamento da superfície que antes tinha outro tipo de cobertura, tais como: solos expostos, pastagem, áreas agrícolas, vegetação nativa, etc. Esse alagamento pode alterar o balanço geral de carbono e resultar em emissões líquidas de gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) devido à degradação biogênica da matéria orgânica inundada, especialmente durante os primeiros anos após a formação do reservatório. Com o tempo, a matéria orgânica inundada se decompõe lentamente de acordo com as condições locais, e as emissões tenderão a diminuir. O represamento também pode aumentar a sedimentação e a decomposição da matéria orgânica devido à redução da velocidade das águas (tempos de residência da água mais longos), potencializando as emissões de CO₂ e CH₄. As atividades humanas na bacia

hidrográfica também podem resultar em emissões adicionais de GEE de ecossistemas fluviais por meio do lançamento de esgoto e poluição agrícola, que elevam a concentração de matéria orgânica e nutrientes na água e, por consequência, a atividade biogênica de decomposição (Levasseur et al, 2021).

O CO₂ é produzido em condições óxicas e anóxicas¹ na coluna de água, nos solos inundados e sedimentos do reservatório, e é consumido por produtores primários aquáticos na zona eufótica² do reservatório. O CH₄ é produzido sob condições anaeróbicas, principalmente nos sedimentos, mas uma porção vai ser oxidado a CO₂ por bactérias metanotróficas³ na água e nos sedimentos em condições aeróbicas.

Em um reservatório, o carbono inundado e afluyente seguirá um dos seguintes destinos: i) será exportado para a atmosfera (emissão); ii) armazenado nos sedimentos do leito, ou; iii) transportado rio abaixo. Esses três processos ocorrem em paralelo com diferentes intensidades, dependendo da topografia, geologia, e condições climatológicas, bem como as características biológicas do corpo d'água (WBG, 2017).

Uma vez que um reservatório foi criado, os GEEs podem atingir a atmosfera através de várias vias, sendo elas:

1. formação de bolhas de metano nas áreas rasas do reservatório
2. fluxo difusivo de CO₂ e CH₄ na superfície do reservatório
3. difusão através dos caules das plantas aquáticas
4. degaseificação (devido à mudança de pressão) após o turbinamento
5. fluxo difusivo na superfície do rio a jusante

¹ As condições óxicas e anóxicas se referem à presença ou ausência de oxigênio dissolvido na água, respectivamente.

² Zona eufótica é região na coluna d'água que recebe luz solar permitindo que os fitoplânctons realizem a fotossíntese.

³ Bactérias metanotróficas são capazes de utilizar o metano como única fonte de carbono e energia.

A Figura 2 ilustra esses processos.

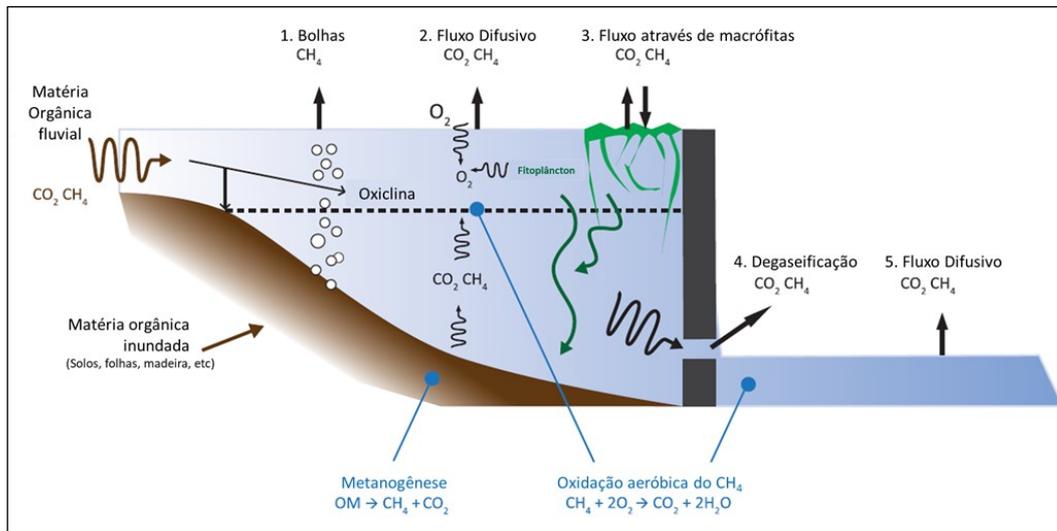


Figura 2– Caminhos do CH_4 e do CO_2 em um reservatório de água doce com hipolímnia anóxica⁴

Fonte: Adaptado de UNESCO/IHA (2009).

Esses processos são complexos e podem variar substancialmente de um reservatório para outro. Por isso, para se afirmar que um reservatório é um grande emissor de GEE é necessário monitorar os processos apresentados e considerar a situação antes e depois da formação do reservatório. O Item 3, a seguir, irá apresentar os métodos e ferramentas utilizados para monitoramento das emissões relacionadas a esses cinco processos e a metodologia para estimativa do balanço líquido de emissões de reservatórios hidrelétricos.

⁴ Em limnologia, chama-se hipolímnia (ou hipolímnia) à camada profunda de alguns lagos em que se registra estratificação. As características químicas, físicas e biológicas desta camada são diferentes das que lhe ficam subjacentes. Quando o hipolímnia é anóxica verifica-se a ausência de oxigênio dissolvido, situação em que predomina a ação de bactérias metanogênicas na decomposição da matéria orgânica.

3.2 Metodologias para Monitoramento e Balanço de Emissões

A construção e operação de um reservatório cria uma área inundada que introduz um regime de transporte de massa e armazenamento diferente daquele que existia antes do enchimento do reservatório. Em particular, a análise quantitativa das emissões líquidas de GEE de um reservatório envolve dois tipos de regime de fluxo que devem ser estudados para as situações pré e pós-enchimento: a diferença entre o fluxo de GEE na interface água-atmosfera e a diferença na taxa de deposição de carbono no sedimento. A análise se concentra nos fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O, portanto, nos processos envolvendo o transporte e armazenamento de carbono e nitrogênio (IEA, 2012).

Os processos biogeoquímicos básicos que interessam para o balanço de carbono são a troca líquida de CO₂ na fotossíntese e respiração de organismos autotróficos como plantas e cianobactérias, e decomposição de matéria orgânica morta por organismos heterotróficos, como animais, fungos, bactérias e arqueobactérias liberando CO₂ e CH₄. Nesse sentido, o fósforo também é um elemento importante a ser medido, pois pode afetar a produção primária e a eficiência da decomposição da matéria orgânica.

