

Gestão sustentável do saneamento

Nota Técnica 4 – A aplicação da avaliação do ciclo de vida em diferentes níveis de tratamento de esgoto

*Sustainable management of sanitation
Technical Note 4 - The application of life cycle
assessment at different levels of sewage treatment*

**Katia Gonçalves Gutierrez^{1*}, Matheus Augusto de Oliveira Fernandes²,
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo³**

RESUMO

A avaliação de ciclo de vida (ACV) vem sendo adotada como importante instrumento de apoio aos tomadores de decisão do setor de saneamento, em especial em questões relacionadas ao tratamento de esgoto sanitário e a destinação de seus subprodutos. Esse trabalho busca apresentar a versatilidade dessa ferramenta, trazendo exemplos de aplicação da metodologia em diferentes cenários. Apresentamos um estudo simulado, para atendimento a pequenas populações, que compara dois sistemas combinados anaeróbio e aeróbio na destinação do lodo e biogás produzido e que traz como principal ponto crítico a potencialidade de impacto relacionada à cal comumente utilizada na desinfecção de lodo de esgoto, quando do seu uso como biossólido. No estudo de caso de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) do tipo lodos ativados convencional, mesmo com a adoção de um sistema de aquecimento dos biodigestores de lodo e aproveitamento da energia elétrica na própria ETE, proporcionados pela instalação de um sistema de cogeração de energia, parte importante da energia térmica produzida é desperdiçada. Esse resultado aponta a necessidade de aprimoramento das rotas de destinação dessa energia para melhora do desempenho ambiental global da ETE e amplia a discussão sobre possíveis usos da energia térmica, como, por exemplo, a secagem do lodo com fins de desinfecção para uso como biossólido ou apenas para redução de volume de lodo transportado a aterros sanitários. No terceiro trabalho, para atendimento ao enquadramento do curso d'água receptor, já que a ETE se encontra instalada no centro do município e causa importante impacto na qualidade de vida dos moradores do entorno, foram propostas alternativas

ABSTRACT

Life cycle assessment (LCA) has been applied as an important tool to support decision makers in the sanitation sector, especially in issues related to the treatment of sanitary sewage and the destination of its by-products. This work seeks to present the versatility of this tool, bringing examples of application of the methodology in different scenarios. We present a simulated study, for small populations, which compares two combined anaerobic/aerobic systems in the destination of the produced sludge and biogas. The main critical point is the potential impact related to the quicklime commonly used in sewage sludge disinfection, when used as biofertilizer. In the case study of a conventional activated sludge WWTP, we see that even with the use of a heating system for the sludge digesters and the use of electricity in the WWTP itself, provided by the installation of an energy cogeneration system, an important part of the thermal energy produced is wasted. This result points to the need to improve the routes for the destination of this energy to improve the overall environmental performance of the WWTP and broadens the discussion on possible uses of thermal energy, such as drying sludge for disinfection purposes for use as biofertilizer or just to reduce the volume of sludge transported to landfills. In the third paper, meet the framework of the receiving watercourse, since the WWTP is installed in the center of a city and causes significant impact on the quality of life of surrounding residents, treatment and management alternatives were proposed for the effluent from the secondary treatment type UASB and trickling filter. By applying LCA, it was possible to realize that the greatest gains in terms of reduction of eutrophication potential were only achieved with the choice of tertiary treatment technologies that incur

¹Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora Adjunta no Instituto de Educação Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

²Engenheiro Ambiental pela UFMG. Aluno de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

³Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne - UK. Professor titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis.

*Endereço para correspondência: Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Educação Agricultura e Ambiente. Rua 29 de agosto, 786. Humaitá- AM. CEP: 69800-000. e-mail: katiagutierrez@ufam.edu.br

de tratamento e destinação do efluente oriundo do tratamento secundário do tipo UASB+FBP. Com a ACV foi possível perceber que os maiores ganhos em termos de diminuição de potencial de eutrofização só foram conseguidos com a escolha de tecnologias de tratamento terciário que incidem em maiores potenciais de impacto para as demais categorias avaliadas. Esses resultados demonstram, especialmente, que há de se ter parcimônia na escolha de tecnologias para que não haja transferência de impactos de uma fase do tratamento para outra. Apesar da comprovada versatilidade e eficiência da ACV, ressalta-se a necessidade de um olhar atento para os resultados para que não se tomem decisões amparadas exclusivamente pela metodologia ACV quando se avaliando o tratamento de esgotos domésticos e seus subprodutos úteis, efluente tratado, lodo e biogás, ainda que seja um importante indicador de potenciais impactos.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida, tratamento de esgoto, gestão de subprodutos

in higher impact potentials for the other categories evaluated. These results show that one must be careful when choosing technologies so that there is no transfer of impacts from one stage of treatment to another. Despite the proven versatility and efficiency of LCA, it is important to consider the need for a careful look at the results so that decisions are not made based solely on the LCA methodology when evaluating the treatment of domestic sewage and its useful by-products, treated effluent, sludge and biogas, even though an important indicator of potential impacts.

Keywords: life cycle assessment, wastewater treatment, by-product management

1. INTRODUÇÃO

A metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) enfoca os possíveis aspectos e impactos ambientais (uso de recursos e consequências para o meio ambiente) ao longo do ciclo de vida do produto. Da mesma forma, a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) fornece informações adicionais para auxiliar no desempenho de um inventário de ciclo de vida (ICV) de um sistema ou produtos, a fim de obter melhor compreensão de sua significância ambiental. Em síntese, em se analisando uma estação de tratamento de esgoto (ETE), seria possível, a partir da ACV, inferir sobre pontos críticos e/ou possíveis de ganhos em seu fluxograma, considerando os potenciais impactos ambientais relacionados.

Globalmente, a metodologia de ACV tem sido aplicada com finalidades distintas em ETEs, mas sempre com o objetivo principal de ser mais uma ferramenta de apoio aos tomadores de decisão do setor de saneamento, seja na implantação ou na modernização de ETEs e/ou na gestão de seus subprodutos, como efluente tratado, lodo e biogás, e até mesmo no desenvolvimento de políticas públicas.

No Brasil, a ACV vem sendo adotada em diversos estudos no setor de saneamento apesar de todas as dificuldades sabidas de acesso à informações representativas da realidade local, aos bancos de dados contendo os ICV, e aos *softwares* de ACV, dado os custos envolvidos e/ou o preparo técnico necessário para a manipulação dos mesmos.

Nesse sentido, nessa Nota Técnica (NT) são apresentadas experiências de aplicação da ACV em cenários distintos de ETEs, tecnicamente e em termos de porte, que demonstram a versatilidade e eficiência da ferramenta. Os objetivos incluem: (i) demonstrar diferentes fluxogramas e parâmetros envolvidos na elaboração do estudo; (ii) comparar cenários de destinação dos subprodutos - lodo e biogás e do efluente tratado - sob a perspectiva dos impactos ambientais potenciais; e (iii) identificar pontos de atenção na análise ambiental de ETEs e quais conclusões podem ser traçadas a partir dos resultados de uma ACV.

São apresentados três estudos, a saber:

1. ACV para avaliação dos impactos ambientais potenciais da destinação do lodo e biogás de duas ETEs de pequeno porte, cuja tecnologia corresponde à combinação do reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês, *upflow anaerobic sludge blanket*) com tecnologias aeróbias: filtro biológico percolador (FBP) e sistema alagado construído (SAC).
2. ACV para avaliação dos impactos ambientais potenciais relacionados ao aproveitamento energético do biogás gerado no biodigestor de lodo oriundo de tratamento de esgoto por tratamento aeróbico, consistido por sistema de lodos ativados convencional, para uma planta de grande porte (projetada para um equivalente populacional de um milhão de habitantes).

