

Caracterização físico-química, microbiológica e poder calorífico de lodo originário de efluente suíno

Physical, chemical, microbiological and calorific characterization of slug derived from swine effluent

Giovanni Fatobene¹, Ana Carolina Silva Vaz Curado de Aguiar², Letícia Costa Alves¹, Ricardo Augusto Rodrigues³, Renan Felício dos Reis⁴, Francisco Rafael Martins Soto⁴

RESUMO: Um dos principais contrapontos em relação às metodologias de tratamento de efluentes está relacionada à sua elevada produção de lodo, que por sua vez pode ser um produto de valor agregado, podendo ser utilizado como biofertilizante e matéria orgânica com poder calorífico relevante. Este trabalho teve por objetivo avaliar os parâmetros físico-químicos e microbiológicos do lodo originário da biodigestão anaeróbia do efluente suíno (ES), proveniente de uma granja de suínos tecnificada de ciclo completo. Foram coletadas 40 amostras de lodo num período de 30 dias, e as amostras foram avaliadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - São Roque (IFSP-SRQ) e na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Foram analisados os parâmetros físico-químicos de pH, sólidos totais, fixos e voláteis (ST, SF e SV), nitrogênio total (NT), fósforo total (PT) e relação Carbono/Nitrogênio (RCN), parâmetros microbiológicos de coliformes totais e termotolerantes (CT e TT) e Poder Calorífico superior do lodo (PCS). Os resultados revelaram que o pH se manteve na faixa da alcalinidade variando entre 8,16 e 8,3, os ST variaram entre 21,12% e 44,91%, os SF entre 41,93% e 71,92%, já os SV variaram de 28,08% a 54,07%, o NT variou entre 0,49 mg/g e 1,1mg/g, PT entre 0,47mg/g e 0,7mg/g, a RCN (expressa em porcentagem) entre 26,9 e 42,04, mostrando potencial do lodo para ser utilizado como biofertilizante. O PCS do lodo variou entre 6,919 MJ/kg_{ST} quando em menor granulometria e 11,663 MJ/kg_{ST} em maior granulometria, apresentando potencial para ser utilizado como biomassa energética, a exemplo de lodos de outras origens. Em relação aos TT, foram detectadas contagens baixas destes micro-organismos, sendo, dessa forma, um resultado positivo do ponto de vista sanitário.

Palavras-chave: Biodigestão anaeróbia. Energia. Suinocultura.

ABSTRACT: One of the main counterpoints in effluent treatment methodologies is related to its high slug production rates. However, it may be a value-added product since it may be used as biofertilizer and organic matter with relevant calorific rates. Current study evaluates the physical, chemical and microbiological parameters of slug derived from swine effluent (SE) anaerobic biodigestion from a full-cycle technical pig farm. Forty slug samples were collected in a 30-day period, and the samples were evaluated at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - São Roque (IFSP-SRQ) and at the Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). The physical and chemical parameters of pH, total, fixed and volatile solids (TS, FS and VS), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and Carbon/Nitrogen (C/N) ratio, microbiological parameters of total and thermotolerant coliforms (TC and TT) and high calorific power of slug (PCS) were analyzed. Results showed pH remained within alkalinity, ranging between 8.16 and 8.3; ST varied between 21.12% and 44.91%; FS varied between 41.93% and 71.92%; SV ranged between 28.08% and 54.07%; TN varied between 0.49 mg/g and 1.1mg/g; TP varied between 0.47 mg/g and 0.7mg/g, C/N (percentage) varied between 26.9 and 42.04, revealing the slug's potential as a biofertilizer. PCS of the slug varied between 6,919 MJ/kg_{ST} when at a lower granulometry and 11,663 MJ/kg_{ST} at higher granulometry. The above revealed a capacity for energy biomass, similar to slugs from different derivations. In the case of TT, low counts of these microorganisms were detected and, consequently, a positive result from the sanitary point of view.

Keywords: Anaerobic biodigestion. Energy. Swine-breeding.

Autor correspondente:

Giovanni Fatobene: giovanni.fatobene10@gmail.com

Recebido em: 25/11/2019

Aceito em: 21/09/2020

INTRODUÇÃO

O agronegócio vem desempenhando um papel importante na economia brasileira, sendo responsável por geração de riqueza uma vez que se encontra uma crescente demanda relacionada ao fornecimento de proteína com

¹ Tecnólogos em Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP-SRQ), Câmpus São Roque (SP), Brasil.

² Graduanda em Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife (PE), Brasil.

³ Técnico Laboratorial do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP-SRQ), Câmpus São Roque (SP), Brasil.

⁴ Docentes permanente no Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP-SRQ), Câmpus São Roque (SP), Brasil.

alto valor nutricional, além de ser uma atividade rentável, visto que seus resíduos podem gerar produtos de valor agregado, o que potencializa ainda mais a ascensão deste mercado em constante crescimento (GOMES *et al.*, 2009).

A suinocultura é um dos setores da agropecuária brasileira que apresenta maior crescimento, uma vez que pode ser desenvolvida em pequenas propriedades rurais e em áreas com limitações topográficas (MEDRI; MEDRI, 2004). Quando observados os maiores produtores de carne suína no mundo têm-se a China com 54 milhões de toneladas, a União Europeia com 23 milhões, e os Estados Unidos com 11 milhões de toneladas seguidos pelo Brasil, como os quatro maiores produtores (MARÇAL *et al.*, 2016).

