

Estimativa de créditos de carbono nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) da Grande Aracaju/Sergipe

Estimation of carbon credit generation from Wastewater Treatment Plants (WWTP) of Greater Aracaju/Sergipe

Estefanny Andrade de Barros¹, Taísa Andrade Barbosa², Luciana Coêlho Mendonça³

RESUMO

O grande aumento das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) levam à necessidade urgente de medidas para mitigação do aquecimento global. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) auxilia os países em desenvolvimento a reduzirem suas emissões e permite que os países desenvolvidos cumpram sua meta através da aquisição de créditos de carbono. Uma das oportunidades de gerar esses créditos é mediante a redução de emissões de GEE nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), que geram principalmente metano por meio da decomposição dos resíduos orgânicos. Neste contexto, o presente estudo estimou a geração de crédito de carbono a partir dos gases do efeito estufa emitidos nas ETEs da Grande Aracaju, em Sergipe. Para tais estimativas, foram utilizadas equações apresentadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), onde se percebeu grande diferença entre os cenários de cada estação, diferenças estas atribuídas à população atendida, à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e ao Fator de Conversão de Metano (MCF) de cada sistema de tratamento. Observou-se relevante potencial de Reduções Certificadas de Carbono (RCEs) e, por conseguinte, monetização. Para uma cotação de €78,30/tCO₂, se estimou cerca de R\$ 7.657.317,44 por ano em créditos de carbono, valor este que tende a ser ainda maior em caso de ampliação da rede ou de melhoria na eficiência dos sistemas.

Palavras-chave: Gases do Efeito Estufa. Metano. Tratamento biológico.

ABSTRACT

The significant increase in greenhouse gas (GHG) emissions has led to an urgent need for measures to mitigate global warming. The Clean Development Mechanism (CDM) assists developing countries in reducing their emissions and allows developed countries to meet their goals through the acquisition of carbon credits. One of the opportunities to generate these credits is by reducing GHG emissions at Wastewater Treatment Plants (WWTPs), which primarily generate methane through the decomposition of organic waste. In this context, the present study estimated the generation of carbon credits from greenhouse gases emitted at the WWTPs in Greater Aracaju, Sergipe. For these estimates, equations provided by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were used, revealing significant differences between the scenarios of each plant. These differences were attributed to the served population, the Biochemical Oxygen Demand (BOD), and the Methane Conversion Factor (MCF) of each treatment system. A substantial potential for Certified Carbon Reductions (CCR) and, consequently, monetization, was observed. With a rate of €78.30/tCO₂, it was estimated that approximately R\$ 7,657,317.44 per year in carbon credits could be generated, a value that is likely to be even higher in the event of network expansion or improvements in system efficiency.

Keywords: Greenhouse Gases. Methane. Biological Treatment.

¹ Bacharel em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8136-1416>

E-mail: estefannyandrade@academico.ufs.br

² Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2159-6101>

E-mail: taisacivil@gmail.com

³ Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal de Sergipe.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6979-8135>

E-mail: lumendon@academico.ufs.br

1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial contribuiu com muitos benefícios para a sociedade, mas também trouxe problemas, sendo o principal a interferência desenfreada no meio ambiente. Atividades como utilização de combustíveis fósseis, desmatamento e transformação de recursos naturais em bens de consumo resultam em aumento na emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). Após a Revolução Industrial, observou-se crescimento de 30% na concentração de CO₂ na atmosfera e a média de temperatura do planeta aumentou entre 0,3 e 0,6°C no século XX (ANDRADE; COSTA, 2008; EIBEL; PINHEIRO, 2015).

Os principais gases componentes da atmosfera terrestre que exercem influência no efeito estufa são o vapor d'água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), também gerados no tratamento do esgoto sanitário. Além destes, há compostos fluorcarbonados (CFC), óxido nitroso (N₂O), ozônio troposférico, e outros de menor importância (MARQUES, 1992). O gás carbônico é o gás que tem maior nível de intensificação do efeito estufa devido a sua grande utilização, por isso, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) criou o Potencial de Aquecimento Global (GWP), parâmetro para comparar os outros seis gases do efeito estufa com o dióxido de carbono, as suas intensidades e o período que permanecem na atmosfera (IPCC, 2014).

Visando à necessidade urgente de baixar os níveis de GEE, foi lançado um protocolo para formalização do controle dessas emissões na 3ª Conferência das Partes (COP 3), realizada em Kyoto, Japão, seguindo os requisitos sugeridos pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC). A vigência do Protocolo de Kyoto de 2005 é um marco institucional nas tentativas de ação coletiva, visando à mitigação das mudanças climáticas. O protocolo contém o comprometimento dos países industrializados e dos países cujas economias estão em transição, com metas de redução de emissões de GEE. A lógica do Protocolo é, de forma simplificada, limitar permanentemente as emissões de GEE. Uma vez estabelecido o limite global e os limites de cada país, as permissões de emissões são divididas, dentro de cada país, entre os diversos segmentos econômicos (ANDRADE; COSTA, 2008).