3. ACV para avaliação dos impactos ambientais potenciais de alternativas tecnológicas para implementação de um tratamento terciário e novas rotas de destinação do efluente tratado de um sistema combinado UASB + FBP já em operação e com necessidades de adequação para ajuste às exigências do órgão ambiental.

2. APLICAÇÃO DA ACV PARA AVALIAR O DESEMPENHO AMBIENTAL DE DUAS ETES SIMPLIFICADAS, VISANDO AVALIAR O GERENCIAMENTO DOS SUBPRODUTOS

2.1. Contextualização

ETEs contribuem para a diminuição de impactos relacionados à depleção de oxigênio, à eutrofização, ao lançamento de substâncias tóxicas nos corpos receptores e aos danos à saúde humana. Assim, desfrutam, inquestionavelmente, de um caráter ambientalmente favorável. Todavia, devido ao consumo de energia, ao uso de compostos químicos, às emissões gasosas para a atmosfera e à produção de subprodutos sólidos, as ETEs também podem causar impactos ambientais negativos.

O biogás, por exemplo, por muito tempo não foi visto positivamente em termos ambientais, já que apresenta elevada concentração de metano, um dos gases de “efeito estufa”, com potencial de poluição superior a 25 vezes quando comparado ao dióxido de carbono (CO₂). Todavia, a recuperação do biogás, vinculada ao seu representativo potencial energético e constante produção nas ETEs tem sido apresentada como viável em estudos que propõem o seu uso como fonte de energia térmica e elétrica (ROSA *et al.*, 2018).

Em municípios com população inferior a 50.000 habitantes, em comunidades rurais e em condomínios residenciais, as ETEs de pequeno porte ou descentralizadas têm se tornado uma opção sustentável por serem alternativas acessíveis em locais desprovidos de redes coletoras de esgoto, com os sistemas combinados anaeróbio e aeróbio se destacando por vários motivos: baixos custos de implantação e de operação; manutenção simples e boa eficiência; produção de biogás, que pode ser usado para

produção de energia; produção de lodo excedente relativamente menor quando comparada com sistemas exclusivamente aeróbios (CHERNICHARO, 2001).

Dentre as diversas alternativas disponíveis de sistemas combinados, duas têm sido frequentemente consideradas por pesquisadores, relacionadas ao uso do reator UASB: (i) os SAC, também conhecidos como *wetlands* construídos, que buscam recriar, na medida do possível, a estrutura e função dos ecossistemas alagados naturais, atuando como “filtros da natureza” (ITRC, 2003); e (ii) os FBP, que são constituídos com meio suporte de material grosseiro, tal como pedras, ripas ou material plástico, sobre os quais o esgoto é aplicado continuamente (PONTES, 2003). A seguir são apresentados exemplos de ACV e AICV em dois sistemas de ETEs de pequeno porte constituídas por reator UASB+SAC e reator UASB+FBP.

2.2. Caracterização dos estudo de casos

Foram avaliados os impactos ambientais potenciais relacionados ao tratamento de esgoto doméstico, incluindo aqueles referentes ao gerenciamento dos subprodutos - lodo e biogás - de dois sistemas de tratamento anaeróbio e aeróbio combinados: (i) UASB+SAC; e (ii) UASB+FBP. Os sistemas foram modelados com base em dados de literatura, visando corresponder à realidade de ETEs localizadas em pequenas comunidades. O estudo considerou apenas a etapa de operação dos sistemas, não sendo consideradas nas análises as etapas de coleta e transporte do esgoto, implantação e descomissionamento da ETE e equipamentos.

Na **Figura 1** é apresentado o escopo da AICV, em que são contempladas as entradas e saídas principais dos sistemas, incluindo os subprodutos.

Foram adotados princípios das Normas Brasileiras - NBR ISO 14.040 e Gestão ambiental e avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura e NBR ISSO 14.044 Gestão ambiental e avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações (ABNT, 2009a; 2009b). O *software* SimaPro, que tem sido frequentemente utilizado em pesquisas de ACV em ETEs, foi adotado. Para as AICVs, o método escolhido foi o ReCiPe. O método CED, ou demanda acumulada de energia, foi usado para avaliação do impacto de mesmo nome.

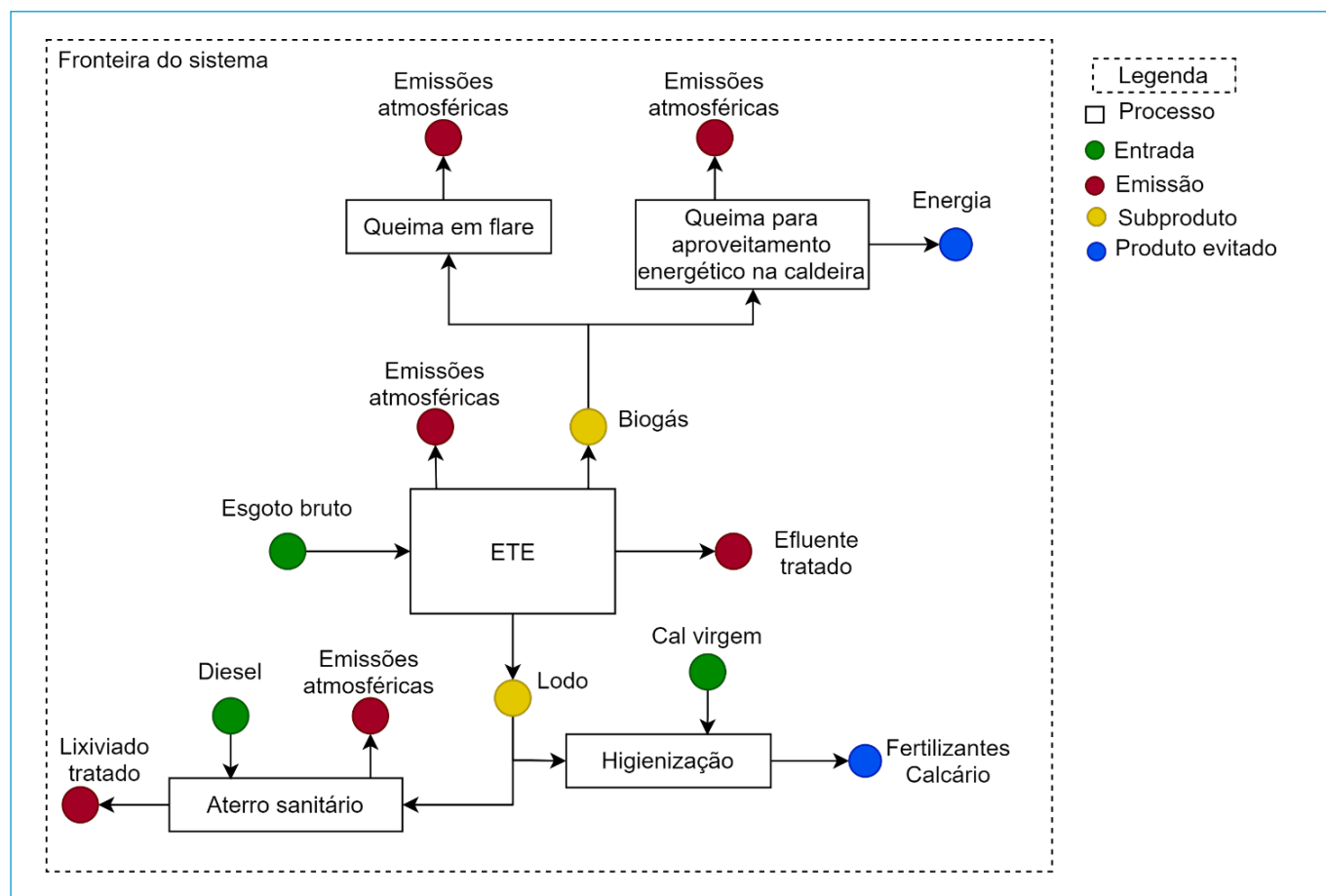


Figura 1 – Escopo dos sistemas de tratamento.