A atividade suinícola destaca-se principalmente por seu alto nível de qualidade técnica e elevado padrão de produtividade (TONIAZZO *et al.*, 2018). Com o uso de técnicas intensivas na suinocultura, é possível observar grande concentração populacional de animais em espaços reduzidos, acarretando assim o acúmulo de efluente suíno (ES) (DA SILVA *et al.*, 2019). Desse modo, considera-se a criação de suínos como de significativo impacto ambiental, uma vez que é tida pelos órgãos de controle como uma atividade com elevado potencial de poluição ambiental (BÜHRING; SILVEIRA, 2016).

O manejo inadequado do ES é um tema que tem ganhado cada vez mais relevância no cenário nacional devido ao aumento de exigências mundiais para o melhoramento dos padrões de qualidade da carne, bem como atenção à questão da qualidade ambiental (CARDOSO *et al.*, 2015). Uma alternativa para esta problemática apresentada é a utilização do ES como fertilizante, que é uma técnica adotada por muitos produtores, devido ao seu elevado teor de nutrientes e matéria orgânica (COSTA; SOTO, 2018). Logo, considerando-se o modelo atual de criação de suínos e uma geração média de ES *per capita* de 7,0 a 8,0L/dia, o descarte do ES pode ser ambientalmente danoso, caso seja feito de maneira inadequada (BROETTO *et al.*, 2015).

Os ES são caracterizados por possuírem elevado teor de sólidos totais e matéria orgânica (normalmente mensurada por meio de análises de demanda bioquímica de oxigênio - DBO, e demanda química de oxigênio - DQO), assim como elevados níveis de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe) (SANTOS *et al.*, 2016). Destaca-se também que no ES certamente estão presentes diversos tipos de micro-organismos patogênicos, como bactérias, protozoários e vírus, que podem ter relevância em relação à saúde pública (DE LUCA *et al.*, 2017).

Um dos grandes desafios para a sustentabilidade da atividade suinícola no Brasil é a tecnificação do tratamento do ES, evitando, dessa forma, o lançamento *in natura* deste no meio ambiente, resultando em poluição de mananciais, solo e ar, comprometendo a qualidade de vida em regiões rurais e urbanas, e causando prejuízos à fauna e à flora (BARICHELLO *et al.*, 2015).

Uma vez que o uso da água é essencial nas etapas de atividade suinícola e resulta em grande quantidade de ES gerado, estes resíduos devem ser tratados antes de qualquer destinação ambiental, por exemplo lançamento em corpos hídricos (MATOS *et al.*, 2010; MARÇAL *et al.*, 2017). O ES, quando descartado *in natura* em corpos d'água, devido ao fenômeno natural de autodepuração, tende a iniciar brusca depleção de oxigênio dissolvido, desequilibrando o meio aquático e favorecendo a ocorrência da eutrofização (NOVAIS *et al.*, 2019).

São diversas as técnicas aplicadas no tratamento de ES. Uma das mais difundidas é a biodigestão anaeróbia, que consiste na interação complexa dos micro-organismos que degradam os diversos componentes presentes no ES e libera alguns gases que são produtos de reações bioquímicas, como o metano e o dióxido de carbono, considerados os principais (SCHWINGEL *et al.*, 2016). Entretanto, a biodigestão anaeróbia resulta em alta produção de resíduo oriundo do ES original, entre eles o lodo, que é dotado de grande potencial poluidor, principalmente por seu elevado teor de matéria orgânica e micro-organismos ativos, incluindo os patogênicos (ACHON *et al.*, 2019).

Os lodos podem ser divididos em categorias, entre elas o lodo digerido, do qual sofreu estabilização biológica de origem aeróbia ou anaeróbia, não apresenta odor ofensivo e possui coloração marrom escuro. Por sua vez não necessita uma etapa de digestão, por já estar digerido (ANDREOLI *et al.*, 2001). Uma das maiores preocupações com

o lodo está diretamente ligada à sua estabilização e umidade, em que se busca atingir um teor de sólidos totais entre 15% a 40%, facilitando dessa forma seu transporte por caminhões, entretanto sem nenhuma definição clara referente ao seu destino final (BRASIL, 2007).

O lodo de ES pode ser utilizado para a recuperação de áreas degradadas, sendo assim fonte de matéria orgânica apresentando resultados positivos sobre a reconstituição de fauna e flora, entretanto pode causar, se mal gerenciado, a contaminação de lençóis freáticos (KAMIMURA *et al.*, 2016).

Esse resíduo também pode ser compostado. Para que isso ocorra, ele deve ser misturado com materiais estruturantes, como palha, madeira, folhas, resíduos verdes, entre outros, com a finalidade de reter melhor a umidade, aumentar a porosidade e propiciar melhor equilíbrio para a relação carbono nitrogênio (RCN) (CEBALLOS, 2000). O material oriundo da compostagem pode ser utilizado como adubo orgânico para fins agrícolas, já que apresenta elevado potencial fertilizante. (LEITE *et al.*, 2015).

Visto que o agronegócio vem apresentando crescente importância no cenário econômico brasileiro e um de seus principais contrapontos se relaciona à elevada produção de resíduos (incluindo o ES), estes, quando tratados, devem prever também em seus sistemas o tratamento e a destinação adequada dos subprodutos obtidos. Dentre esses subprodutos se destaca o lodo de ES que, para sua adequada gestão, demanda caracterização, permitindo-se prever sua capacidade poluidora e, principalmente, delinear práticas ambientalmente adequadas e possivelmente rentáveis para esse material. Ou seja, a partir da caracterização desse material, deve-se buscar visualizá-lo não mais como problema, mas como oportunidade, visto que pode acarretar na diminuição de custos com adubos e com seu descarte por via de aterros sanitários (uma prática ilegal no âmbito brasileiro), incineração ou corpos hídricos.

Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo caracterizar, sob o ponto de vista físico-químico e microbiológico, o lodo originário do tratamento de biodigestão anaeróbia do efluente suíno. Para cumprir este objetivo, buscou-se: avaliar os parâmetros físico-químicos (pH; sólidos totais, fixos e voláteis; nitrogênio total e fósforo total), microbiológicos (coliformes totais e termotolerantes), e avaliar o poder calorífico superior do lodo.

2 MATERIAIS E MÉTODO

O experimento foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus São Roque (IFSP-SRQ), e na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Câmpus Campinas (FEQ/UNICAMP), no período compreendido entre 16 de abril a 16 de maio de 2019. Para a realização das análises foi efetuada a coleta de 40 amostras de lodo com peso médio de 1kg cada, durante quatro semanas, o que foi equivalente a 10 amostras semanais. As amostras foram originárias de uma granja de suínos tecnificada de ciclo completo Ouro Preto, localizada no município de Ibiúna (SP), nas coordenadas 23°49'11" S 47°11'04" W, que conta com sistema de tratamento de efluentes e resíduos em geral. O lodo utilizado na pesquisa é originário de processo de biodigestão anaeróbia (biodigestor *vinibiodigestor*® com capacidade de 700 m³) seguido de dois tanques de decantação (primário e secundário). As amostras foram obtidas deste lodo decantado após ser submetido a sistema de desaguamento em leito de secagem coberto com tempo médio de detenção de 30 dias, ocorrendo em diferentes pontos e de forma aleatória, com o objetivo de possuir maior representatividade nos resultados. Para isso foram coletados 10kg de amostra por semana, sendo elas cada quilograma de pontos diferentes no leito de secagem, apresentando variações quanto ao seu estado físico.

Os parâmetros físico-químicos avaliados foram: pH, sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV), nitrogênio total (NT), relação carbono/nitrogênio (RCN), e fósforo total (PT). Os parâmetros microbiológicos foram: número mais provável (NMP) de coliformes totais (CT) e termotolerantes (TT).

Tanto os parâmetros físico-químicos como os microbiológicos foram avaliados com uso das metodologias estabelecidas pela *American Public Health Association* (1998) (Tabela 1).

Tabela 1. Métodos utilizados para investigação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

Metodologia das análises		
Análise	Nome do método	Método
pH	<i>Electrometric Method</i>	4500-H+ B
ST/SF/SV	<i>Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples</i>	2540 G
NT	<i>C. Semi-Micro-Kjeldahl Method</i>	4500-Norg
PT	<i>Vanado molybdo phosphoric Acid Colorimetric Method</i>	4500-P C
CT	<i>Standard Total Coliform Fermentation Technique</i>	9221 B
TT	<i>Fecal Coliform Procedure</i>	9221 E

pH - Potencial Hidrogeniônico; ST - Sólidos Totais; SF - Sólidos Fixos; SV - Sólidos Voláteis; NT - Nitrogênio Total; PT - Fósforo Total; CT - Coliformes Totais; TT - Coliformes Termotolerantes.

Para a determinação do pH foi utilizado um pHmetro da marca PHTEK, modelo PHS-3B. As análises de sólidos totais foram realizadas através da técnica da gravimetria, em que 10 cadinhos foram aquecidos em mufla *Fornitec* F2-DM monofásico à temperatura de 550 °C para a secagem e, em seguida, adicionados 5g de amostra em cada cadinho, onde os mesmos eram submetidos a 105 °C em estufa *Solab*® SL-101 até atingirem peso constante. Com esses valores, calculou-se os sólidos totais. Esses materiais secos foram submetidos a 550 °C durante uma hora, após esse período os cadinhos foram novamente pesados e calculados os SF e SV.

Para a obtenção das concentrações de NT utilizou-se o método Kjeldahl. Após a digestão da amostra com ácido sulfúrico e catalisador sulfato de cobre, por meio de bloco digestor Alfa Mare® AM-348, o nitrogênio orgânico é liberado e reage com hidróxido de sódio para formar amônia. A amônia é destilada no destilador de nitrogênio e absorvida em solução de ácido bórico. O conteúdo de nitrogênio é determinado pela titulação da amônia com solução de hidróxido de sódio.

Para a obtenção das concentrações de PT, após a digestão da amostra com persulfato de potássio e ácido sulfúrico, os íons ortofosfato reagem com a solução de vanadato e molibdato de amônio formando um composto de cor amarela. A concentração de fósforo na amostra é determinada por espectrofotometria com o uso de um espectofotômetro (Nova® NI-2000), relacionando a intensidade da cor com a concentração de solução de fósforo com concentração conhecida.