O Protocolo também apresenta três mecanismos comerciais de flexibilização, porém somente o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) permite a participação dos países em desenvolvimento, tornando-se atrativo para países como o Brasil. O MDL foi criado com o objetivo de estimular o desenvolvimento sustentável pela transferência de tecnologia e incentivo a um novo padrão de desenvolvimento com base na conciliação entre crescimento

econômico, inclusão social e respeito ao meio ambiente. Esse mecanismo permite que os países que ratificaram o Protocolo de Kyoto possam contabilizar para si unidades de crédito de carbono ou Reduções Certificadas de Carbono (RCEs), e assim alcançar suas metas, a partir de projetos sustentáveis executados em países em desenvolvimento, desde que esses projetos resultem na redução das emissões e/ou aumento da remoção de GEE (BORJA; RIBEIRO, 2007).

As empresas ujas emissões excederem as permissões as quais foram atribuídas terão que comprar créditos de carbono de outras companhias que não realizaram todas as emissões permitidas. Em princípio, o comércio de permissões cria incentivos para as empresas encontrarem meios de reduzir suas emissões e vender seus créditos no mercado aberto de carbono. O crédito de carbono é, portanto, a medida em toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), evitadas ou resgatadas por meio das atividades de projeto, sendo uma unidade igual a uma tonelada de GEE que deixou de ser lançado na atmosfera (ANDRADE; COSTA, 2008).

Uma das oportunidades de gerar créditos de carbono é pela redução de emissões de GEE nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (BRASIL, 2013), o tratamento de resíduos em 2010 era responsável pela emissão de 48.737 GgCO₂eq no Brasil, enquanto que a contribuição do tratamento de esgoto era de 19.401 GgCO₂eq. Mas, segundo informações do SNIS (2022), apenas 55% da população brasileira era atendida com redes de esgotamento sanitário em 2020, o que sugere que poderá haver um acréscimo significativo nas emissões de GEE quando houver ampliação da rede de coleta e tratamento de esgotos.

Os processos biológicos no tratamento do esgoto, tanto aeróbios quanto anaeróbios, podem contribuir para a intensificação do efeito estufa devido ao metabolismo microbiano produzir alguns GEE. De acordo com SANEPAR (2020), na coleta e tratamento de esgoto, pode haver a emissão de CO₂, CH₄ e N₂O em diferentes etapas, dependendo do tipo de processo adotado e das condições operacionais existentes. O CO₂ é definido como um gás biogênico e, por isso, em tratamento de esgotos, não altera o balanço dos GEEs na atmosfera. Conseqüentemente, as emissões de CO₂ provenientes de ETEs não são passíveis de gerar créditos de carbono.

No entanto, o CH₄ é um gás que provém principalmente da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos e possui um potencial de aquecimento 21 vezes maior que o gás carbônico, sendo a DBO o principal fator determinante do seu potencial de geração nos

esgotos. Quanto ao N_2O , o (IPCC, 2006) assume que a sua maior emissão no setor de esgotos ocorre pela nitrificação e desnitrificação em estuários e rios, sendo assim, considera-se que em geral não há emissão significativa de nitrogênio durante o tratamento em si.

O setor de tratamento de esgoto se constitui em um instrumento fundamental de promoção do desenvolvimento sustentável nacional e local com ganhos significativos à qualidade de vida da população, bem como à diminuição de despesas e aplicação de recursos financeiros no sistema de saúde. Além disso, os créditos resultantes de projetos de MDL podem gerar maiores investimentos, buscando-se a universalização do saneamento básico brasileiro (LIMA; SALVADOR, 2014). Segundo Rosso & Stenstrom (2008), mesmo sem uma futura expansão do tratamento de esgoto para todas as áreas urbanas do mundo, as emissões de metano e, conseqüentemente, de dióxido de carbono associadas com o despejo de esgoto pode atingir $1,91 \times 10^5$ tCO₂/dia em 2025 e desse total, $1,21 \times 10^4$ tCO₂/dia podem se tornar créditos. Assim, reafirmam a existência do enorme potencial de desenvolvimento do serviço de tratamento e da obtenção de créditos de carbono.

Tendo em vista as informações explanadas até então, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar o potencial de geração de crédito de carbono a partir da estimativa de geração de gases do efeito estufa, em especial, o gás metano, em ETEs localizadas na Grande Aracaju, Sergipe.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O campo de estudo compreende as estações de tratamento da Grande Aracaju (Aracaju, Barra dos Coqueiros, Nossa Senhora do Socorro e São Cristóvão), operadas pela Companhia de Saneamento de Sergipe – DESO. No entanto, não foi possível obter os dados necessários para o estudo da ETE Jardim, situada em Nossa Senhora do Socorro, e, por isso, essa ETE não foi contemplada no presente estudo. No Quadro 1, são apresentadas as ETEs consideradas nesse estudo por município.