A unidade funcional (UF), escolhida para a comparação entre tratamentos e respectivas rotas, foi o metro cúbico de esgoto a ser tratado. Todas as emissões, materiais e consumo de energia foram então referidas a esta UF, que será tratada no texto como m^3 de esgoto.

2.3. Inventário de ciclo de vida (ICV)

Por se tratar de sistemas hipotéticos, a caracterização qualitativa e quantitativa dos fluxos de massa e energia das ETEs foram modeladas a partir de dados de literatura. Para a caracterização do esgoto afluente e as eficiências de remoção foram utilizados dados médios de Oliveira (2006) e von Sperling (2014).

No tocante à produção de biogás no reator UASB foram considerados duas possíveis destinações: (i) queima em *flare*; e (ii) queima controlada para utilização do calor em caldeira. As eficiências de queima consideradas foram de 50% para *flare* (UNFCCC, s.d.) e 85% para caldeira (ROSA,

2013). Dada a produção líquida de biogás e o poder calorífico inferior do CH_4 , os valores de calor perdido no *flare* e na caldeira foram, respectivamente, $1,60 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto e $0,82 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto. Para a caldeira, o calor útil foi de $1,90 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto.

Nos pós-tratamentos, foram consideradas também emissões de óxido nítrico (N_2O) e metano (CH_4). Para o SAC, foram utilizados os fatores de emissão reportados por Fuchs *et al.* (2011), chegando-se aos valores de $29,1 \text{ g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto e $0,29 \text{ g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto. As emissões de gases relacionadas ao FBP foram adaptadas e estimadas da ordem de $2,68 \text{ g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto e de $0,23 \text{ g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto.

A produção de lodo no sistema foi baseada em dados médios de von Sperling (2014). Em ambos os sistemas, considerou-se que o lodo foi desidratado em um sistema natural (em leitos de secagem, sem consumo de energia), com aumento de sólidos totais para 35% em ambos os

sistemas. Para o lodo, foram consideradas duas possíveis rotas de destinação: (i) utilização como bio sólido; e (ii) disposição em aterro sanitário. Foi considerado bio sólido, a mistura do lodo desidratado com a adição de 50% de cal virgem, em relação ao peso do lodo seco (ANDREOLI *et al.*, 2013). Este bio sólido contabilizou créditos como fertilizante do solo, em termos de NPK e corretor de pH de solo, como calcário evitado. Considerando a digestão anaeróbia do lodo e a adição da cal, a forma química dos nutrientes contabilizados em termos de NPK na AICV foram: ureia amônia nitrato (N), fosfato oní nitrato (P_2O_5) e óxido de potássio (K_2O).

Para a modelagem dos aspectos relacionados à destinação final do lodo em aterro sanitário, foi utilizada a metodologia descrita em Gutierrez *et al.* (2019). Em ambas as destinações, para o transporte do lodo considerou-se o uso exclusivo de caminhões (3,5 toneladas de capacidade de carga) e estipulada que a distância a partir da ETE para destinação do lodo fosse de 10 quilômetros, no caso da viagem até o aterro sanitário, e 20 quilômetros, em se tratando da disposição em solo agrícola.

2.4. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

Na **Tabela 1**, são apresentadas as categorias de impactos consideradas, e na **Figura 2**, são apresentados os impactos ambientais potenciais relacionados às ETEs, considerando as diferentes rotas de gerenciamento para o lodo e o biogás.

Tabela 1 - Categorias de impacto consideradas.

Impacto	Sigla	Unidade referência
Mudanças climáticas	MC	kg de CO_2 eq.
Depleção da camada de ozônio	DCO	kg de CFC-11 eq.
Acidificação terrestre	AT	kg de SO_2 eq.
Eutrofização de água doce	EUT	kg de P eq.
Toxicidade humana	TH	kg de 1,4-DB eq.
Formação de oxidantes fotoquímicos	FOF	kg de NMVOC eq.
Ecotoxicidade terrestre	ECT	kg de 1,4-DB eq.
Ecotoxicidade de água doce	ECA	kg de 1,4-DB eq.
Demanda acumulada de energia	CED	MJ eq.
Formação de Particulados Finos	FPF	kg PM _{2,5} eq.

Legenda: CFC - Clorofluorcarboneto; CO_2 - Dióxido de carbono; SO_2 - Dióxido de enxofre; P - Fósforo; DB - DB Toxicológico; NMVOC - do inglês, *Non-methane volatile organic compounds*; MJ - Mega Joule; PM_{2,5} - Material particulado fino com 2,5 microns ou menos de diâmetro.

No geral, é possível inferir que a rota *flare+aterro* (colunas 1 e 3, na Figura 1) causa maiores impactos (piores resultados) comparativamente à rota *caldeira+bio sólido* (colunas 2 e 4, na Figura 1), independentemente do sistema de tratamento de esgoto adotado, com exceção dos impactos depleção de camada de ozônio, ecotoxicidade aquática e eutrofização. A rota *caldeira+bio sólido* apresenta exclusivamente impactos ambientais positivos para toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre e, também, para a demanda acumulada de energia em ambas as ETEs.

A rota de gerenciamento dos subprodutos não influenciou o impacto referente à eutrofização de água doce. Comparativamente, o sistema UASB+SAC apresentou menor potencial para este impacto por apresentar maior eficiência no tratamento de esgoto.

Os impactos do aterramento do lodo se mostraram como o principal ponto de atenção em todas as categorias do cenário *flare+aterro*. Sendo assim, em categorias como depleção de camada de ozônio, formação de oxidantes fotoquímicos e demanda acumulada de energia, o sistema UASB+FBP tem mais impactos associados devido à maior produção de lodo nesse sistema, se comparado com o sistema UASB+SAC. O transporte do lodo até o aterro sanitário se mostrou como grande ponto de atenção em categorias como depleção de camada de ozônio e demanda acumulada de energia, o que ressalta a importância de tratar localmente os subprodutos, reduzindo ao máximo essa etapa. As emissões fugitivas de biogás no aterro é o principal ponto em acidificação terrestre.

Já para a rota *caldeira+bio sólido*, que representa o melhor cenário, é possível perceber que os impactos positivos da utilização do calor na caldeira e, sobretudo, da substituição do bio sólido acarretaram impactos abaixo de zero, isto é, benefícios para o meio ambiente em termos de toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre e demanda acumulada de energia. Os resultados indicam que, em se tratando de investimentos em ETEs simplificadas, esforços para a produção sustentável de bio sólido podem trazer mais benefícios ambientais do que investimentos em produção de energia.