Os parâmetros microbiológicos foram investigados através de pesquisa de coliformes totais (CT) e coliformes termotolerantes (TT) utilizando a técnica dos tubos múltiplos. Após o enriquecimento dos micro-organismos do grupo coliformes, por meio de cultura, preparada com Caldo Lauril Sulfato, foram utilizados respectivamente os meios de cultura de Caldo Lactosado Verde Brilhante, para os coliformes do grupo total e Caldo E.C Broth para os coliformes do grupo termotolerante.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), foram coletadas cinco gramas de cada amostra de lodo totalizando 200g (*pool* amostral), o qual foi submetido à secagem em estufa bacteriológica *Solab*® SL-101 com capacidade de 27L, a 105 °C durante 24 horas. Para obter o valor do PCS foi utilizado um calorímetro IKA (C200, EUA) exotérmico. O *pool* amostral foi compactado por meio de uma prensa manual. Em seguida, foi inserido em um cadinho de quartzo e fez-se conexão ao fio de ignição conectado à tampa de um vaso de pressão. Esse conjunto foi inserido no

vaso pressurizado com oxigênio de pureza 99,99%. Foram adicionados dois litros (volume constante) de água entre 20 e 22 °C dentro do equipamento (câmara de combustão). Todo calor liberado durante a reação elevou a temperatura da água com a determinação do PCS. Optou-se por realizar duas análises com amostragens distintas, pois, após seco totalmente em estufa para ser submetido à análise de PCS, o lodo se apresentou com distintas granulometrias.

As análises de carbono total (C) foram realizadas conforme metodologia proposta por Benaci (2010) e Carmo e Silva (2012), que consiste na utilização da seguinte equação:

$$\%C = \frac{Me - Mm}{((Me - Mc) * 1,724)} * 100$$

onde *Me* representa a massa do cadinho após a estufa, onde era *Mm* a massa após a passagem na mufla e *Mc* a massa do cadinho, o valor 1,724, que representa o valor de conversão de Van Bemmelen para carbono total na matéria orgânica. Para isso foram usados os resultados adquiridos durante a realização das análises de ST, SF e SV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados referentes aos parâmetros físico-químicos obtidos semanalmente com aleatoriedade no leito de secagem do lodo de ES. Cada semana expressa os valores médios das dez amostras em seus respectivos parâmetros.

Tabela 2. Resultados médios obtidos das análises dos parâmetros físico-químicos do lodo

Tabela de parâmetros físico-químicos				
Parâmetros	Semana I	Semana II	Semana III	Semana IV
ST (%)	44,91	21,12	25,96	26,60
SF (%)	71,92	45,93	71,00	66,16
SV (%)	28,08	54,07	29,00	33,84
NT (mg/g)	0,656	1,10	0,49	0,504
C (%)	17,65	31,33	17,31	21,19
RCN (C:N)	26,91	28,28	34,69	42,04
PT (mg/g)	0,73	0,79	0,52	0,47
pH	8,20	8,29	8,30	8,16

ST - Sólidos Totais; SF - Sólidos Fixos; SV - Sólidos Voláteis; NT - Nitrogênio Total; C - Carbono; RCN - Relação Carbono Nitrogênio; PT - Fósforo Total; pH - Potencial Hidrogeniônico.

Os ST referem-se à matéria suspensa e/ou dissolvida em água ou efluentes, e sua análise é importante no ES uma vez que demonstra dados para o controle físico do lodo. O ST pode ser dividido em sólidos suspensos, que são aqueles possíveis de se remover com simples peneiramento, sua granulometria é variável de acordo com as características da água ou efluente, e estão relacionados aos resultados de turbidez. Já os sólidos dissolvidos são aqueles que estão dissolvidos na água ou no efluente, para sua determinação é necessária a secagem do material, e estão relacionados aos resultados de cor (JUST, 2010).

Os resultados referentes à ST indicaram que o lodo, dependendo do tempo no leito de secagem e exposição indireta aos raios solares, apresentou alteração quanto a esse parâmetro e, em média, essas variações foram de 21,12% (semana II) a 44,91% (semana I) de ST, o que, por sua vez, indicou que o lodo coletado apresentou porcentagem

máxima de umidade próxima a 79%, dessa forma se enquadrando nos parâmetros estabelecidos pela Política Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007). Tais resultados para ST se dão devido ao fato de o lodo analisado ter sido de pontos e estágios diferentes no leito de secagem, apresentando dessa forma variação nos níveis de umidade. Já os dados de SF apresentaram variações de 45,93% (semana II) a 71,92% (semana I), o que resultou também em influência nos resultados de SV, uma vez que os mesmos oscilaram entre 54,07% (semana II - maior resultado) e 28,08% (semana I - menor resultado). Neste sentido, devido ao fato dos resultados de SV possuírem correlação com os níveis de matéria orgânica, podem expressar relação direta no que se refere aos valores de PCS (REIS, 2017; REIS *et al.*, 2019).

Nos estudos de Moraes e Junior (2004) os resultados obtidos com lodo de suinocultura foram diferentes, expressos em mg/L, tal diferença se dá devido à natureza das amostras serem distintas, ou seja, um passou pelo processo de secagem (expresso em %) e o outro não (expresso em mg/L), sendo 6.690 mg/L para ST e, nessa mesma amostragem, 1.230 mg/L para SF e aproximadamente 5.460 mg/L para SV, ou seja, 18,39% de SF e 81,61% de SV. A exposição do lodo nos leitos de secagem tende a remover água do lodo, principalmente água livre presente no resíduo, fazendo com que sua concentração de sólidos aumente, tornando-se mais denso, processo também conhecido como desaguamento do lodo. O teor de ST varia de acordo com o tempo no leito de secagem, condições climáticas (principalmente umidade relativa do ar e temperatura, além de outras variáveis como radiação solar, nebulosidade, entre outras), realização de revolvimento periódico, e taxa de aplicação de sólidos (COIMBRA; ACHON, 2016; REIS, 2017).