Os dados fornecidos pela companhia de saneamento e utilizados para as estimativas foram: estações de tratamento de cada município, vazão de entrada, tipos de tratamento e DBO do esgoto bruto. A base de cálculo para o tratamento de efluentes foi utilizada de acordo com a metodologia do IPCC (2006), capítulo 6. Este método, considerado um bom

preceito para situações com dados limitados, aplica valores padrão para o fator de emissão e os parâmetros de atividade.

Quadro 1. Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) avaliadas na Grande Aracaju.

Município	ETE
Aracaju	ERQ Sul
	ERQ Oeste
	ETE Orlando Dantas
Barra dos Coqueiros	ETE Barra dos Coqueiros
Nossa Senhora do Socorro	ERQ Norte
São Cristóvão	ETE Rosa Elze

Fonte: DESO (2020)

As diretrizes aplicadas no cálculo são para águas residuais e para lodo de forma conjunta; a distinção seria inadequada já que o lodo não é coletado separadamente. Além disso, normalmente, os valores teóricos de capacidade máxima de produção de metano (B_0) padrão para lodo e águas residuais são os mesmos e como os fatores padrão foram usados, as emissões de águas residuais e lodo podem ser estimadas em conjunto. Se a separação de lodo fosse praticada e as estatísticas apropriadas estivessem disponíveis, essas categorias de sub-fontes deveriam ser separadas.

2.2 População Atendida

Como as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) atendem a uma parte da população, foi necessário calcular a parcela da população atendida em cada ETE do estudo. Para realização destes cálculos, foi necessário utilizar dados disponibilizados pela companhia de saneamento, como as vazões médias. Estas foram obtidas para cada ETE através das vazões médias mensais fornecidas no ano de 2020. Nas ETE ERQ Sul, ERQ Oeste, ETE Orlando Dantas, ETE Barra dos Coqueiros e ERQ Norte, não havia dados de medida de vazão para todos os meses, faltando a do mês de agosto, também de fevereiro na ERQ Norte e de janeiro na ERQ Oeste e na ETE Orlando Dantas, então a média foi calculada com base nos dados mensais disponíveis.

Para determinação da população atendida, foi necessário obter o consumo per capita de água de cada município, disponibilizado no site do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em planilhas geradas na série histórica de 2020. Considerou-se o coeficiente de retorno de 0,80, relação entre a contribuição de esgoto e o volume consumido de água, conforme dados da companhia de saneamento.

Com as informações apresentadas, foi possível encontrar a população atendida por cada ETE (Equação 2) após rearranjo da Equação 1.

$$Q = \frac{C \times P \times q}{86400} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$P = \frac{Q \times 86400}{C \times q} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

Q : Vazão média (L/s);

C : Coeficiente de retorno (adimensional);

P : População atendida (hab);

q : Consumo per capita de água (L/hab.dia).

2.3 Componente Orgânico Degradável do Esgotos Bruto

O componente orgânico degradável é mais um dado necessário para a utilização do método do IPCC e foi calculado baseado na DBO do afluente e na contribuição per capita de esgoto (Equação 3). Com os valores da concentração de DBO do esgoto bruto de meses do ano de 2020, foi feita uma média anual de cada ETE, a qual foi utilizada nos cálculos.

Como o SNIS fornece o consumo de água e não a contribuição per capita de esgoto, este último foi obtido através do volume de água consumido juntamente com o coeficiente de retorno citado anteriormente (Equação 4). Assim, alcançou-se o D_{dom} de cada estação de tratamento de esgoto (Equação 5), que foram convertidos em kgDBO/hab.ano.

A carga orgânica dos efluentes domésticos pode ser aumentada pelo lançamento de efluentes industriais nos sistemas de esgotamento urbano ou também pode ser reduzida por infiltrações pluviais no esgoto. No entanto, como não há informações a esse respeito, esses dados foram considerados nulos.

$$DBO = \frac{D_{dom} \times 1000}{q_{esgoto}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$q_{esgoto} = q \times C \quad (\text{Eq. 4})$$

$$DBO = \frac{D_{dom} \times 1000}{q \times C} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

DBO : Concentração de matéria orgânica ($\text{g}/\text{m}^3 = \text{mg}/\text{L}$);

D_{dom} : Carga total de matéria orgânica (kgDBO/hab.ano);

q_{esgoto} : Contribuição per capita de matéria orgânica (DBO) (L/hab.dia).

2.4 Método do IPCC

A princípio, com a população atendida e o componente orgânico do esgoto bruto, encontrou-se a carga de matéria orgânica (Equação 6).

$$TOW_{dom} = P \times D_{dom} \text{ (Eq. 6)}$$

Onde:

TOW_{dom} : Efluente doméstico orgânico total (kgDBO/ano);

P : População atendida (hab);

D_{dom} : Carga total de matéria orgânica (kgDBO/hab.ano).