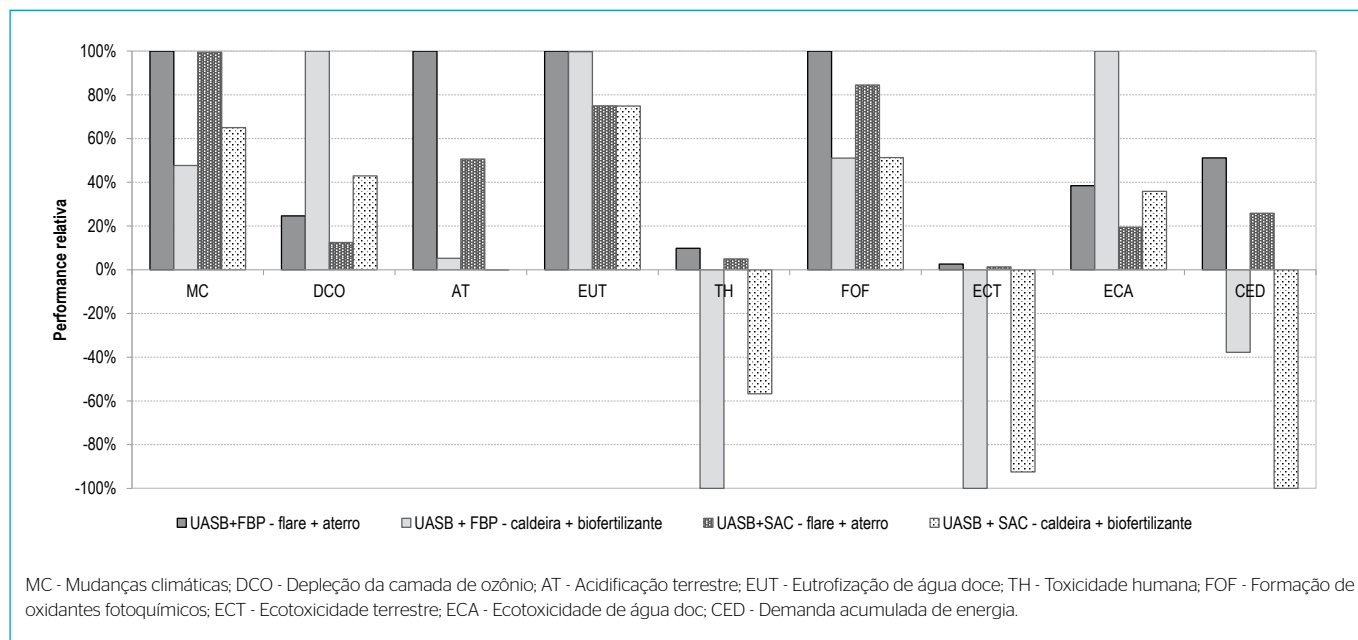


Figura 2 – Impactos ambientais relacionados às ETEs em função das rotas de gerenciamento dos subprodutos lodo e biogás.

Na rota *caldeira+biossólido*, o grande ponto de atenção é a utilização da cal virgem para a higienização do lodo, que foi associada a grandes potenciais de impactos nas categorias mudanças climáticas, depleção de camada de ozônio, formação de oxidantes fotoquímicos e ecotoxicidade de água doce. Em categorias como a ecotoxicidade de água doce, as contribuições relacionadas à cal virgem foram aproximadamente 150% maiores que o benefício advindo pelo uso do biossólido na agricultura. Neste caso, os impactos potenciais associados ao consumo de produtos para a higienização do lodo superam os bônus associados à utilização do lodo higienizado.

De forma geral, percebe-se que, apesar do ganho em se usar a rota *caldeira+biossólido* em termos de minimização dos impactos, outras formas de higienização deveriam ser avaliadas, visto à expressiva contribuição da cal virgem utilizada sob esses resultados. Na **Figura 3**, são apresentados os impactos ambientais relacionados à produção de cal virgem e calcário (considerando uma massa equivalente). É possível perceber que mesmo com a inclusão do calcário como um produto evitado da rota *caldeira+biossólido*, este não é suficiente para anular os efeitos negativos advindos da produção da cal virgem, dadas as expressivas diferenças nos potenciais de impacto entre os dois produtos.

3. APLICAÇÃO DE ACV EM ETE DE GRANDE PORTE COM FOCO NA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Como visto na análise dos resultados do item 2, o gerenciamento dos subprodutos de uma ETE pode afetar de maneira importante os impactos ambientais potenciais. Na simulação das ETEs simplificadas, de pequeno porte, os ganhos energéticos do aproveitamento do biogás foram, no geral, menos impactantes se comparados com os benefícios potenciais de se aproveitar o lodo. Projetos de aproveitamento do biogás para geração de eletricidade se tornam mais atraentes quando a população atendida é superior a 200.000 habitantes, sendo este limite menor quando é possível o aproveitamento do calor ou quando são utilizados processos anaeróbios para o tratamento de esgoto (ZANETTE, 2009).

Este estudo de caso avaliou, por meio da ACV, o efeito da implantação de uma estação termoeletrica (ET) para geração de eletricidade e calor (cogeração) em uma ETE de grande porte do tipo lodos ativados convencional. Foram comparados três cenários, sendo estes a queima em *flare* e dois cenários com aproveitamento energético a fim de verificar os ganhos ambientais da implantação do sistema.

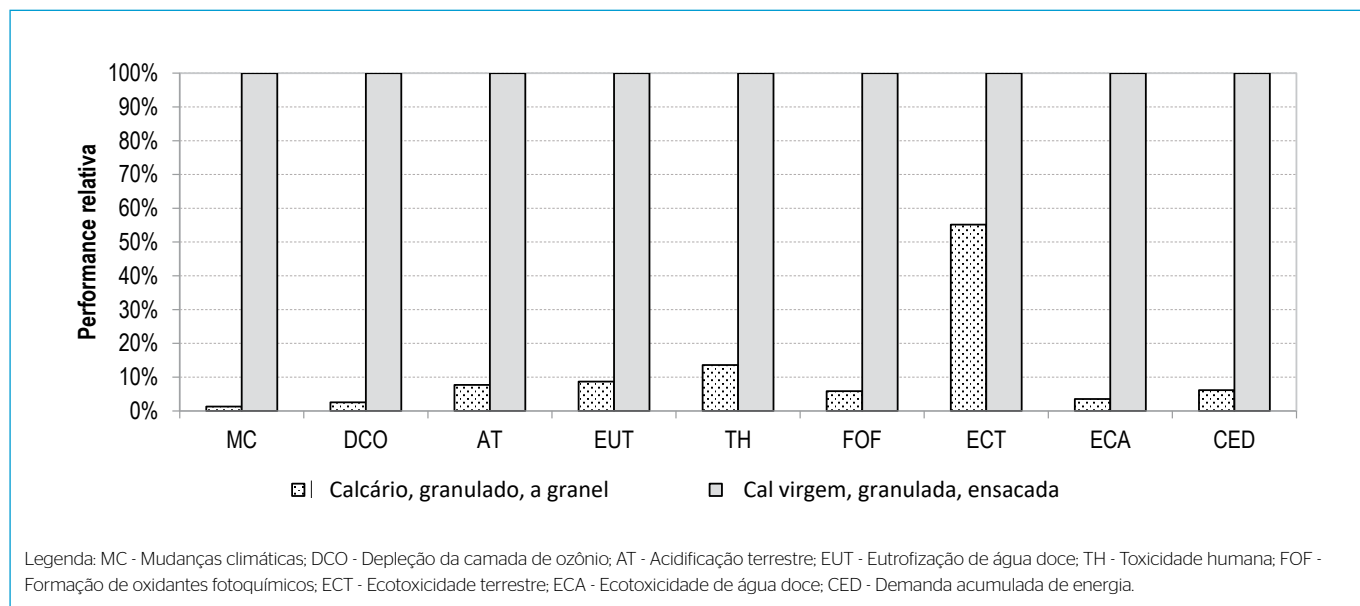


Figura 3 - Impactos ambientais relacionados ao calcário e à cal virgem, considerando massas de produto equivalentes.

3.1. Caracterização dos estudos de casos

A ETE em questão se localiza na região sudeste do Brasil e é considerada uma das maiores plantas de tratamento da modalidade lodos ativados convencional do país, ocupando uma área aproximada de 64 hectares. No período analisado, a população contribuinte média calculada foi de cerca de 785.000 pessoas, com um volume tratado diário aproximado de 157.000 m³ de esgoto ou 1,82 m³.s⁻¹.