Os lodos sanitários de origem doméstica submetidos a leito de secagem, leito de drenagem ou outras tecnologias naturais de desaguamento dificilmente apresentam teor de ST acima de 35%, mesmo em tempos de detenção de aproximadamente 30 dias (REIS, 2017). Esses valores ou valores ligeiramente acima destes são possíveis de se alcançar normalmente quando se aplica revolvimentos periódicos na massa de lodo e quando se trata de uma região com condições climáticas favoráveis (REIS, 2017). Quanto ao percentual de SF e SV, estes podem ser variáveis dependendo da origem do efluente tratado e processos de tratamento. Borges *et al.* (2008) relataram, para lodo de esgoto doméstico, teor de SF de 52,36% e SV de 47,63%. Já para lodos de indústria têxtil estes mesmos autores relataram SF de 48,57% e SV de 51,43%.

A avaliação dos parâmetros de NT e PT são de elevada importância, uma vez que são os dois principais nutrientes relacionados ao processo de eutrofização de corpos d'água e lençóis freáticos (VON SPERLING, 2005).

O NT apresentou-se variando de 0,49 mg/g quando em menor concentração, a 1,108 mg/g, quando em maior concentração.

Ainda de acordo com Borges *et al.* (2008) o lodo de origem sanitária apresenta níveis de NT próximos de 4,5 mg/g o que representa maior potencial poluidor, principalmente em relação à eutrofização de corpos d'água.

Já o PT se apresentou em concentrações ainda menores com parâmetros oscilando entre 0,47 mg/g (semana IV) a 0,79 mg/g (semana II). Para Assunção (2012), utilizando lodo sanitário de lagoas anaeróbias, esses valores foram: mínimo de 0,24 mg/g; mediana de 0,42 mg/g; e máximo de 1,54 mg/g.

Dessa forma, o lodo de ES apresentou-se com menor potencial poluidor, tanto para NT quanto para PT, entretanto não podendo ser descartado como fonte nutricional para plantas em projetos de reflorestamento ou adubação orgânica visto que tais valores ainda se mostram expressivos diante de tais direcionamentos.

Outro parâmetro importante a ser determinado é a RCN que, por sua vez, apresenta um indicativo de equilíbrio entre dois parâmetros: C e NT. A RCN consiste em um indicador de viabilidade de aplicação desse material com a finalidade de compostagem. Nesse caso específico, obteve-se o valor por meio da divisão direta entre C e NT. Tal parâmetro avalia os níveis de maturação das substâncias orgânicas presentes e seus efeitos no crescimento biológico (GASPADONI *et al.*, 2018).

No presente estudo, durante a realização das análises foi possível constatar uma variação de aproximadamente 27:1 a 42:1 na primeira e quarta semanas, respectivamente. De acordo com Silva *et al.* (2008), os valores considerados adequados para o início de um processo de compostagem; devem ser entre 25:1 e 30:1 para compostagem de lodos oriundos de tanques sépticos associados a resíduos sólidos vegetais. Dessa forma, o lodo encontra-se parcialmente inserido dentro de tais características, permitindo a realização da compostagem associada a demais fontes nutricionais.

Outro parâmetro investigado no decorrer do presente estudo foi o pH. Seus valores definem a disponibilidade dos nutrientes no meio, assim como sua suscetibilidade à utilização em demais processos, por exemplo a compostagem (FRIORI *et al.*, 2008). Esse parâmetro apresentou resultados de alcalinidade, variando de 8,16 a 8,3 aproximadamente. Nesse cenário os valores de pH podem ter oscilado devido à produção metabólica dos micro-organismos, que podem ser mais ácidos ou alcalinos. Esses resultados diferem de resultados apresentados por Assunção (2012), em que o lodo desaguado proveniente de lagoa anaeróbia apresentou pH ácido, com variações de 5,9 a 6,17.

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados referentes às análises microbiológicas de CT.

Tabela 3. Resultados das análises do parâmetro microbiológico de coliformes totais do lodo

Amostra	Coliformes Totais (CT) (NMP/mL)			
	Semana I	Semana II	Semana III	Semana IV
1	2.400	> 11.000	> 11.000	11.000
2	4.600	> 11.000	> 11.000	> 11.000
3	930	2.400	> 11.000	2.400
4	2.400	4.600	> 11.000	4.600
5	2.400	11.000	> 11.000	11.000
6	2.400	2.400	> 11.000	350
7	4.600	> 11.000	> 11.000	2.400
8	2.400	2.400	> 11.000	11.000
9	2.400	> 11.000	> 11.000	> 11.000
10	4.600	> 11.000	> 11.000	4.600
Média	2.913	7.780	> 11.000	6.935

Por definição, o grupo CT inclui bactérias, sendo gram-negativas não esporuladas, fermentadoras de lactose, que apresentam produção de ácido e gás durante o processo fermentativo e que atuam em temperatura variável entre 32 °C e 37 °C (TOWNSEND *et al.*, 1998).