Para o equilíbrio do nitrogênio, os processos biológicos são biofixação, amonificação, nitrificação e desnitrificação, e os dois últimos podem resultar na liberação de N₂O. Os processos físicos de interesse são a advecção de espécies químicas, difusão turbulenta e borbulhamento de gás; os processos geoquímicos preocupantes são a decomposição química e a combustão da matéria orgânica⁵.

Para estimar as emissões biogênicas de GEE associadas com a geração hidrelétrica, medições confiáveis dos fluxos de emissão de CO₂, CH₄ e N₂O no tempo e espaço são necessárias, bem como estimativas robustas dos sumidouros de carbono e fontes de carbono oriundas dos ecossistemas terrestre e aquático anteriores ao enchimento do reservatório. Para a IEA (2012), as emissões líquidas são definidas como *“a diferença entre o balanço de emissões e remoções de GEE pós-enchimento, excluindo emissões de GEE de fontes não relacionadas, e o balanço de emissões e remoções de GEE pré-enchimento”*. De forma mais simplificada, seria a diferença entre os balanços de emissões medidos antes e depois do enchimento do reservatório, excluídas aquelas emissões provocadas por aportes de matéria orgânica à montante.

⁵ O detalhamento desses processos foge ao escopo dessa Nota Técnica. Maiores detalhes podem ser obtidos no Anexo A do relatório “Guidelines for Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs: Volume 1 – Measurement Programs and Data Analysis” (IEA, 2012).

3.3 Medição de GEE em Reservatórios

3.3.1 Fluxo Difusivo

A técnica mais comum para medir o fluxo difusivo na interface água-atmosfera é o uso de câmaras flutuantes (Figura 3). O funcionamento dessas câmaras pode ser comparado a um vidro invertido que retém um volume conhecido de ar na superfície da água, recebendo gases que emanam da água e ficam presos nesse volume. Se a concentração inicial de metano, por exemplo, for conhecida no ar aprisionado e se uma nova concentração for estabelecida após alguns minutos de troca, a massa será determinada cruzando a área coberta pelo vidro durante o período de amostragem, normalmente em poucos minutos.



Figura 3 – Detalhe de uma câmara de difusão (1000 ml)

Fonte: IEA, 2012.

Em geral, a medição contínua é inviável e a amostragem temporal deve ser planejada considerando as flutuações naturais locais da intensidade de luz, umidade do solo, temperatura do ar, água e solo. Assim, o ano pode ser dividido em períodos e as campanhas de medição planejadas o mais próximo possível da metade de cada período. Os valores medidos devem ser expressos em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

3.3.2 Emissões Ebulitivas

As emissões ebulitivas devem ser estimadas para CO_2 e para CH_4 . A técnica mais comum para medir essas emissões é o uso de conjuntos de funis invertidos. As medições devem ser espacialmente distribuídas na região do reservatório onde a formação de bolhas pode ocorrer, que usualmente são aquelas áreas com profundidade inferior a 20m.

Assim como na medição das emissões difusivas, a medição contínua é inviável e a amostragem temporal deve ser planejada considerando as flutuações naturais locais da intensidade de luz, umidade do solo, temperatura do ar, água e solo. Os valores medidos devem ser expressos em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. A Figura 4 e a Figura 5 ilustram essa técnica.



Figura 4 - Detalhe de funis invertidos para medição de bolhas

Fonte: IEA, 2012.



Figura 5 – Medição de bolhas com funis invertidos em rios, próximo à margem

Fonte: IEA, 2012.

3.3.3 Degassing

As estimativas de emissão devido à degaseificação é obtida a partir da diferença de concentração das medições feitas em amostras coletadas na entrada da casa de força e no fluxo a jusante da barragem o mais próximo possível das estruturas de saída d'água.

As medições devem ser realizadas em todas as estruturas de saída d'água onde a degaseificação poderia ocorrer. No caso de reservatórios hidrelétricos amostras do fluxo a montante devem ser coletadas dentro da casa de força.

Em geral, medições contínuas em tempo real não são viáveis, logo, a amostragem deve ser planejada de forma a considerar as variações da intensidade de luz, umidade do solo e temperatura do ar, água e solo. O ano pode ser dividido em estações e as medições realizadas o mais próximo possível da metade de cada estação.

3.4 Emissões Antropogênicas de Outras Fontes a Montante do Reservatório

As estimativas de emissão de gases que possam ser atribuídas a outras fontes antrópicas devem ser levadas em conta no balanço de fluxos para a estimativa de emissão pós-enchimento.

Várias atividades humanas a montante do reservatório podem contribuir para as emissões oriundas da área alagada. Como exemplo é possível citar: assentamentos (vilas e cidades); plantas de tratamento de esgoto (ou sua ausência); pastagens e agricultura próximos à linha de costa do reservatório e indústrias que lançam compostos biodegradáveis. O carreamento de compostos ricos em nitrogênio, fósforo e matéria orgânica podem levar à eutrofização⁶ do reservatório.

A eutrofização dos reservatórios pode ocorrer quando há deposição de nitrogênio a montante do reservatório a partir de fontes industriais, grandes cidades com tráfego pesado ou termelétricas fósseis. Áreas impermeabilizadas como estradas, prédios etc. tendem a favorecer o escoamento superficial da água e transportar poluentes para os cursos d'água. O inventário dessas atividades a montante do reservatório fornece meios para identificar a relação da chegada de carbono e nutrientes no reservatório com as emissões de GEE. Se apenas uma pequena carga a montante é identificada, essa parcela é considerada insignificante para as emissões de GEE do reservatório.

⁶ Enriquecimento nutricional do ambiente (geralmente causado pelo aumento dos elementos químicos fósforo – P e nitrogênio – N). Mudanças nas quantidades de N e P no ambiente (aumento ou redução) podem levar a desequilíbrios no ambiente, propiciando um aumento súbito de espécies (algas, bactérias, etc.) que ameaçam a sobrevivência das espécies que vivem naquele ambiente.

3.5 Resultados de Balanços de Emissões em Reservatórios Brasileiros

Os avanços metodológicos mais recentes nessa seara foram consolidados no projeto Balcar, realizado entre fevereiro de 2011 e dezembro de 2013, sob a coordenação técnica do Cepel por meio de chamada pública de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Esse projeto, além de consolidar o estado da arte sobre o tema, realizou monitoramento de 11 reservatórios de usinas brasileiras, sob novas bases metodológicas, sendo oito em operação e três em construção (condição de pré-enchimento), e desenvolveu modelos para avaliação das emissões líquidas de GEE em reservatórios.