Em seguida, calculou-se os fatores de conversão de metano (MCFs) (Equação 7), que representam o potencial de geração de CH₄ em diferentes sistemas de manejo de águas residuárias. Para isso, utilizou-se valores padrões da CETESB (2010), que variam de 0 a 1, a depender da via de tratamento e/ou destinação final. As informações dos sistemas de tratamento usados por cada ETE foram fornecidas pela companhia de saneamento, que tem o controle dos serviços de água e esgoto dos municípios da região metropolitana de Aracaju (Quadro 2).

$$MCF_i = \sum_x (WS_{i,x} \times MCF_x) \text{ (Eq. 7)}$$

Onde:

MCF_i : Média ponderada dos MCFs (adimensional);

$WS_{i,x}$: Fração de efluente do tipo “i” tratada usando o sistema “x” (adimensional);

MCF_x : Fator de conversão de metano do sistema “x” tratando o efluente “i” (adimensional).

Quadro 2. Fator de conversão de metano de cada sistema de tratamento

ETE	Tratamento ¹	MCFi ²
ERQ Sul	UASB + LA + LM	0,8
ERQ Oeste	UASB + LA + C	0,8
ETE Orlando Dantas	LA + C	0,8
ETE Barra dos Coqueiros	UASB + LA + C	0,8
ERQ Norte	LF + LM	0,2
ETE Rosa Elze	UASB + LF + LM	0,8

Fonte: 1: Adaptado da DESO (2020) e 2: CETESB (2010)

Legenda: UASB: Reator Anaeróbio de Manta de Lodo; LA: Lodo Ativado; LM: Lagoa de Maturação; C: Cloração; LF: Lagoa Facultativa

Assim, encontram-se as estimativas dos fatores de emissão (Equação 8).

$$EF = B_o \times MCF_i \text{ (Eq. 8)}$$

Onde:

EF : Fator de emissão (kgCH₄/kgDBO);

B_o : Capacidade máxima de produção de metano (kgCH₄/kgDBO) = 0,60 kgCH₄/kgDBO [16];

MCF_i : Média ponderada dos MCF (adimensional).

Referente ao metano recuperado, de acordo com a CETESB (2010), a prática verificada no Brasil é considerar seus cálculos apenas para reatores anaeróbios e digestores anaeróbios do sistema de lodos ativados que contêm sempre um queimador. Sendo assim, adotou-se que 100% do metano dessas instalações seria recuperado, com eficiência de aproximadamente 50%. Para as emissões em sistemas de tratamento de lagoa anaeróbia, lagoa facultativa, lagoa mista e lagoa de maturação, considerou-se que não ocorre recuperação de metano.

Conhecidos os dados discutidos até então, encontram-se as estimativas de emissão de CH₄ pelo tratamento de efluentes (Equação 9).

$$EMISS\tilde{O}ESCH_4 = (TOW_{dom} \times EF) - R \text{ (Eq. 9)}$$

Onde:

$EMISS\tilde{O}ESCH_4$: Emissão de CH₄ pelo tratamento de efluentes (t/ano);

TOW_{dom} : Efluente doméstico orgânico total (kgDBO/ano);

EF : Fator de emissão (kgCH₄/kgDBO);

R : Metano recuperado ao ano (kgCH₄/ano).

Como o metano possui potencial de aquecimento 21 vezes maior que o gás carbônico (IPCC, 2006), a estimativa deste último foi calculada por essa relação (Equação 10).

$$EMISS\tilde{O}ESCO_2 = PAG \times EMISS\tilde{O}ESCH_4 \text{ (Eq. 10)}$$

Onde:

$EMISS\tilde{O}ESCO_2$: Estimativa de emissão de CO₂ pelo tratamento de efluentes (t/ano);

PAG : Potencial para aquecimento global do metano, igual a 21 (adimensional);

$EMISS\tilde{O}ESCH_4$: Estimativa de emissão de CH₄ pelo tratamento de efluentes (t/ano).

Em conclusão, para encontrar o crédito dessas emissões, o cálculo das estimativas foi obtido em toneladas multiplicado pelo valor monetário da unidade (Equação 11). Assim, adotou-se a cotação de carbono de €78,30/tCO₂ e o valor do Euro de R\$5,19, valores adquiridos no dia 01 de abril de 2022 pelos sites Investing.com e XE, respectivamente.

$$CUSTO = EMISSÃO_{ESCO_2} \times E \times RS \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

CUSTO: Valor monetário (R\$);

EMISSÃO_{ESCO₂}: Estimativa de emissão de CO₂ pelo tratamento de efluentes (t/ano);

E: Valor unitário da tonelada de CO₂, igual a 78,30 (€);

RS: Valor unitário do Euro, igual a 5,19 (R\$).

3. RESULTADOS

3.1 População Atendida

Os resultados referentes à análise da vazão média e do consumo per capita de água para obtenção da população atendida em cada ETE mostram que há grande diferença entre as vazões médias das estações, sendo as da ERQ Sul, em Aracaju, e da ERQ Norte, em Nossa Senhora do Socorro, as maiores. Enquanto os valores do consumo per capita de água dos municípios são próximos, sendo Aracaju e São Cristóvão os mais expressivos (Tabela 1).