Ao realizar as análises de CT neste estudo foi possível constatar uma manutenção das bactérias desse grupo, mantendo-se sempre em quantidades elevadas, apresentando manutenção total em amostras coletadas na semana III em que todos os resultados apresentaram valores máximos. As amostras coletadas na semana IV apresentaram maior variação nos resultados de NMP/mL. Já as análises referentes à semana I apresentaram valores médios mais baixos. Tal fato pode ser explicado pelo tempo do lodo nos leitos de secagem uma vez que pode ocorrer variações de temperatura que deve influenciar na quantidade de CT devido a potenciais mudanças da fase mesófila para termófila.

Tais resultados são semelhantes aos obtidos por Sylvestre (2013), em que se observou a manutenção dos CT em lodo de suinocultura provenientes de reatores UASB.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados referentes ao NMP/mL de TT.

Tabela 4. Resultados das análises do parâmetro microbiológico de coliformes termotolerantes do lodo.

Amostra	Coliformes Termotolerantes (TT) (NMP/mL)			
	Semana I	Semana II	Semana III	Semana IV
1	<3,0	36	280	4.600
2	360	<3,0	74	210
3	30	150	200	36
4	930	150	280	74
5	360	11.000	280	430
6	2.400	930	2.100	430
7	280	>11.000	2.100	92
8	210	2.400	>11.000	92
9	2.400	350	>11.000	930
10	4.600	11.000	>11.000	36
Média	1.157	3.700	3.860	693

Os TT são membros constituintes de um subgrupo dos CT, cujo habitat é o trato intestinal de animais homeotérmicos e que, do ponto de vista sanitário, por serem bactérias com potencial patogênico, podem causar doenças, principalmente de natureza entérica em seres humanos (JORDANO *et al.*, 1995).

Constatou-se de forma geral um número de TT com valores baixos, exceto na semana III. Tais resultados podem ser explicados devido à aleatoriedade das coletas de lodo no leito de secagem, uma vez que o mesmo pode ter sido submetido a diferentes índices de radiação solar indireta dessa forma apresentando variações no decorrer das análises, já que as alterações de temperatura podem causar migrações entre as fases de mesofilia e termofilia, acarretando assim a diminuição do NMP/mL de TT.

Esses resultados diferem dos obtidos por Arantes (2016), em que o lodo seco da suinocultura apresentou valores nulos (zero) para a presença de TT. Esse fato pode ser justificado devido à natureza do lodo analisado (mais úmido, mais seco, processo de tratamento, entre outros).

Na Tabela 5, estão apresentados os resultados do PCS do lodo.

Tabela 5. Poder calorífico superior (PCS) obtido a partir do lodo

Poder Calorífico Superior (PCS) (MJ/kg)			
Granulometria baixa (pó)			
Amostra	Massa (g)	Temperatura (°C)	PCS (MJ/kgST)
1	1,86	21,5	6,870
2	0,93	22	6,968
Média	1,4003	21,8	6,919
Granulometria maior (granulado)			
1	0,9649	20	11,388
2	0,9594	21	11,938
Média	0,9622	20,5	11,663

O PCS apresenta a quantidade de calorias liberadas pelo material em questão mediante processo de combustão completa. Durante a combustão do material em pó foi possível constatar um PCS mais baixo, apresentando características semelhantes à combustão de areia, o que correspondeu à coloração amarelada. A areia possui baixo PCS e, portanto, nesta amostra obteve-se um valor médio mais baixo: 6,919 MJ/kg_{ST}. Dessa forma, com a finalidade de comparação, a mesma análise foi realizada com material de maior granulometria que, por sua vez, apresentou maior PCS, com média de 11,663 MJ/kg_{ST}. Assim, foi classificado como com maior teor de areia e silte (inorgânicas) as de menor dimensão (semelhante a pó), e de maior dimensão (grumos) para material orgânico presente (Figura 1). Assim, considerando-se a relação direta relatada por Reis *et al.* (2019) e Achon, Reis e Cordeiro (2020) entre o teor de SV e o valor de PCS, acredita-se que o resultado de PCS obtido neste estudo foi limitado pelos baixos teores de SV obtidos nas amostras. Nesse sentido, acredita-se que o elevado teor de SF das amostras de lodo pode ser derivado dos procedimentos gerais de operação na suinocultura estudada, que contribui para direcionamento de grandes quantidades de areia para o sistema de tratamento de ES, dada a necessidade de lavagem periódica para se garantir padrão de higiene adequado.



Figura 1. Ao lado esquerdo lodo de ES de menor granulometria e ao lado direito lodo de ES de maior granulometria após serem submetidos ao calorímetro.

Quando comparados a lodos provenientes de ETE do município de Rio Claro, o lodo de ES apresentou valores menores, dessa forma demonstrando menor capacidade de queima, entretanto não sendo descartado como fonte geradora de energia. De acordo com Lee e Santos (2011), o lodo de base seca apresentou valores que oscilaram entre 14,89 MJ/kg_{ST}, 16,13 MJ/kg_{ST} e 17,80 MJ/kg_{ST} em diferentes épocas do ano.

De acordo com Borges (2008) o PCS de madeira de descarte e bagaço de cana possuem respectivamente 13 MJ/kg e 14,5 MJ/kg, e tais materiais possuem aplicações para geração de energia por meio de sua biomassa. Para Almeida (2007) o lodo seco proveniente de estações de tratamento de efluentes pode apresentar valores de PCS variáveis entre 12,5 até 15,0 MJ/kg dependendo de sua composição e variação de carga orgânica recebida em épocas de seca ou chuva.

Lodo proveniente do tratamento de efluentes em frigoríficos obtidos a partir do uso de coagulante sulfato férrico apresentou valor de PCS de 26,23 MJ/kg_{ST}, configurando significativo potencial de uso como fonte de energia (SENA, 2005).