Os proponentes do projeto foram a Eletrobras e suas subsidiárias Eletronorte, Furnas e Chesf. Já a execução ficou a cargo do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ); do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (Inpe); Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF); Laboratório Central da Eletronorte (Lacen), Universidade Federal do Pará (UFPA); Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental (IIEGA).

Para as oito UHE em operação (Tucuruí, Balbina, Serra da Mesa, Xingó, Três Marias, Funil, Segredo e Itaipu), o estudo realizou o monitoramento em campo dos diversos compartimentos/pontos de emissão dos reservatórios. Este monitoramento permitiu estimar o total de emissões dos reservatórios e, por meio de modelos, estimar as emissões líquidas. Já para as UHEs Batalha, Belo Monte e Santo Antônio, foi monitorada a condição de pré-enchimento, para que após a implantação dos empreendimentos se tenha uma estimativa mais acurada do balanço de emissões, com emissões líquidas totalmente baseadas em medições em campo.

A escolha dos reservatórios levou em conta a distribuição geográfica e a representatividade em relação aos biomas brasileiros. A Figura 6 apresenta os reservatórios analisados pelo projeto Balcar, conforme situação: pré-enchimento ou pós-enchimento.

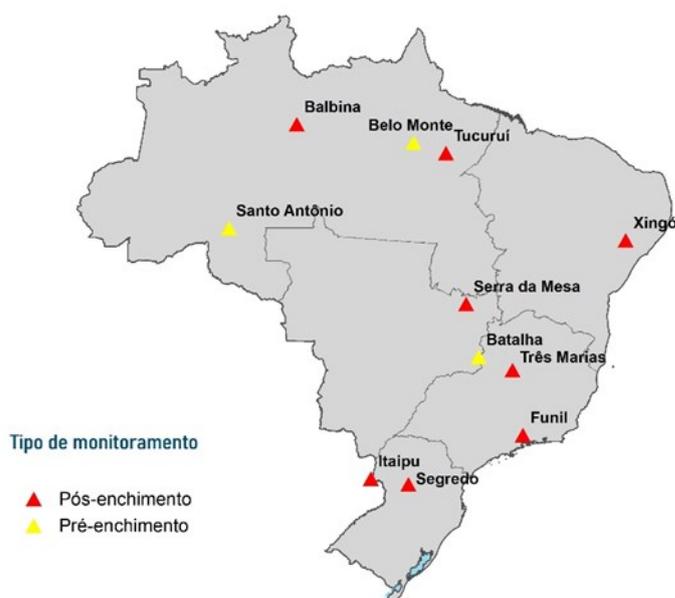


Figura 6 – Reservatórios estudados pelo projeto Balcar

Fonte: MME, 2014.

A Tabela 1 apresenta os oito reservatórios estudados para a condição de pós-enchimento, para os quais foram realizadas as estimativas de emissões líquidas. Observar a heterogeneidade das características (idade, localização, produção de energia e tamanho).

Tabela 1 – Características dos reservatórios estudados no Projeto Balcar

UHE	Ano do reservatório	Bioma	Capacidade (MW)	Energia firme (MW médios)	Área do reservatório (km ²)	Área/Energia (km ² /MW médios)
Balbina	1987	Amazônia	250	132,3	2.360	17,84
Funil	1969	Mata Atlântica	216	121	40	0,33
Itaipu	1984	Mata Atlântica	14.000	8.182	1.350	0,16
Segredo	1992	Mata Atlântica	1.260	603	81	0,13
Serra da Mesa	1996	Cerrado	1.275	671	1.784	2,66
Três Marias	1962	Cerrado	396	239	1.040	4,35
Tucuruí	1985	Amazônia	8.370	4.140	3.023	0,73
Xingó	1994	Caatinga	3.162	2.139	60	0,03

Fonte: MME, 2014.

Emissões líquidas

As emissões líquidas são obtidas da diferença entre as emissões dos locais dos reservatórios, para cada gás, nas condições de pós e pré-enchimento. Como, na maioria dos casos, não há dados de monitoramento em campo da condição de pré-enchimento, é necessário o emprego de premissas e modelos para o cálculo das emissões. No entanto, há uma série de limitações e incertezas quanto a este cálculo, particularmente para as áreas de floresta. Por esse motivo, o estudo (MME, 2014, pag. 27) propôs diferentes cenários possíveis para as emissões de florestas, conforme transcrito abaixo.

Em particular, para florestas, devido a grandes incertezas envolvidas no balanço de CO₂ destas áreas, foram considerados três cenários de fluxos: (i) Cenário “Remoção”: uma remoção de 0,89 tonC/ha/ano (894 mgCO₂/m²/dia) medida em estudos localizados em florestas tropicais naturais maduras (Phillips et al, 1998; Malhi and Phillips, 2004); (ii) Cenário “Neutro”: uma floresta neutra basicamente em equilíbrio de fluxos positivos e negativos de CO₂e; (iii) Cenário “Emissão”: uma emissão de 1,3 tonC/ha/ano (1,306 mgCO₂/m²/dia) encontrada em medidas em torres durante três anos na Amazônia central. (Saleska et al, 2003).

Abaixo são apresentados os resultados para os três cenários: o Gráfico 1 mostra o cenário “Floresta remoção; o Gráfico 2, o cenário “Floresta neutra”; e Gráfico 3, o cenário “Floresta emissão”. No Gráfico 1, pode-se observar que o cenário “Remoção” tem o caráter mais conservador, já que resulta numa condição de maiores emissões líquidas. Por outro lado, o cenário “Emissão” (Gráfico 3) apresenta menor diferencial de emissões, já que as florestas já seriam emissoras de GEE previamente à existência do reservatório.