Com isso, a população atendida foi encontrada para cada estação, por meio da Equação 2. A ERQ Sul se apresenta como a ETE com maior atendimento e a ETE Rosa Elze é a que atende o menor número de habitantes.

Tabela 1. Vazão média de esgoto, consumo de água potável e população

Município	ETE	Vazão média (L/s) ¹	q (L/hab.dia) ²	População (hab) ³
Aracaju	ERQ Sul	317,69	151,84	225.965
	ERQ Oeste	63,02		44.827
	ETE Orlando Dantas	23,27		16.549
Barra dos Coqueiros	ETE Barra dos Coqueiros	25,54	133,29	20.698
Nossa Senhora do Socorro	ERQ Norte	245,80	120,95	219.489
São Cristóvão	ETE Rosa Elze	25,71	176,35	15.744

Fonte: 1: DESO (2020), 2: SNIS (2021) e 3: Autores (2023)

3.2 Componente Orgânico Degradável do Esgoto Bruto

De acordo com NBR 12.209 (ABNT, 2011), a DBO por habitante estipulada no Brasil é de valores na faixa de 45 a 60 g de DBO/hab.dia. Entretanto os valores encontrados com os dados disponibilizados pelas ETEs, com base na Equação 5, indicavam índices menores para os habitantes da região de atendimento, com exceção da ETE Orlando Dantas, como mostra a Tabela 2.

Esta diferença pode ser ocasionada por vários fatores, como possível diluição do esgoto ou das diferentes urbanizações ocorrentes na localidade. O primeiro fator pode acontecer devido à infiltração de água pluvial na tubulação de captação de esgoto. Por consequência, ocorre a mistura que ocasiona a diluição do esgoto com a água da chuva, sofrendo uma redução de carga orgânica (LIMA, 2012).

Tabela 2. Estimativa da carga total de matéria orgânica

ETE	DBO (g/m ³) ¹	Ddom (gDBO/hab.dia) ²	Ddom (kgDBO/hab.ano) ²
ERQ Sul	256,55	31,16	11,37
ERQ Oeste	222,00	26,97	9,84
ETE Orlando Dantas	384,00	46,65	17,03
ETE Barra dos Coqueiros	269,00	28,68	10,47
ERQ Norte	166,50	16,11	5,88
ETE Rosa Elze	282,15	39,81	14,53

Fonte: 1: DESO (2020) e 2: Autores (2023)

3.3 Estimativas de Emissão de Metano e de Carbono

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados das estimativas das emissões de metano e carbono para cada ETE.

Tabela 3. Estimativa de emissão de metano e de carbono em cada ETE

ETE	tCH ₄ /ano	tCO ₂ /ano
ERQ Sul	617	12.954
ERQ Oeste	106	2.224
ETE Orlando Dantas	68	1.420
ETE Barra dos Coqueiros	52	1.092
ERQ Norte	155	3.252
ETE Rosa Elze	55	1.153

Fonte: Autores (2023)

3.4 Estimativas de Créditos de Carbono

A partir do total de toneladas de carbono equivalente emitidas por cada estação de tratamento, calculou-se seus custos (Tabela 4), ou seja, o valor monetário de créditos de carbono que seria possível obter através das emissões de GEE de cada ETE. Estes valores somados chegam a R\$ 8.978.999,47.

Tabela 4. Estimativa de custo monetário em cada ETE

ETE	Custo (R\$)
ERQ Sul	5.264.225,83
ERQ Oeste	903.689,70
ETE Orlando Dantas	577.079,94
ETE Barra dos Coqueiros	443.824,29
ERQ Norte	1.321.682,03
ETE Rosa Elze	468.497,68

Fonte: Autores (2023)

4. DISCUSSÃO

Observou-se, a partir dos resultados, que os reatores anaeróbios de manta de lodo e os lodos ativados seriam os principais em termos de emissões de metano, isto porque o MCF associado a estes mecanismos têm valor mais alto devido à condição de operação (ausência de oxigênio), que provoca a ocorrência de reações nas quais um dos produtos é o metano. Um aspecto relevante é o fato de que estes estão relacionados à existência de um queimador, que captura parte desse gás (metano recuperado).

A prática verificada no Brasil torna menor a emissão nos sistemas de tratamento citados. Assim, a maior emissão de metano, comparada às demais, ocorreu na ERQ Sul, chegando a valor superior a doze mil toneladas de CO₂ equivalente ao ano, como pode ser observado na Tabela 3.

Ainda, por influência do número de população atendida e de DBO, as demais estações em que o MCF é alto obtiveram grande discrepância com a ERQ Sul, ERQ Oeste, ETE Orlando Dantas, ETE Barra dos Coqueiros e ETE Rosa Elze, como mostra a Figura 1. Pelo mesmo motivo, a ERQ Norte emitiu valor superior às estações de MCF maior, exceto à ERQ Sul, sendo a segunda maior emissora. De acordo com Lima & Salvador (2014), normalmente, por serem compostas por associação com lagoa facultativa, a ERQ Norte e a ETE Rosa Elze seriam as menores emissoras.