Estudos de biossecagem de lodo anaeróbio (reatores UASB) de origem predominantemente doméstica conduzidos por Reis (2017) resultaram em valor de PCS de 14,66 MJ/kg_{ST} após 20 dias em reatores de biossecagem. Zhao *et al.* (2010) também analisando lodo biosseco obtiveram valor de 14,10 MJ/kg_{ST} para PCS.

Na Tabela 6 estão apresentados materiais comumente utilizados para incineração e geração de energia, contendo seus respectivos valores de PCS.

Tabela 6. Valores de PCS de alguns materiais comumente utilizados em estações de incineração para geração de energia

Material	PCS (MJ/kg _{ST})	Referência
Aglomerados de biomassa	10,45	KEMA (1999)
Lodo de esgoto seco (térmico)	13,58	EPON; KEMA (2000)
Resíduo municipal com plástico	14,00	Venedaal (1994)
Carvão Marrom	11,90	Hein (1994)
Carvão Antracito	33,90	Van Doorn et al. (1996)

Fonte: Adaptado de Winkler *et al.* (2013).

Ao analisar os resultados de PCS do lodo de ES é possível visualizar sua proximidade com os resultados de aglomerados de biomassa e carvão marrom, que apresentam respectivamente 10,45 MJ/kg_{ST} e 11,90 MJ/kg_{ST} frente a 11,66 MJ/kg_{ST} do lodo de ES em maior granulometria, o que incita a potencialidade do lodo de ES em ser utilizado como fonte para geração de energia em estações de incineração, devido ao seu volume de geração ser elevado e aos valores de PCS serem compatíveis com outros recursos já utilizados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos estudos realizados, algumas considerações finais podem ser destacadas. Embora o lodo de ES bem como lodo de estações de tratamento de efluentes e esgoto em geral sejam passíveis de caracterização, é claramente perceptível a variabilidade de suas características, sendo poucas as considerações gerais que se podem levantar sobre este resíduo, por exemplo maior teor de matéria orgânica em relação a inorgânica. Portanto, salienta-se que não é possível esgotar o tema de caracterização de lodo de qualquer origem, mas apenas comparar resultados, uma vez que sua variabilidade pode ocorrer de acordo com a tipologia de tratamento do efluente, época do ano, tipo de tratamento do lodo, entre outras mais específicas. Os estudos conduzidos permitem afirmar que as análises previstas ocorreram de maneira adequada, mesmo apresentando comportamentos relativamente distintos dependendo da realidade de comparação e, mesmo assim, matem-se o crédito dos resultados, já que análises de um mesmo material em mesma época do ano pode apresentar resultados distintos tanto pelas características em si, como pela técnica de amostragem. Com base nos resultados obtidos, o lodo do ES estudado apresentou valores de NT, PT, RCN e pH que podem ser considerados adequados para uso como material em compostagem ou como biofertilizantes, uma vez que apresentou nutrientes em concentrações e proporções compatíveis. O lodo do ES apresentou resultados relativamente próximos ao PCS da madeira de descarte, bagaço de cana, lodo seco oriundo das estações de tratamento de efluentes e aglomerados de biomassa, materiais que já são utilizados como fonte de biomassa para geração de energia, por meio de incineração. Por fim, quanto à presença de coliformes TT, os resultados demonstraram níveis baixos na maioria das semanas avaliadas, o que pode indicar ser um produto seguro do ponto de vista sanitário.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; COIMBRA, P. R. S.; KELLNER, E. Influência da manta geotêxtil e altura da camada de lodo no desaguamento de lodo anaeróbio em leito de drenagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 8, n. 4, 2019.

- ACHON, C. L.; REIS, R. F.; CORDEIRO, J. S. Gestão ambiental e tecnológica de resíduos de ETE: a contribuição do PPGEU para municípios de pequeno e médio porte. *In: VENTURA, K. S. et al. (org.). 25 anos: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana - PPGEU: Universidade Federal de São Carlos. São Carlos: UFSCar/CPOI, 2020.*
- ALMEIDA, I. A. Demandas tecnológicas em meio ambiente e de empresas de saneamento. **Inovatec 2007**, São Paulo, 2007.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final v. 6.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, Companhia de Saneamento do Paraná - SENEPAR. 415p. 2001.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 20th ed. Washington, 1998.
- ASSUNÇÃO, M. S. L. **Caracterização de lodo de lagoa anaeróbia tratando resíduos esgotados de tanques sépticos e fossas com vistas ao aproveitamento.** 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2012.
- BARICHELLO, R.; HOFFMANN, R.; DA SILVA, S. O. C.; DEIMLING, M. F.; FILHO, N. C. O Uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na Região Noroeste do Rio Grande do Sul. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 8, n. 2, p. 333-355, 2015.
- BENACI, V. **Avaliação de métodos de análise para carbono orgânico em amostras de interesse agrônômico.** Instituto Agrônômico. Campinas, p. 38. 2010.
- BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, v. 17, n. 1/2, p. 27-32, 2008.
- BRASIL. Presidência da República Federativa do Brasil. Legislação Federal Brasileira. Brasília. **Lei 11.445 de 2007.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm. Acesso em: 25 out. 2018.
- BROETTO, T.; TORNQUIST, C. G.; WEBER, E. J.; CAMPOS, B. H. C.; MERTEN, C. G.; SCHNEIDER, J. C. Indicadores geoespaciais para avaliação do impacto ambiental da suinocultura no licenciamento em âmbito municipal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 12, p. 1177-1185, 2015.
- BÜHRING, G. M. B.; SILVEIRA, V. C. P. O BIOGÁS E A PRODUÇÃO DE SUÍNOS DO SUL DO BRASIL 1. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 2, p. 222-237, 2016.
- CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C.; SILVA, C. M. Produção, tratamento e uso dos dejetos suínos no Brasil. **Desenvolvimento em Questão**, v. 13, n. 32, p. 127-145, 2015.
- CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de Quantificação de Carbono e Matéria Orgânica em Resíduos Orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, 2012.
- CEBALLOS, B. S. O. (2000). Microbiologia sanitaria y ambiental. *In: MEDONÇA, S. R. Sistemas de lagunas de estabilizacion.* Colômbia: McGraw-Hill, 2000. p. 68-106, .
- COIMBRA, P. R. S.; ACHON, C. L. Lodo de reatores UASB: desaguamento através de protótipos de leito de drenagem. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 4, n. 24, p. 28-42, 2016,