As unidades que compõem o tratamento da fase sólida incluem adensadores, digestores anaeróbios e desidratação mecânica por centrífugas (com a adição de polímeros catiônicos). Nos digestores de lodo ocorrem reações anaeróbias, com produção de biogás rico em metano (aproximadamente 67% de CH₄ no biogás). Este biogás era direcionado para queima em *flare* antes da implantação do sistema de cogeração, porém, com a estação termoeletrica, o biogás era destinado a gasômetros. O armazenamento e posterior envio do biogás às microturbinas visam à produção de energia elétrica e calor. Parte do calor produzido pelo gás de escape das microturbinas era destinado ao aquecimento dos digestores de lodo (de 30°C para 36°C), visando o aumento da eficiência da reação anaeróbia. A energia elétrica era destinada ao uso na própria planta.

Foi denominado *cenário base* a situação que representa a condição da ETE com queima de biogás em *flare*.

O *cenário com cogeração* retrata a condição da ETE com uso do biogás para produção de energia elétrica (consumo integral) e térmica (uso parcial). A partir da verificação da perda de energia térmica e em busca de ampliar a discussão sobre as possibilidades de ganhos relacionados à implantação da cogeração na ETE, decidiu-se também pela avaliação de um terceiro cenário, no qual a energia excedente fosse utilizada para secagem térmica do lodo, denominado *cenário cogeração com aproveitamento térmico de 100%*.

Nos três cenários, os dados utilizados são referentes ao ano de 2009.

3.2. Inventário de ciclo de vida (ICV)

Os dados de produção e de caracterização foram considerados os mesmos para os três cenários. Dessa forma, foi possível o isolamento das modificações para uma análise legítima dos impactos advindos pela implantação da cogeração. Na análise foi considerada apenas a fase de operação da ETE, visto que as etapas de coleta e transporte do esgoto, implantação e descomissionamento da estação têm se mostrado insignificantes, principalmente em termos de consumo de energia, por diversos autores quando comparadas à fase de operação da planta de tratamento (ZHANG e WILSON, 2000; GÜERCA *et al.*, 2011).

A caracterização do esgoto tratado lançado no curso d'água foi fornecida pela companhia de saneamento, sendo igual para os três cenários. Para a produção de lodo e biogás e emissões relacionadas às queimas, foram utilizados dados da literatura (RIBEIRO *et al.*, 2013; BEYLOT *et al.*, 2013). Já para o fluxo de energia, foi contabilizado o consumo total com base nas faturas de consumo energético, resultando em $0,18 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de esgoto ou $13,14 \text{ kWh}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. Segundo Marques *et al.* (2012), a estação termoeletrica instalada tem eficiência aproximada de 93%. Considerou-se que a eficiência total de geração de energia na ETE seja de 68%, sendo 28% relativos à conversão em energia elétrica e 40% em energia térmica.

Para o aproveitamento da energia térmica excedente – *cenário cogeração com aproveitamento térmico de 100%*, considerou-se a secagem térmica do lodo após a sua saída da centrífuga. Utilizou-se, por conservadorismo, o dobro da energia demandada para evaporação de 1 kg de água presente no lodo baseada na indicação de Andreoli *et al.* (2001), sendo $5.488 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ água evaporada.

3.3. Avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV)

A AICV foi realizada inserindo os dados do ICV no *software* SimaPro. O método escolhido foi o ReCiPe, trazendo as mesmas categorias de impacto da Tabela 1. Na **Figura 4**, é possível ver os resultados comparativos dos cenários. Estes são gerados de maneira relativa, isto é, o pior cenário naquela categoria possui 100% dos impactos e os outros são apresentados comparativamente a este.

Analisando a Figura 4, podemos dizer que o cenário *base* (queima de biogás em *flare*) apresenta pior desempenho em todas as categorias de impacto analisadas, sendo responsável por 100% do potencial de cada impacto conferido à operação da ETE. Ao analisar este cenário mais detalhadamente, percebeu-se que o reator biológico e o *flare* figuram como os grandes contribuintes para a maioria dos impactos, devido ao consumo de energia e emissões atmosféricas, respectivamente.

O cenário *cogeração com aproveitamento térmico de 100%* apresenta impactos ambientais positivos nas categorias depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre; ecotoxicidade de água doce e demanda acumulada de energia.

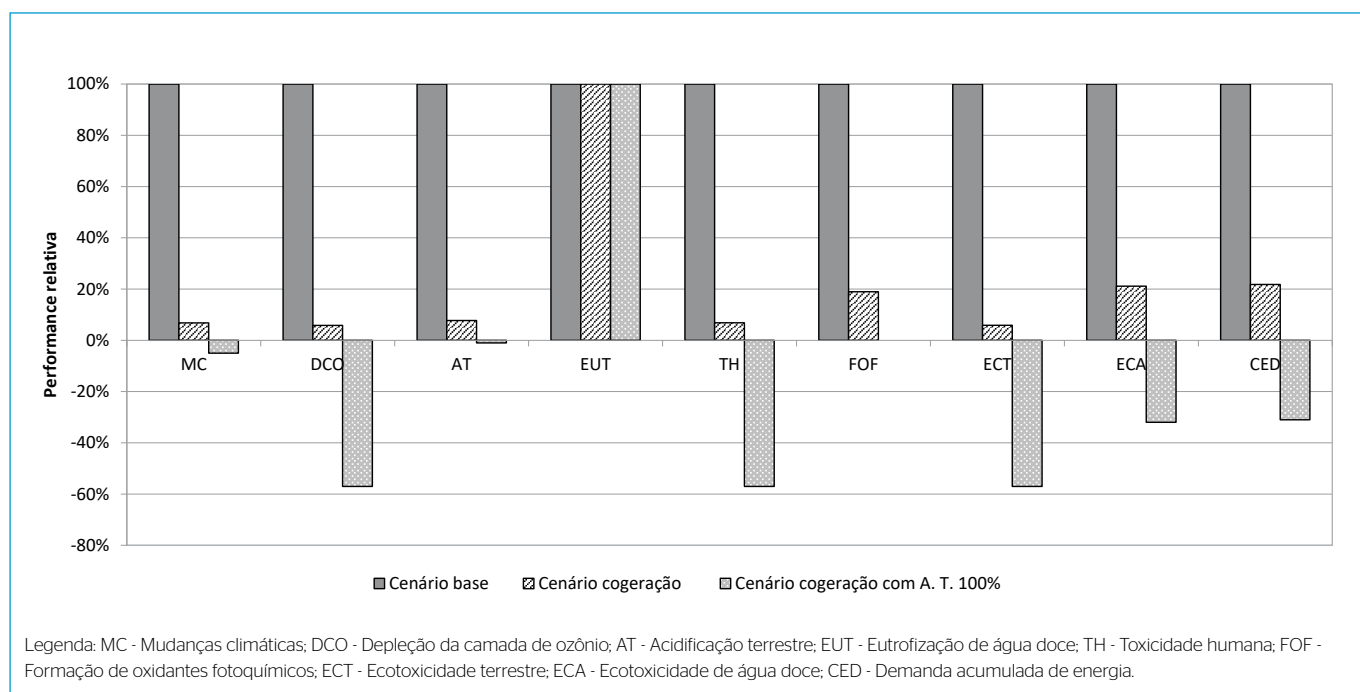


Figura 4 - Impactos relacionados à operação da ETE em função dos cenários analisados - sem considerar a destinação do lodo produzido.

Esses impactos são diretamente relacionados ao consumo de energia e evidenciam a importância do gerenciamento da energia produzida na ETE para expressão máxima em termos de melhoria na sustentabilidade ambiental.