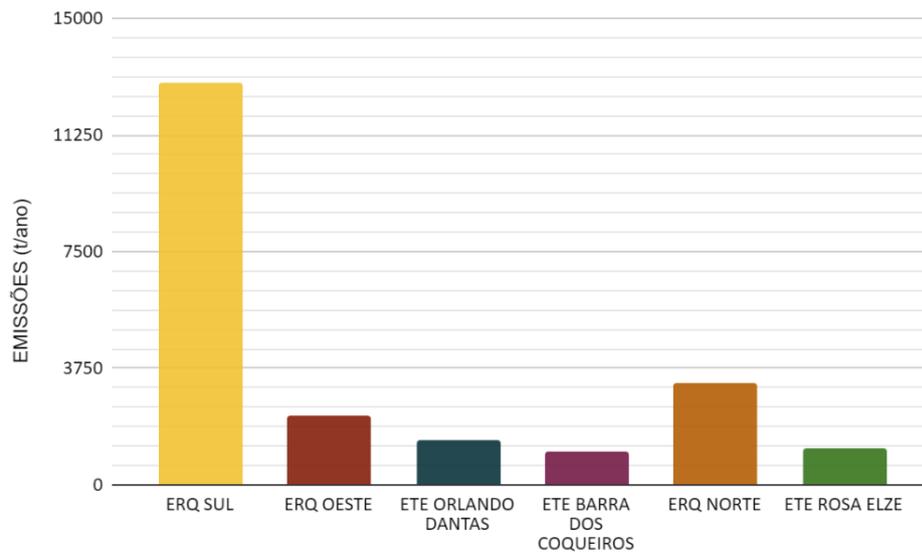


Figura 1. Relação entre as estimativas de emissão de carbono das ETEs referente ao ano de 2020

No entanto, em função da população atendida e da atuação do UASB, respectivamente, isso não ocorreu no presente estudo. Portanto, Aracaju emitiu os maiores índices de carbono, seguida de Nossa Senhora do Socorro, São Cristóvão e Barra dos Coqueiros de forma decrescente, como mostra a Figura 2.

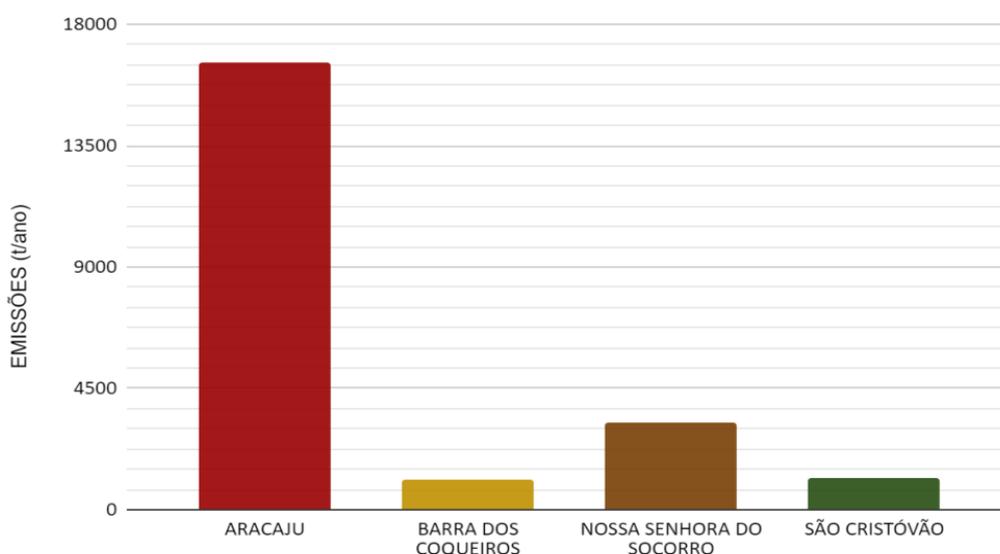


Figura 2. Relação entre as estimativas de emissão de carbono dos municípios

O potencial de obtenção de créditos do setor de tratamento de esgotos está na adição de *flares* em estações com tecnologia anaeróbia e na utilização de queimadores que possibilita o uso da energia resultante do tratamento anaeróbio para completar a demanda energética do metabolismo. Este sistema transforma o metano em dióxido de carbono, apresentando, em média, uma redução de 50% nas emissões.

Como no caso estudado apenas reatores anaeróbios e lodos ativados (digestor de lodo) contêm queimador, onde 100% do metano dessas instalações foi recuperado com eficiência de aproximadamente 50%. Somente os valores encontrados para as estações situadas em Aracaju, Barra dos Coqueiros e São Cristóvão são considerados estimativas de créditos de carbono e podem se tornar monetários. Assim, seriam geradas, para uma cotação de €78,30/tCO₂, boas estimativas – cerca de R\$ 7.657.317,44 – que podem ser melhor observadas através da Figura 3.