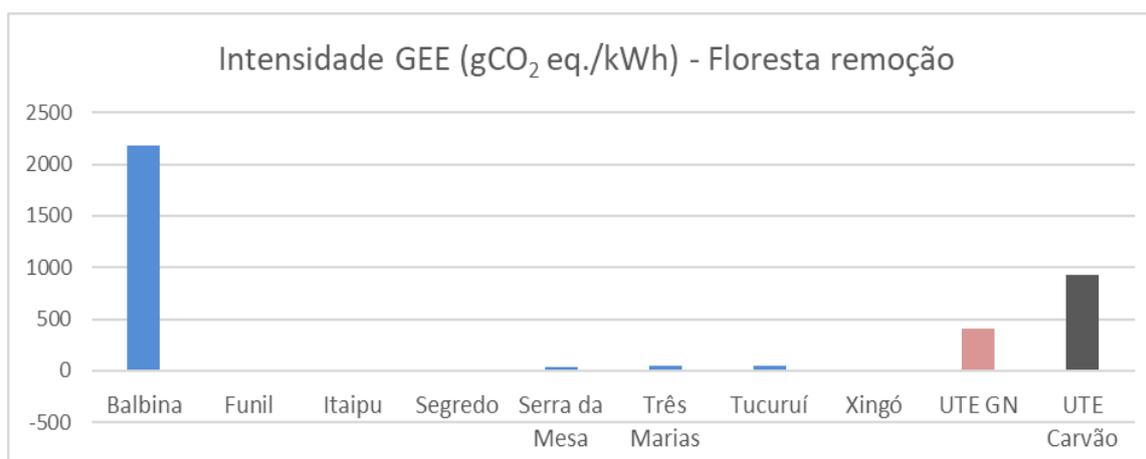


Gráfico 1 - Intensidade de GEE (gCO₂ eq./kWh) no cenário floresta remoção

Fonte: MME, 2014.

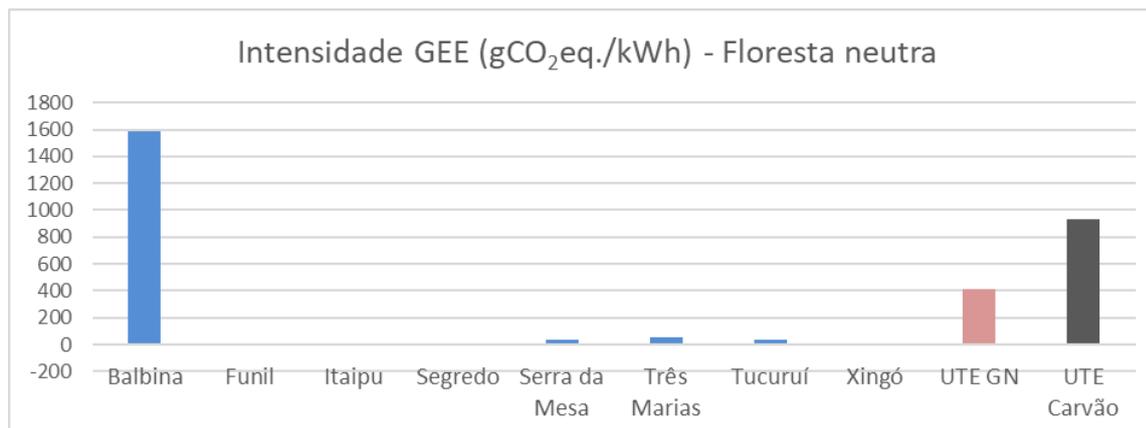


Gráfico 2 - Intensidade de GEE (gCO₂ eq./kWh) no cenário floresta neutra

Fonte: MME, 2014.

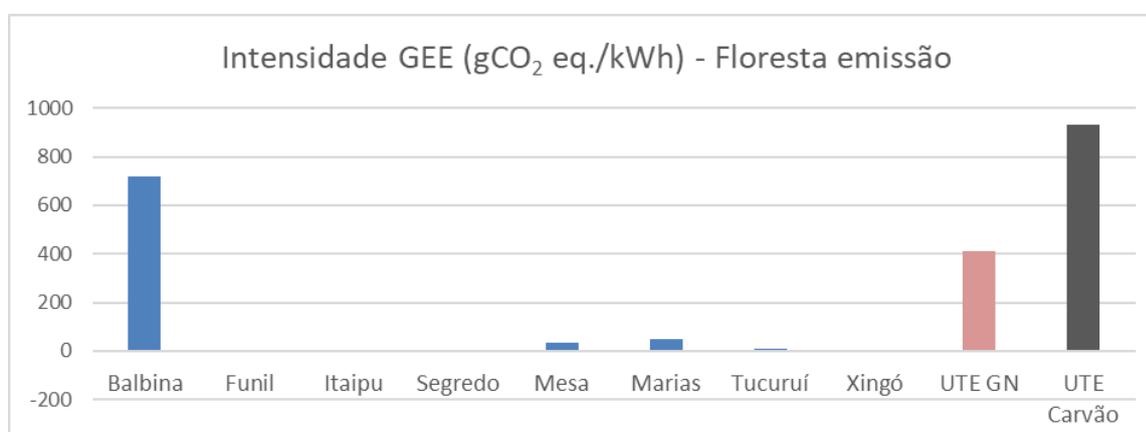


Gráfico 3 - Intensidade de GEE (gCO₂ eq./kWh) no cenário floresta emissão

Fonte: MME, 2014.

Esses resultados demonstram a conclusão obtida pelo estudo: para a maior parte das hidrelétricas as emissões de GEE são significativamente inferiores às emissões de termelétricas equivalentes. Foi uma exceção a este padrão a UHE Balbina, que devido à extensa área inundada e baixa capacidade de geração, apresentou elevada intensidade de GEE, comparável ou superior a uma térmica a carvão, em qualquer cenário. Os outros sete reservatórios apresentaram fatores de emissão no intervalo entre -1,35 gCO₂ eq./kWh (remoção líquida de CO₂ da atmosfera) para a UHE Funil e 52 gCO₂ eq./kWh para a UHE Tucuruí, no cenário mais conservador. Já termelétricas a carvão e gás natural emitiriam tipicamente 930 e 412 gCO₂ eq./kWh, respectivamente. Isso corrobora com a hipótese de que, apesar de haver grande variação entre os diferentes reservatórios, de uma forma geral, as hidrelétricas contribuem para a mitigação de emissões de GEE.

Outros estudos

De Faria et al (2015) realizaram estudo para estimar por meio de modelagem matemática as emissões de GEE de 18 reservatórios recentemente construídos, em construção ou planejados para a bacia Amazônica (Belo Monte, Bem Querer, Cachoeira do Caí, Cachoeira do Caldeirão, Cachoeira dos Patos, Colíder, Ferreira Gomes, Jamanxim, Jatobá, Jirau, Marabá, Salto Augusto de Baixo, Santo Antônio, São Luís do Tapajós, São Manoel, São Simão Alto, Sinop, Teles Pires).