Tal como nos resultados do item 2, a categoria de eutrofização, que é relacionado apenas às emissões diretas (esgoto) na água doce, não apresenta diferença entre os cenários já que estes não influenciam na qualidade do esgoto tratado pela ETE.

Estes resultados representam, como já mencionado, um recorte na etapa de operação da ETE (*cradle-to-gate*) e simulam uma situação hipotética onde não há gerenciamento do lodo produzido. Apesar da eficiente percepção oferecida pelas análises anteriores, frisa-se que somente a operação da planta de tratamento não representa os potenciais de impacto ambiental das unidades de tratamento de esgoto, já que o gerenciamento do lodo sabidamente contribui para estes substancialmente, com emissões relacionadas, principalmente, ao transporte desse subproduto até o destino final (aterro sanitário, na maioria das vezes) e aos gases oriundos de sua decomposição após destinação.

4. APLICAÇÃO DA ACV PARA A COMPARAÇÃO DE POSSÍVEIS FLUXOGRAMAS PARA O TRATAMENTO TERCIÁRIO DO ESGOTO SANITÁRIO

Dentre as formas de poluição causadas pelo lançamento de esgoto sanitário em cursos d'água destaca-se a desoxigenação, causada, sobretudo, pelo consumo de oxigênio por parte das bactérias para degradação da matéria orgânica. O tratamento de esgoto no Brasil é mantido em sua maioria em nível secundário, de modo a acelerar os mecanismos de degradação biológica que ocorrem naturalmente nos corpos receptores a fim de remover matéria orgânica e evitar a desoxigenação. Dentre os sistemas mais utilizados na América Latina e Caribe, destacam-se as lagoas de estabilização, lodos ativados e os reatores UASB (NOYOLA *et al.*, 2012).

No Brasil, a destinação mais comum para o efluente tratado é o lançamento em curso d'água. Todavia, considerando ainda os altos teores de nutrientes, existe um movimento para o aproveitamento em áreas agrícolas.

Considera-se também a possibilidade de implantação do tratamento terciário, objetivando a remoção de poluentes específicos, ou ainda a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário, sobretudo nutrientes como nitrogênio e fósforo. Além da desoxigenação, o aporte de nutrientes em cursos d'água pode ocasionar o fenômeno da eutrofização. Entretanto, as tecnologias de tratamento terciário ainda têm sido pouco aplicadas, principalmente em razão dos elevados custos de implantação e operação.

Este estudo objetiva a comparação de vários cenários de tratamento terciário e destinação final do efluente tratado de uma ETE localizada no sudeste de Brasil.

4.1. Caracterização do estudo de caso

Neste trabalho, foram analisadas diferentes destinações para o efluente tratado de uma ETE composta de reatores UASB combinados a FBP, com capacidade de atendimento aproximado de 330 mil habitantes. Esta ETE se encontra inserida no meio urbano, impactando, dessa forma, diretamente na qualidade de vida das comunidades do entorno. Os dados relacionados à vazão de efluente e outros dados da operação da ETE foram fornecidos pela própria administração.

Dentre os sistemas estudados para pós-tratamento (tratamento terciário) do efluente estão: (i) cloração; (ii) filtro de superfície combinado com luz ultravioleta; (iii) ultrafiltração combinado com tratamento fotoquímico utilizando $FeCl_2$; e (iv) processo Ludzack-Ettinger Modificado (MLE) combinado com uma separação com membrana imersa em um biorreator de membrana (MBR) e precipitação físico-química do fósforo e fertirrigação. As alternativas de tratamento foram escolhidas visando o atendimento aos padrões de qualidade de curso d'água classe 3 descritos Deliberação Normativa Conjunta do Conselho de Proteção Ambiental (COPAM) e Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) nº 01/2008 do estado de Minas Gerais (COPAM/CERH, 2008). A composição de todos os cenários de pós-tratamento do efluente considerou como etapa comum o sistema UASB+FBP em funcionamento na ETE e suas emissões relacionadas. Dessa forma, foi modelada apenas a etapa de operação, desconsiderando, portanto, a

construção e descomissionamento das unidades e a coleta e transporte de esgoto até a estação, já que independentemente dos cenários avaliados, a estrutura básica não sofreria alterações. Em todos os cenários, o lodo produzido no tratamento secundário é enviado para um aterro sanitário.

Para fins de comparação, também foram incluídos na análise dois cenários de lançamento do efluente no curso d'água sem pós-tratamento: (i) cenário considerando as eficiências de remoção atuais da ETE; (ii) cenário utilizando as eficiências de literatura para o sistema UASB+FBP, que correspondem ao funcionamento típico do sistema. Por fim, também foram modelados cenários com fertirrigação, com e sem bombeamento, que é uma opção viável dada as características regionais da área onde a ETE se encontra instalada e operando. O fluxograma dos cenários considerados está apresentado na **Figura 5**.

4.2. Inventário de ciclo de vida (ICV)

Para cada uma das alternativas foi levantado o consumo energético, o consumo de reagente, o consumo de material para confecção das membranas e os filtros e lâmpadas de acordo com a vida útil média de cada um (segundo dados de literatura). Considerou-se a destinação do lodo produzido para um aterro sanitário localizado a 30 km da

ETE e este deslocamento foi incluído no sistema de acordo com a metodologia descrita em Gutierrez *et al.* (2019).

Para os cenários sem pós-tratamento foram utilizados dados fornecidos pela companhia de saneamento para modelar o cenário atual e as eficiências de remoção referem-se ao preconizado em von Sperling (2014) para o cenário típico. Entendendo que o aproveitamento agrícola do efluente substitui, total ou parcialmente, a utilização do fertilizante químico, os fertilizantes fosfatados e nitrogenados foram adicionados ao sistema como “produtos evitados” e contabilizados como créditos. Neste caso, foram consideradas três possibilidades: o transporte do efluente à área agrícola por gravidade, por bombeamento vencendo a pressão de 30 m.c.a e 50 m.c.a.

De maneira geral, os processos MLE+MBR+fotocímico e ultrafiltração+remoção físico-química de fósforo foram os mais sofisticados entre eles, com a demanda do polímero $FeCl_2$, maior consumo de energia para tratamento e maior produção de lodo, embora produza o efluente de melhor qualidade, pois remove nutrientes, sólidos e coliformes. A filtração+UV remove apenas sólidos e coliformes, e inclui a demanda do filtro de *nylon*, da lâmpada UV, a demanda de energia e produção de lodo. Já a cloração demanda apenas o reagente Cl_2 gasoso.