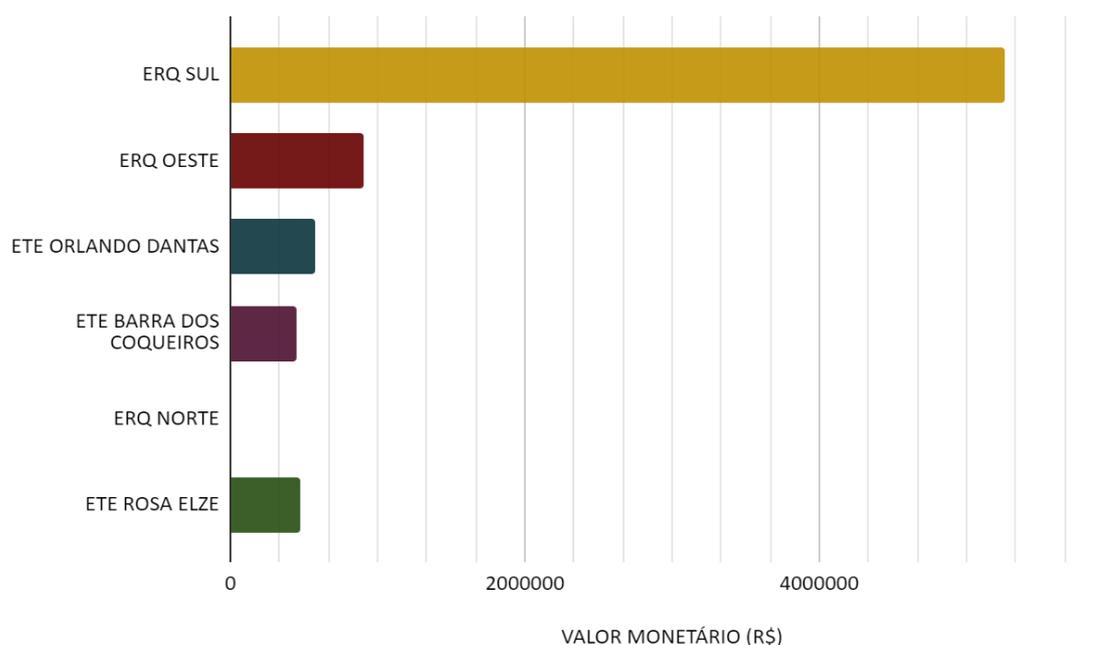


Figura 3. Estimativas monetárias a partir de créditos de carbono gerados nas ETEs

Em um cenário ideal, escolheu-se para as situações em que não houve geração de créditos de carbono – são sistemas abertos que não permitem recuperação de gás – a alternativa de serem substituídas por métodos aeróbios, pois assim suas emissões seriam reduzidas a zero e conseguiriam o valor monetário encontrado para o custo de dióxido de carbono gerado (Tabela 5). É fundamental lembrar que se trata de um cálculo simplificado,

pois existem metodologias e exigências específicas para cada caso de substituição ou adição de tecnologia.

Para as estações em que houve RCEs, recomenda-se melhorar a eficiência dos equipamentos para a máxima produção de CO₂. Contudo, dado que o MDL é um instrumento adicional e o Protocolo de Kyoto prioriza medidas internas de redução de emissão de GEE, esta medida tem poucas possibilidades de gerar créditos. Desse modo, o cálculo da geração de RCEs e seu valor monetário não foi aplicado para esta situação.

As alternativas de mitigação propostas até então, assim como as análises, foram feitas com base nas emissões de GEE. Não obstante, há outros critérios como área, consumo energético e custos que influenciam na opção de tratamento de esgoto a ser implantada.

Ao analisar as toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente encontradas através do método proposto em comparação com os resultados obtidos por Oliveira (2022), que calculou a geração de créditos de carbono em ETE de Sergipe através do software ProBio 1.0 – programa que estima o metano gerado nos reatores UASB –, para as estações ERQ Sul (9497,70 t/ano), ERQ Oeste (1.435,20 t/ano), ETE Barra (889,10 t/ano) e ETE Rosa Elze (692,00 t/ano) em cenário típico, percebe-se que os valores do presente estudo foram maiores, provavelmente pela inclusão do gás gerado a partir do tratamento do lodo do esgoto. No entanto, vale ressaltar que as estações de tratamento de esgoto da Grande Aracaju, atualmente, não realizam a digestão do lodo e, portanto, esses valores mais elevados indicam apenas o potencial de geração de crédito de carbono.

Em outro estudo desenvolvido em Blumenau-SC (RAMOS et al., 2015), verificou-se o potencial de geração de créditos de carbono em ETE com reator anaeróbico RAFA através do método do IPCC, com o uso de dados reais do ano estudado. Os resultados foram ainda menores que o da ETE Barra dos Coqueiros – estação com menor emissão deste trabalho – tanto na emissão de metano quanto de dióxido de carbono, 31,1 e 653 toneladas em 7 meses, respectivamente, resultado dos menores índices de DBO naquela estação.