O estudo separou as usinas em dois grupos, conforme tempo de residência da água, e realizou modelagens matemáticas com abordagens *Bottow-up* e *Top-down*. A abordagem *Top-down* foi baseada nos dados de medições do fluxo de dióxido de carbono e metano em rios e reservatórios da região amazônica. A abordagem *Bottow-up* se baseia em modelo matemático de degradação do estoque de carbono na área do reservatório.

Para os reservatórios com baixo tempo de residência, as emissões líquidas de GEE para 100 anos variam entre 0,1 milhão de toneladas de carbono em Ferreira Gomes, até 14 milhões de toneladas de carbono em Marabá no modelo *Bottow-up* e entre 1 milhão de toneladas de carbono em Ferreira Gomes, até 49 milhões de toneladas de carbono em Marabá na abordagem *Top-down*.

Já para os reservatórios com alto tempo de residência, as emissões líquidas de GEE para 100 anos variam entre 1,8 milhões de toneladas de carbono em Jamanxim, até 11 milhões de toneladas de carbono em Cachoeira do Caí no modelo *Bottow-up* e entre 11 milhões de toneladas de carbono em Jamanxim, até 30 milhões de toneladas de carbono em Sinop na abordagem *Top-down*. As discussões dos resultados do estudo indicam que para os reservatórios de alto tempo de residência a abordagem *Bottow-up* tende a ser subestimada, enquanto a *Top-down* tende a ser superestimada, já que atualmente ocorre a retirada da vegetação antes do alagamento.

4 EMISSÕES DE HIDRELÉTRICAS E DAS DEMAIS FONTES

Apesar das fontes renováveis de energia serem usualmente tratadas como não emissoras, inclusive pela metodologia do IPCC para inventários nacionais, qualquer forma de geração de energia terá algum nível de emissão associado. Em fontes renováveis, por exemplo, não há queima direta de combustíveis fósseis, mas há diferentes processos que podem ocorrer ao longo do ciclo de vida⁷ dessas fontes que geram emissões.

Ao se realizar análise de emissões no ciclo de vida, é estimada a geração de GEE em outras etapas além da operação, como durante a extração de matéria prima, fabricação de equipamentos ou construção da usina. A emissão de uma usina fotovoltaica, por exemplo, incluirá as emissões associadas à fabricação, transporte e manutenção dos painéis fotovoltaicos. Para a biomassa florestal, há a fase de plantio e desenvolvimento das florestas, a colheita e beneficiamento da biomassa e posterior queima do material. Em cada uma dessas fases pode haver emissão ou sequestro de carbono, que deve ser contabilizado.

O relatório *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (IPCC, 2011) realizou extensa revisão bibliográfica a partir da qual compilou as emissões de GEE por fonte de energia, considerando o ciclo de vida, conforme apresentado na Figura 7. Pode-se observar que mesmo o valor máximo apresentado para as hidrelétricas ainda é significativamente inferior ao apresentado para as fontes fósseis em seu valor mínimo. Comparativamente às outras fontes renováveis, as hidrelétricas apresentam de uma forma geral emissões inferiores ou na mesma ordem de grandeza. Hidrelétricas estão no intervalo entre 0 e 43 g CO₂ eq./kWh, enquanto as demais renováveis entre 2 e 217 g CO₂ eq./kWh.

⁷ A avaliação de ciclo de vida – ACV é uma técnica usualmente utilizada para se avaliar de forma mais ampla os impactos socioambientais de um produto, por considerar todas as etapas associadas à produção, uso e descarte/descomissionamento do produto.