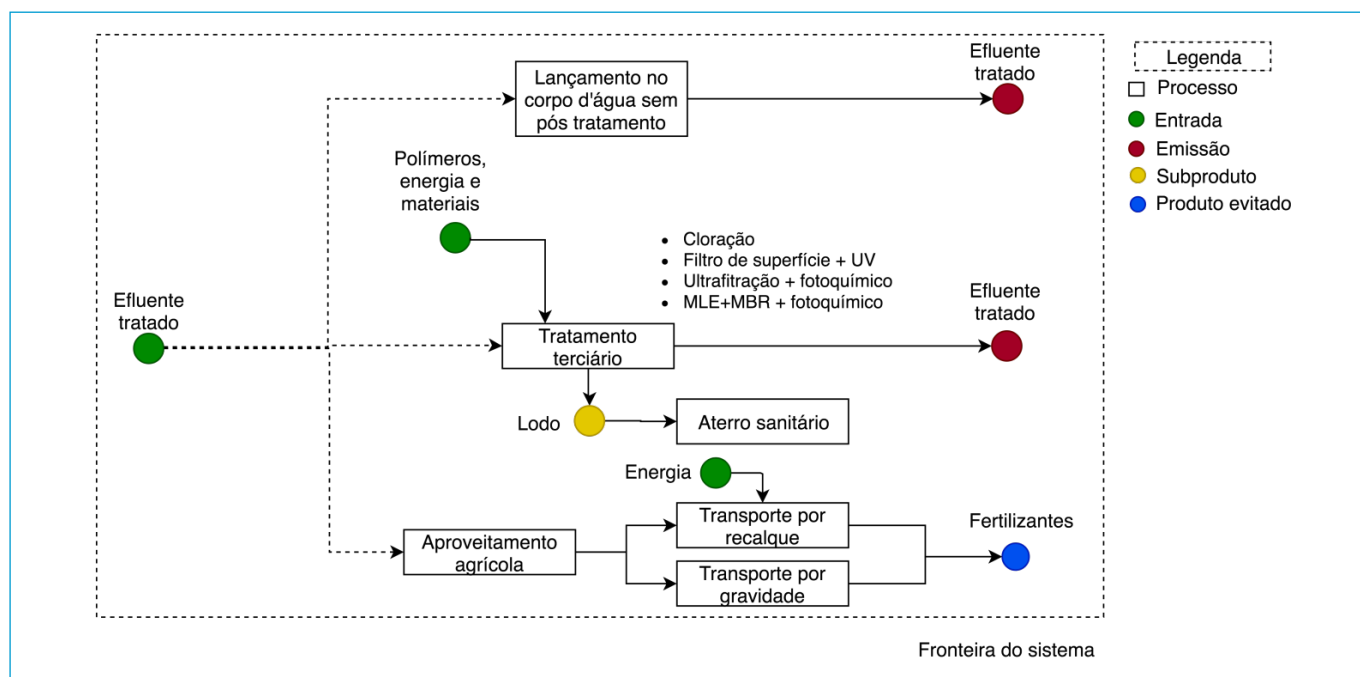


Figura 5 - Fluxograma dos pós-tratamento e destinações do efluente da ETE.

4.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

A AICV foi realizada inserindo os dados do ICV no *software* SimaPro. O método escolhido foi o ReCiPe 2016 e foram escolhidas categorias que, segundo a equipe envolvida na realização do trabalho, melhor traduziriam os impactos potenciais da ETE, considerando-se, especialmente, que esta se encontra em meio urbano, sendo: mudanças climáticas, formação de particulados finos, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, ecotoxicidade terrestre e aquática.

Na **Figura 6**, é possível visualizar os resultados comparativos dos cenários. Os resultados percentuais de potencial de impactos são gerados de maneira relativa, isto é, o pior cenário em uma categoria específica apresenta 100% dos impactos e os outros são apresentados comparativamente a este.

Ao analisar a Figura 6, é possível perceber que o aproveitamento agrícola do efluente corresponde ao melhor cenário em todas as categorias. Isso se dá, sobretudo, porque a utilização agrícola evita o emprego de fertilizantes

químicos gerando créditos ao sistema. Mesmo quando o aproveitamento é feito por recalque, em que a energia elétrica é demandada para bombeamento, o cenário continua vantajoso frente às alternativas, pois os créditos do fertilizante se mostram mais representativos que o ônus causado pelo consumo de energia. O cenário MLE+MBR, que tem a maior demanda de energia e a maior produção de lodo associada dentre os cenários avaliados, corresponde ao pior cenário em todas as categorias, com exceção para a eutrofização.

Ainda em se tratando de eutrofização, nota-se que os dois sistemas de tratamento de efluentes mais impactantes nas outras categorias, ultrafiltração e MLE+MBR, apresentam resultado inverso para essa categoria, já que a eutrofização é influenciada exclusivamente pelas emissões de compostos fosfóricos para o curso d'água. Os efluentes sem pós-tratamento e todos os tratamentos terciários com menor (ou ausência) de remoção de fósforo apresentaram potenciais de impacto máximos (100%), enquanto ultrafiltração e MLE+MBR, que possuem emissões

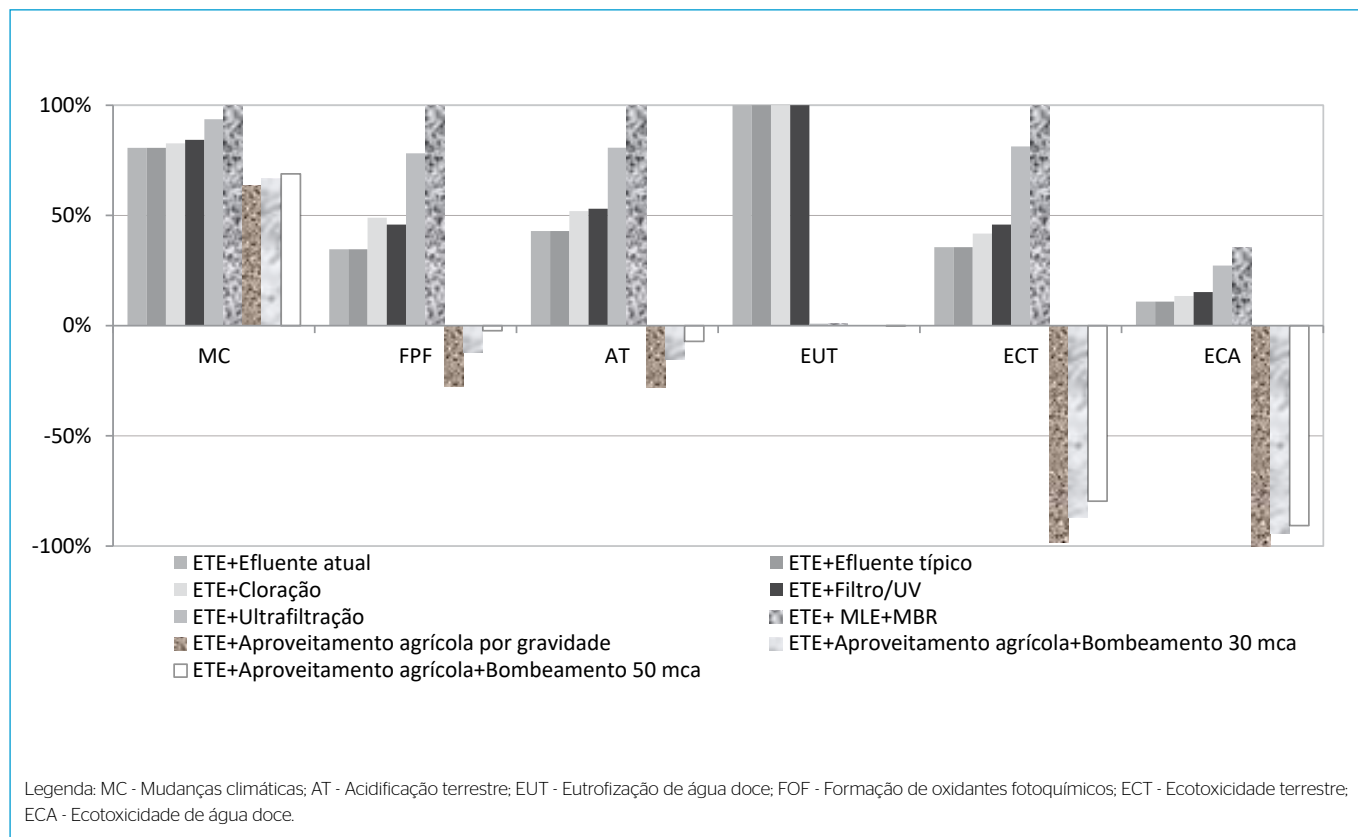


Figura 6 - Potenciais de impactos ambientais relacionados às destinações do efluente tratado.

substancialmente menores, aparecem com potenciais de impacto mínimos.