Já em comparação com os resultados obtidos por Lima e Salvador (2014), calculados para cada sistema de tratamento de esgoto, com valores padrão do IPCC e para uma população de mil pessoas, percebe-se valores bem menores que os estipulados para cada sistema em tCH₄/1000pessoas/ano, possivelmente pela carga total de matéria orgânica que foi menor que o definido pela NBR 12.209 (ABNT, 2011).

Nesse sentido, o presente trabalho se torna um estímulo para o desenvolvimento de novas pesquisas que demonstrem as possibilidades de redução de emissão de gases do

efeito estufa em estações de tratamento de esgoto. Estimula-se ainda a obtenção de dados reais e locais sempre que possível, através de um monitoramento constante e mais detalhado das companhias de saneamento, de modo a reduzir a utilização de valores médios generalizados.

Por fim, a quantidade de créditos de carbono gerada apenas na Grande Aracaju mostra que o tratamento do esgoto municipal sanitário pode ser considerado um fator de mitigação do aquecimento global e, se utilizado como atividade de projeto de MDL, pode proporcionar ganhos ambientais, econômicos e sociais. Os benefícios poderiam ser ainda maiores em caso de aumento da eficiência dos sistemas e ampliação do atendimento à população da Grande Aracaju, que ainda conta com apenas 55% (SNIS, 2022) em média de cobertura de rede de esgoto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma estimativa de créditos de carbono no tratamento de esgotos da Grande Aracaju/SE, observou-se que as estações de tratamento e os municípios com maior número de habitantes atendidos pelo sistema são os que emitem maiores índices de GEE e, conseqüentemente, são os mais relevantes no contexto dos créditos de carbono. Essas estações são a ERQ Sul, que emite cerca de 12.954 tCO₂/ano, e a ERQ Norte, com cerca de 3.252 tCO₂/ano, nos municípios de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro, respectivamente.

A maior parte da receita gerada foi através da cidade de Aracaju, em torno de R\$ 6.744.995,47, totalizando R\$ 7.657.317,44 para os três municípios. Embora esses valores absolutos não sejam garantia de viabilidade econômica, tendo em vista que os custos para inclusão do tratamento de lodo não foram abordados neste trabalho, a redução da emissão de GEE promove melhorias ambientais e sociais, e a venda dos créditos de carbono não pode ser vista apenas como uma forma de obter lucro.

O evidente acréscimo dos gases do efeito estufa – somente neste estudo foram estimadas 22.095,25 tCO₂/ano – e, por consequência, a tendência de aumento de temperatura média global, tornam necessário adotar medidas acauteladoras e mudar o modelo de desenvolvimento mundial. Dessa forma, é essencial que as mais diversas medidas relacionadas ao mecanismo de desenvolvimento limpo evoluam e a postura ambiental se torne padrão cultural.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR nº 12.209 - Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2011.
- ANDRADE, J. C. S.; COSTA, P. MUDANÇA CLIMÁTICA, PROTOCOLO DE KYOTO E MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO: DESAFIOS À GOVERNANÇA AMBIENTAL GLOBAL. 2008.
- BORJA, A. G. B.; RIBEIRO, F. L. CRÉDITO DE CARBONO: DA ESTRUTURAÇÃO DO PROTOCOLO DE KYOTO À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES DE PROJETO MDL. v. 3, 2007.
- BRASIL. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, , 2013.
- CETESB. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases do Efeito Estufa. Emissões de Gases de Efeito Estufa no Tratamento e Disposição de Resíduos**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, , 2010.
- EIBEL, E.; PINHEIRO, R. B. M. CRÉDITO DE CARBONO. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 588, 9 out. 2015.
- IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama - Japão: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006. v. 3
- IPCC. **Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. International Panel on Climate Change, , 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf>
- LIMA, A. P. **Produção de Gases de Efeito Estufa e Potencial de Geração de Créditos de Carbono em Processos de Tratamento de Esgoto Sanitário**. São Carlos - SP: Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- LIMA, A. P.; SALVADOR, N. N. B. Geração de metano e de créditos de carbono no tratamento de esgotos sanitários. **Revista DAE**, v. 62, n. 195, p. 60–70, 2014.
- MARQUES, V. S. O efeito estufa e o aquecimento global. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 15, p. 93–106, 1 jan. 1992.
- OLIVEIRA, J. N. DE. **Geração de Créditos de carbono em estações de tratamento de esgoto no estado de Sergipe**. São Cristóvão, SE: Universidade Federal de Sergipe, 2022.
- RAMOS, C. A. et al. Potencial de Geração de Créditos de Carbono na Estação de Tratamento de Esgotos Unidade Garcia, em Blumenau, Santa Catarina. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2015.

ROSSO, D.; STENSTROM, M. K. The carbon-sequestration potential of municipal wastewater treatment. **Chemosphere**, v. 70, n. 8, p. 1468–1475, fev. 2008.

SANEPAR. **Inventário de Gases do Efeito Estufa**. Companhia de Saneamento do Paraná, , 2020.

SNIS. **Série Histórica**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, , 2022. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>