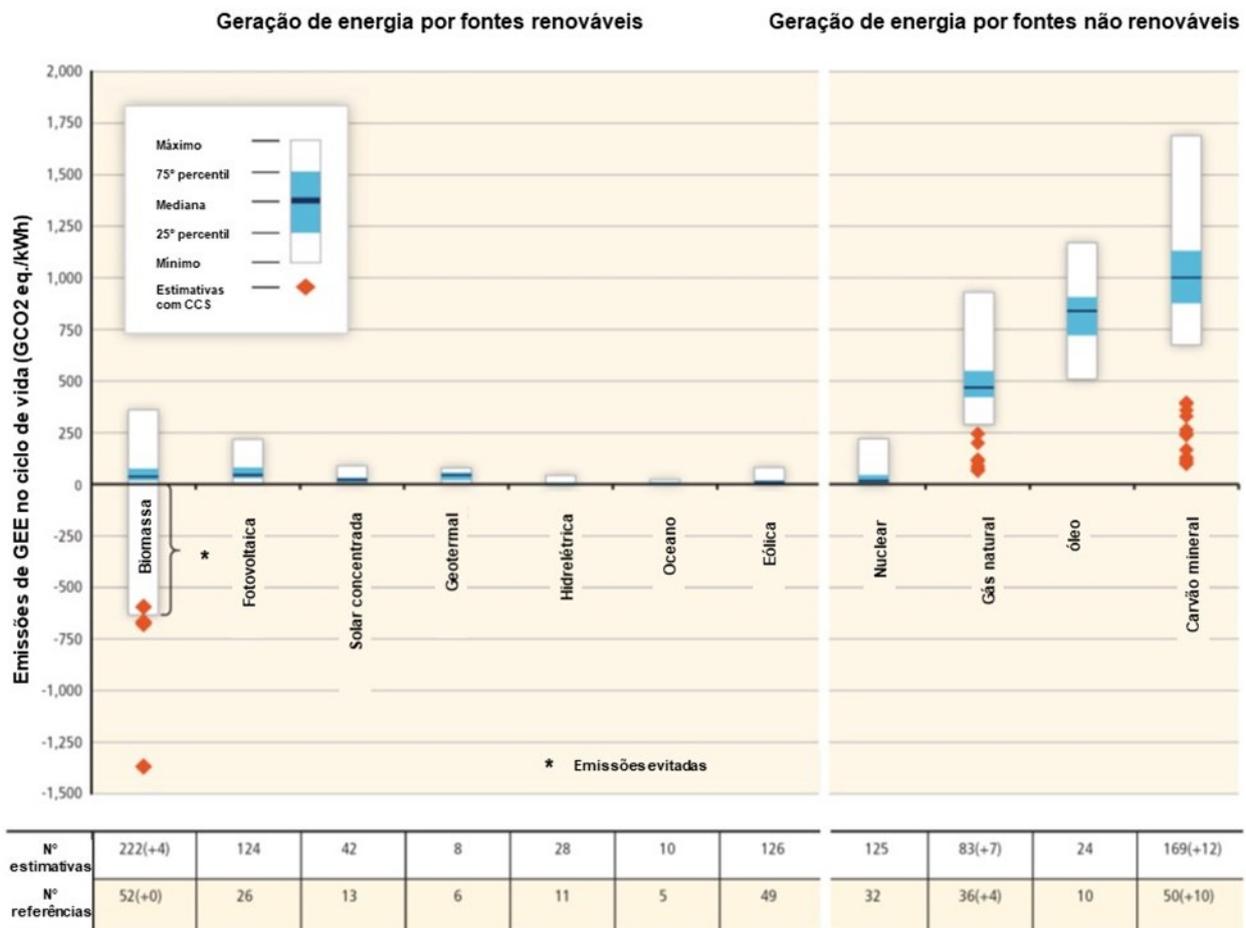


Figura 7 - Emissões de GEE no ciclo de vida por fonte de geração de energia elétrica (g CO₂ eq./kWh)

Fonte: Adaptado de IPCC, 2011.

Em 2014 o IPCC publicou o documento *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, que compõe o Fifth Assessment Report (AR5). Em seu Anexo III, no qual são apresentados os parâmetros de custo e de performance das tecnologias, são disponibilizados dados de emissões no ciclo de vida por fonte de geração, como mostra a Tabela 2. De modo geral é observado o mesmo padrão da Figura 7, em que térmicas fósseis apresentam emissões significativamente superiores às hidrelétricas, outras renováveis e nucleares.

Chama atenção, no entanto, o valor máximo atribuído às hidrelétricas e cabe comentar que este diz respeito a estimativa para a UHE Balbina obtida pelo estudo de *Methane release below a tropical hydroelectric dam*, de Kemenes et al. (2007). Como vimos anteriormente, através dos resultados do projeto Balcar, Balbina realmente é uma usina que apresenta emissão comparável ou mesmo superior a uma usina a carvão mineral. Todavia, ressalta-se que é uma exceção, especialmente no contexto atual, em que o licenciamento ambiental exige medidas de retirada da vegetação antes do alagamento e em que as novas usinas apresentam relações entre área alagada e energia gerada mais favoráveis.

Tabela 2 - Emissões de GEE no ciclo de vida por fonte de geração de energia elétrica (g CO₂ eq./kWh)

Fonte	Mínimo	Mediana	Máximo
Carvão mineral	740	820	910
Gás natural	410	490	650
Geotérmica	6	38	79
Hidrelétrica	1	24	2200 ⁸
Biomassa dedicada	130	230	420
Nuclear	3,7	12	110
Solar concentrada	8,8	27	63
Solar fotovoltaica	18	48	180
Eólica onshore	7	11	56
Eólica offshore	8	12	35
Oceano	5,6	17	28

Fonte: IPCC, 2014.

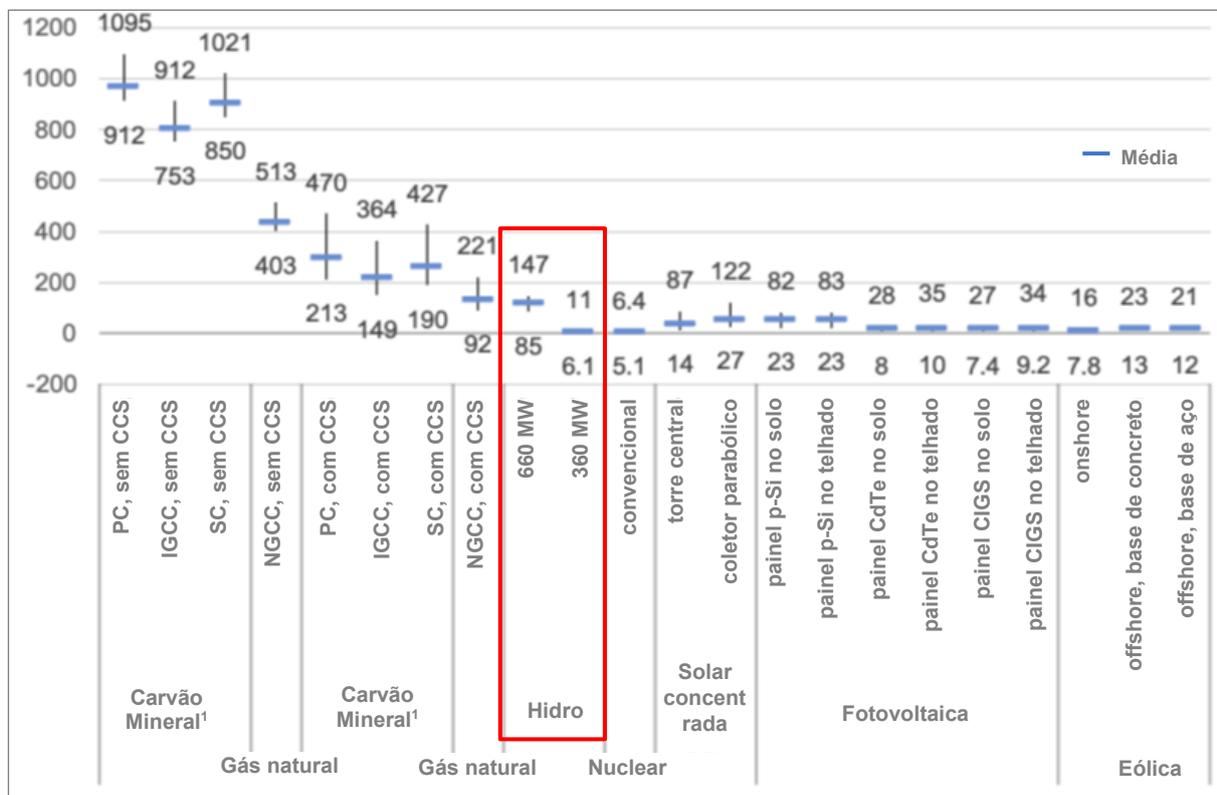
O IHA achou um valor médio global de 18,5 gCO₂e por kWh utilizando a ferramenta G-res para medir as emissões de todo o ciclo de vida de 498 reservatórios. O estudo abrangeu mais de 50 países de todos os continentes, localizados em diferentes regiões climáticas. O estudo indicou que 84% dos reservatórios apresentaram uma intensidade de emissões inferiores a 100 gCO₂e por kWh (IHA, 2018). Comparando com os valores médios apresentados na Tabela 2, o valor médio global obtido no estudo reforça que as emissões de GEE no ciclo de vida de hidrelétricas estão abaixo dos valores médios de solar e biomassa, além de todas as fontes fósseis.