É importante ressaltar que tratamentos voltados para a remoção de coliformes termotolerantes, como cloração e a desinfecção com UV, não possuem suas principais vantagens consideradas, uma vez que nenhum dos modelos disponíveis no SimaPro considera a concentração de patógenos em suas categorias de impacto. Para a cloração, tem-se ainda o residual de hipoclorito no efluente. Apesar das características tóxicas desse composto, este também não é contemplado nas categorias de ecotoxicidade, o que constitui uma limitação do modelo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ACV das ETEs avaliadas nos estudos permitiu a quantificação e comparação das cargas ambientais de cada uma das destinações estudadas. Devido à falta de informações específicas, muitos dados que constam nos inventários foram calculados e estimados com base em dados de literatura ou de outras ETEs cujos sistemas de tratamento eram semelhantes. A utilização de dados primários, sobretudo no tocante ao aproveitamento e consumo de energia, emissões atmosféricas, além da definição de uma área específica para o aproveitamento agrícola do efluente e do lodo aumentariam a assertividade das análises e representatividade dos resultados.

O primeiro estudo avaliou dois sistemas de tratamento diferentes, UASB+FBP e UASB+SAC, sendo possível a comparação dos impactos ambientais potenciais de diferentes tecnologias. Embora esses sistemas se diferenciem no tocante às emissões atmosféricas e qualidade do efluente, essas diferenças empalidecem quando levamos em consideração as rotas de destinação dos subprodutos. No geral, UASB+SAC obteve resultados melhores nos impactos ambientais que se relacionam à emissão de gases para a atmosfera pelo consumo de materiais fósseis (combustível) ou pela queima do biogás.

Em se tratando do lodo, o primeiro estudo de caso analisou duas possíveis destinações: aterro sanitário e aproveitamento agrícola. O aterro sanitário foi associado a grandes potenciais de impacto, configurando o principal ponto de atenção daquele cenário, o que chama atenção

para as consequências ambientais alarmantes desta destinação, que ainda é a destinação mais comum de lodos de esgoto no Brasil. Já o aproveitamento agrícola trouxe muitos bônus para o sistema ao evitar a produção e utilização do fertilizante químico. Todavia, a forma de higienização, utilizando cal virgem, se revelou um grande ponto de atenção para esta rota.

O produto biogás foi tratado nos dois primeiros estudos, utilizando ETEs de diferentes portes. Em ambos os casos, as destinações alternativas à queima em *flare* auxiliaram na redução dos impactos em todas as categorias analisadas. Nos sistemas simplificados, a utilização da energia da queima de biogás em uma caldeira foi associada a impactos positivos, embora menos representativos que os bônus do aproveitamento do lodo. Para a ETE de grande porte, foi confirmada a hipótese de que o uso do biogás diminui os potenciais de impacto ambiental da estação, sendo constatada melhoria em todas as categorias avaliadas após a implantação da cogeração.

No tocante ao efluente, a sua qualidade afeta exclusivamente o impacto ambiental eutrofização de água doce, evidenciando a carência de inclusão de novos aspectos ambientais para legitimação das avaliações de impacto ambiental relacionados aos sistemas de tratamento de esgoto doméstico. O terceiro estudo de caso analisou algumas tecnologias de pós-tratamento de efluente, e os resultados mostram que a produção de um efluente com menor potencial de eutrofização implica na seleção de uma tecnologia de tratamento com maiores potenciais de impacto nas outras categorias avaliadas. No entanto, é importante ressaltar que o método ReCiPe não considera os benefícios de desinfecção em nenhuma categoria de impacto, sendo necessária a consideração desse ponto de maneira independente do resultado da ACV.

A partir dos estudos de caso apresentados, fica claro que os impactos ambientais das ETEs devem ser ponderados a partir de uma visão holística, e as perdas e ganhos nas diferentes categorias de impacto devem ser avaliados no momento de tomada de decisão, considerando, especialmente, as características locais da área de instalação do sistema de tratamento.

Também há de se manter cautela em relação às limitações inerentes à própria metodologia, como discutido brevemente no texto, especialmente no tocante aos bancos de dados e métodos de análises

No entanto, a avaliação ambiental proporcionada pela ACV tem o potencial de figurar como uma importante base de discussão para a adoção de tecnologias de tratamento e rotas de destinação dos subprodutos, em conjunto com as análises de viabilidade, econômica e social.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14.040. Gestão ambiental*: ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14.040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a. 10 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14.044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b. 46 p.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S., GONÇALVES, D. F. Processo de implementação da reciclagem agrícola de biossólido em Curitiba, Paraná. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013Porto Alegre, Brasil.
- ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)
- BEYLOT, A.; VILLENEUVE, J.; BELLENFANT, G. Life Cycle Assessment of landfill biogas management: sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste management*, v. 33, n. 2, p. 401-11, 2013.
- CHERNICHARO, C.A.L. (coordenador). *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), 2001. 544 p.
- COPAM/CERH-MG. Conselho estadual de Política Ambiental e Conselho Estadual de Recursos Hídricos. *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH MG nº 01, de 05 de maio de 2008*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. FUCHS, V. J.; MIHELICIC, J. R.; GIERKE, J. S. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. *Water Research*, v. 45, n. 5, p. 2073-81, 2011.
- GÜERCA, L. P.; MUSHARRAFIE, A.; MARTÍNEZ, E.; HERNÁNDEZ, F.; PADILLA, A.; ROMERO-CASALLAS, L.; CISNEROS-ORTIZ, M.; MORGAN-SAGASTUME, J. M., NOYOLA, A. Life cycle inventory of the most representative municipal wastewater treatment technologies of Latin-America and the Caribbean. In: *XIV IWRA World Water Congress*, 2011, Porto de Galinhas, Brasil. *Proceedings*. Porto de Galinhas, Brasil: IWRA, 2011.
- GUTIERREZ, K. G.; FERNANDES, M. A. O.; CHERNICHARO, C. A. L. Modelling of a sanitary landfill for developing countries to improve the reliability of Life Cycle Assessment studies. *IOP Conference Series. Earth and environmental science (online)*, v. 323, p. 012085, 2019.
- ITRC. Interstate Technology e Regulatory Council. *Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands*. New Jersey: ITRC, 2003. 199 p.
- MARQUES, E. V.; AZEVEDO, S. G.; SOUZA, D. F. P. Estudo do desempenho do processo de digestão de lodos em digestores anaeróbios após implantação da unidade de cogeração de energia na ETE Arrudas. In: *Encontro Técnico Copasa 2012*, Belo Horizonte, Brasil.

NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. L.; GUERECA, L. P.; HERNANDEZ-PADILLA, F. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 926-932, 2012.

OLIVEIRA, S.M.A.C. *Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos*. 2006. 231 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PONTES, P.P. *Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador*. 2003. 198 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003

RIBEIRO, R.; MELLO, W. DE; ALVIM, R. Emissões de óxido nitroso do tanque de aeração de uma estação de tratamento de esgotos com sistema de lodos ativados convencional. *Química Nova*, v. 36, n. 7, p. 998-1003, 2013.

ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; LOBATO, L. C. S.; SILVA, R. V.; PADILHA, R. F.; BORGES, J. M. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. *Renewable Energy*, v. 124, p. 21-26, 2018.

ROSA, A. P. *Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto*. 2013. 172f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. *Methodological "Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane"*. [s.l.] [s.d]. 14p.

von SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 472 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 1)

ZANETTE, A. L. *Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil*. 2009. 97f. Dissertação (Mestrado). Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZHANG, Z.; WILSON, F. Life-Cycle Assessment of a Sewage-Treatment Plant in South-East Asia. *Water and Environment Journal*, v. 14, p. 51-56, 2000.