O estudo realizado por Silva et al. (2019), também com base na análise de ciclo de vida, concluiu que a energia das ondas e a fotovoltaica são as fontes renováveis de energia que têm maior contribuição para emissões de GEE, com valores médios de 55,9 e 50,9 g CO₂ eq./ kWh, respectivamente. A energia eólica, por outro lado apresenta as menores emissões, com médias de 14,4 (onshore) e 18,4 (offshore) g CO₂ eq./kWh. Em seguida estão as hidrelétricas, com média de emissões de 21,4 (reservatórios) e 19,1 (fio d'água) g CO₂ eq./kWh. De todo modo, o estudo também verificou que a emissão de todas as fontes renováveis é significativamente inferior à das fontes não renováveis.

Com intuito de compreender a escala total dos impactos potenciais da geração elétrica atual e futura, a UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) também realizou uma avaliação do ciclo de vida das tecnologias disponíveis. Foram consideradas 12 regiões globais, além de outros aspectos como fator de carga, taxas de vazamento de metano e histórico do

⁸ Valor referente às emissões do reservatório da UHE Balbina.

consumo de eletricidade da rede. No caso de UHEs, foram considerados dois tamanhos: 360 MW e 660 MW. Uma das conclusões relacionadas a emissões de GEE é a alta variabilidade apresentada pela hidroeletricidade, variando de 6 a 147 g CO₂ eq./kWh, conforme destacado na Figura 8 (UNECE, 2022).



Legenda: PC - combustão pulverizada; CCS - captura e armazenamento de carbono; IGCC - gaseificação Integrada com Ciclo Combinado; SC - ciclo simples; NGCC - ciclo combinado a gás natural; p-Si - silício policristalino; CdTe - telureto de cádmio; CIGS - seleneto de cobre, índio e gálio.

Nota: (1) Foram avaliados apenas carvões com poder calorífico bruto > 5.700 kcal/kg, classificados como *hard coal*.

Figura 8 - Faixas de emissão de GEE no ciclo de vida para as tecnologias avaliadas (g CO₂ eq./kWh)

Fonte: Adaptado de UNECE, 2022.

Comparativamente, o desempenho da hidroeletricidade é relativamente bom, sobretudo em relação às tecnologias fósseis. As usinas com potência de 360 MW são a segunda tecnologia menos emissora de GEE, atrás apenas das nucleares. No estudo isto é atribuído à longa vida útil e aos altos fatores de capacidade das usinas. Além disso, é importante mencionar que na análise foram excluídas as emissões biogênicas por serem muito específicas do local. Certamente, isso também contribuiu para as baixas emissões relativas associadas ao ciclo de vida de UHEs. Caso contabilizadas, possivelmente as emissões seriam maiores, especialmente em regiões tropicais.

5. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES EM RESERVATÓRIOS

Ainda que as incertezas já mencionadas existam, são previstas medidas para evitar, minimizar, restaurar ou compensar as emissões de GEE atribuídas aos reservatórios hidrelétricos, principalmente nos casos em que haja algum indício de que o reservatório possa ter emissões líquidas relevantes.

Atualmente existem métodos e ferramentas para se identificar antecipadamente se um reservatório tende a ser um potencial emissor de GEE ou não. É o caso da ferramenta G-Res, desenvolvida pelo IHA e endossada pela UNESCO e Banco Mundial. Uma vez identificado que um reservatório pode ter emissões líquidas expressivas, um conjunto de iniciativas podem ser tomadas no sentido de evitar que elas aconteçam.

As medidas de mitigação podem ter quatro componentes:

- Evitar: alternativas que evitem ou tecnologias que removam impactos
- Minimizar: promover ações durante o planejamento/operação que possam reduzir os impactos
- Restaurar: reabilitar o ambiente após a incidência do impacto
- Compensar: compensar os efeitos dos impactos que não puderam ser mitigados, minimizados ou restaurados

Segundo IEA (2018), muitas das emissões podem ser evitadas na fase de projeto quando se faz uma avaliação da localização e do arranjo da barragem, devendo ser observados os seguintes aspectos:

- Tipo e uso do solo da área a ser inundada.
- Preparação da área a ser inundada, incluindo opções para limpeza e remoção da matéria orgânica existente.
- Quando possível, evitar sítios que recebam contribuição de fontes significativas de lançamento de matéria orgânica no rio, como cidades ou assentamentos.
- Adequar desenho das instalações relacionadas às unidades geradoras de modo a minimizar a geração de emissões por degassing. Uma possibilidade de desenho é a tomada d'água em diferentes níveis do reservatório.

- Considerações sobre empreendimentos a montante e a jusante na cascata de forma a avaliar os efeitos simbióticos entre eles em termos de projeto e operação.

Nas fases de construção e enchimento também há medidas que podem ser tomadas. Na maioria dos casos as emissões de GEE são maiores na fase de enchimento do reservatório permanecendo altas nos primeiros anos de operação da usina. A decomposição da matéria orgânica presente na área do reservatório consome oxigênio na coluna d'água. Essa condição pode gerar situação de hipóxia gerando grandes quantidades de metano (cujo potencial de aquecimento – GWP – é bem maior que o CO₂). Sendo assim, estratégias que minimizem a possibilidade de depleção do oxigênio na coluna d'água podem ajudar a mitigar emissões de metano. Uma abordagem seria o aumento do tempo de enchimento do reservatório, que poderia ser realizado progressivamente ao longo da fase de construção da usina.

Deve-se ter em mente que a vegetação pode ser a principal fonte de carbono na área a ser inundada e que a remoção em determinados casos pode ser bastante difícil ou inviável economicamente. Importante observar também que mesmo se a vegetação for retirada da área inundada ela ainda se degradará fora do reservatório gerando emissão de CO₂. Todas essas questões devem ser levadas em consideração observando as especificidades de cada caso.

No Brasil, a retirada da vegetação na área dos reservatórios é uma exigência dos processos de licenciamento ambiental. Em geral, são definidas áreas para retirada de vegetação por meio de modelagem matemática da qualidade da água. É possível a manutenção parcial da vegetação, já que proporciona abrigo para a biota aquática. A modelagem avalia o balanço de carbono e nutrientes no reservatório, com a premissa de manutenção de níveis adequados de oxigênio dissolvido, e tem como objetivo definir a área para retirada da vegetação, o tempo de enchimento e o melhor período do ano para o enchimento. Essa é uma medida muito relevante para se impedir a degradação da qualidade da água e seus consequentes impactos sobre a fauna aquática, mas também evita a emissão de metano pelo reservatório.

Adicionalmente, sobre a compensação de emissões, destaca-se o papel de outras medidas geralmente apresentadas nos Estudos de Impacto Ambiental - EIA. O Programa de Reposição Florestal, por exemplo, visa compensar o impacto da supressão de vegetação e interferência em Áreas de Preservação Permanente (APP) e tem como um de seus cobenefícios a captação de carbono pela vegetação em crescimento. De modo complementar, no âmbito do Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial – Pacuera, geralmente são definidas novas APPs no entorno do reservatório, área destinada primordialmente à preservação ambiental.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, percebe-se que ainda há lacunas significativas na abordagem das emissões de GEEs por reservatórios hidrelétricos. Essa percepção foi construída com base na visão das instituições levantadas, que representam as principais referências técnicas e políticas na área de energia e de mudanças climáticas. Os desafios relacionados ao tema aparecem em diferentes escalas: desde a falta de consenso da comunidade científica até a dificuldade de quantificar emissões líquidas, em função da complexidade dos processos bioquímicos e das inúmeras variáveis que influenciam esses processos, além das especificidades de cada usina. Todas essas incertezas dificultam a quantificação das emissões líquidas de reservatórios que, geralmente, acabam não sendo consideradas no âmbito de projetos hidrelétricos, tampouco no inventário nacional de emissões e nas políticas internacionais de clima.

Por outro lado, há um entendimento de que é preciso aumentar o conhecimento acerca dos processos de emissões e estabelecer diretrizes para estudos de balanço de carbono em reservatórios. Nessa linha, destacam-se dois projetos que contribuíram para avançar no conhecimento e na quantificação. O primeiro é o projeto Balcar que está no escopo do projeto estratégico da IEA. O Balcar estimou as emissões líquidas de GEE de oito usinas hidrelétricas brasileiras em diferentes regiões e concluiu que, em sete delas, as emissões foram significativamente inferiores às emissões de termelétricas equivalentes. O segundo projeto é a ferramenta G-res, desenvolvida pelo IHA e endossada por IEA, UNESCO e Banco Mundial. A partir da ferramenta, é possível calcular as emissões de GEE atribuídas à criação e à operação de reservatórios hidrelétricos. Paralelamente, cabe ressaltar que, em todas as fases de um projeto hidrelétrico, já é previsto e adotado um conjunto consistente de medidas que evitam ou mitigam as emissões decorrentes de reservatórios.

Por fim, apesar dos esforços e dos avanços alcançados, o estado atual de conhecimento do tema ainda contém incertezas e permanecem desafios importantes pela própria natureza complexa que envolve o balanço de carbono de reservatórios. Portanto, é fundamental prosseguir com os estudos e as discussões, buscando consolidar os entendimentos de modo a contribuir com a formulação de políticas energéticas e climáticas.

7 BIBLIOGRAFIA

De Faria, F. A. M. et al. (2015). **Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs**. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/12/124019/pdf>. Acesso em: mai. 2021.

Intergovernmental Painel on Climate Change – IPCC (2011) – Edenhofer, O. et al. (Eds.). **Report - Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Cambridge University Press, Cambridge and New York. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>. Acesso em maio de 2021.

_____. (2014) – Schlömer S., T. et al: **Annex III: Technology-specific cost and performance parameters**. In: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, USA. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf. Acesso em maio de 2021.

_____ (2021). **The Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: abr. 2021.

International Energy Agency – IEA Hydro (2012). **Annex XII: Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs - Volume 1: Measurement Programs and Data Analysis**. October 2012. Disponível em: <https://www.ieahydro.org/annex-xii-hydropower-and-the-environment>. Acesso em: mar. 2022.

_____ (2018). **Annex XII: Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs - Volume 3: Management, Mitigation and Allocation**. January 2018. Disponível em: <https://www.ieahydro.org/annex-xii-hydropower-and-the-environment>. Acesso em: mar. 2022.

International Energy Agency – IEA (2021). **About**. Disponível em: <https://www.iea.org/about>. Acesso em: mai. 2021.

International Hydropower Association – IHA (2018). **Hydropower status report. Sector trends and insights**. Disponível em: https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/iha_2018_hydropower_status_report_4.pdf. Acesso em: mai. 2021.

_____ (2018). **Hydropower status report. Sector trends and insights.** Disponível em: https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/iha_2018_hydropower_status_report_4.pdf. Acesso em: mai. 2021.

_____ (2021). **About IHA.** Disponível em: <https://www.hydropower.org/who-we-are/about-ih>. Acesso em: mai. 2021.

Kemenes, A. et al. (2007). **Methane release below a tropical hydroelectric dam.** Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007GL029479>. Acesso em: mai. 2021.

Levasseur, A. et al. (2021). **Improving the accuracy of electricity carbon footprint: Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 136, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307206>. Acesso em: mai. 2021.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI (2020). **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Disponível em: https://issuu.com/mctic/docs/quarta_comunicacao_nacional_brasil_unfccc. Acesso em: mai. 2021.

Ministério de Minas e Energia – MME (2014). **Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Centrais Hidrelétricas - Projeto Balcar.** Rio de Janeiro.

Silva, M. et al. (2019). **Life cycle greenhouse gas emissions of renewable and non-renewable electricity generation technologies.** Disponível em: https://reinvestproject.eu/wp-content/uploads/2019/11/OR_RE-INVEST_Life-cycle-GHG-emissions-of-renewable-and-non-renewable-electricity.pdf

Sistema de Registro Nacional de Emissões – SIRENE (2021). **Sobre o Sirene.** Disponível em: <https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/textoGeral/2018/08/24/sobre.html>. Acesso em: mai. 2021.

United Nations Economic Commission for Europe – UNECE (2022). **Carbon Neutrality in the UNECE Region: In-tegrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources.** Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf. Acesso em: mai. 2022.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/International Hydropower Association – UNESCO/IHA (2009). **The UNESCO/IHA measurement specification guidance for**

evaluating the GHG status of man-made freshwater reservoirs. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000183167>. Acesso em: mai. 2021.

World Bank – WB (2017). **Technical Note: Greenhouse Gases from Reservoirs Caused by Biogeochemical Processes.** World Bank, Washington, DC. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29151>. Acesso em: mai. 2021.