COSTA, A.; SOTO, R. F. M. Tratamento do dejetos suíno por biodigestão anaeróbia. **Revista de Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 3, p. 801-823, set. 2018.

DA SILVA, T. S.; SILVA, P. A. S.; LEITE, J. M.; FILGUEIRA, N. C.; VARANDA, T. S. Avaliação e tratamento de efluente de suinocultura-estudo de caso no município de Marabá-Pará/Evaluation and treatment of swine effluent-case study in Marabá-Pará. **Brazilian Journal of Business**, v. 1, n. 3, p. 1078-1086, 2019.

DE LUCA, S. Q. J.; HUSSAR, G. J.; PARADELA, A. L.; BELL, E. Estudo da eficiência de um sistema de tratamento de efluentes líquidos de suinocultura. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 14, n. 1, 2017.

FIORI, M. G. S.; SCHOENHALS, M.; FOLLADOR, F. A. C. Análise da evolução tempo-eficiência de duas composições de resíduos agroindustriais no processo de compostagem aeróbia. **Engenharia Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 178-191, 2008.

GASPODINI, R. S.; PRIETTO, P. D. M.; COLLA, L. M.; MARGARITES, A. C. F. Compostagem de resíduos de casca de ovo, esterco bovino e lodo de estação de tratamento de efluente de graxaria: uma abordagem experimental em pequena escala. **Revista CIATEC-UPF**, v. 10, n. 1, p. 1-16, 2018.

GOMES, S. D.; NAGAE, R. Y.; ZENATTI, D. C.; FAZOLO, A.; GOMES, B. M. Efeito do manejo da lâmina d'água na minimização do volume de efluentes gerados na produção de suínos. **IRRIGA**, v. 14, n. 2, p. 233-242, 2009.

JORDANO, R.; LOPEZ, C.; RODRIGUEZ, V.; CORDOBA, G.; MEDINA, L. M.; BARRIOS, J. Comparison of Petrifilm method to conventional methods for enumerating aerobic bacteria, coliforms, Escherichia coli and yeasts and molds in foods. **Acta microbiologica et immunologica Hungarica** 1995; 42: 255-9.

JUST, M. C. **Avaliação quantitativa e qualitativa da água de irrigação em lavouras de arroz: o caso estudo da associação de irrigação e drenagem Santo Isidoro na região sul de Santa Catarina**. 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2010.

KAMIMURA, C. T.; OLIVEIRA, R.; QUINTANILHA, S. C.; LIMA, E. S.; FERREIRA, R. M.; NERY, V. L. H. Possibilidades de reuso de efluentes gerados na suinocultura visando à economia de água e fertilizantes químicos. **Atas de Saúde Ambiental-ASA**, v. 3, n. 2, p. 74-79, 2016.

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, IBEAS, 2., Londrina. **Anais [...]**. Londrina: IBEAS, 2011. p. 1-9.

LEITE, W.; MAFFAZZIOLI, E.; GUIMARÃES, L.; DAL MAGO, A.; FILHO, P. B. Análise comparativa dos efeitos da carga orgânica e do tempo de detenção hidráulica na digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 581-588, 2015.

MARÇAL, D. A.; ABREU, R. C.; CHEUNG, T. L.; KIEFER, C. Consumo de carne suína no Brasil. Aspectos simbólicos como determinantes do comportamento. **Revista de Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 4, p. 989-1005, 2016.

MARÇAL, D. A.; SILVA, C. E. Avaliação do impacto do efluente da estação de tratamento de esgoto ETE-Pirajá sobre o Rio Parnaíba, Teresina (PI). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 761-772, 2017.

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; LO MONACO, P. A.; SARMENTO, A. P.; MATOS, M. P. Capacidade extratora de plantas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias de laticínios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1311-1317, 2010.

- MEDRI, W.; MEDRI, V. Otimização de sistemas de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos. **Ciências Exatas e Tecnológicas-SEMINA**, v. 25, n. 2, p. 203-212, 2004.
- MORAES, L. M.; JÚNIOR, D. R. P. Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de resíduos da bovinocultura e da suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 445-454, 2004.
- NOVAIS, F. F.; MARINHO, B. T. S.; SILVA, M. A. R.; OLIVEIRA, F. C.; VIANA, R. D. S. Poluição por matéria orgânica e autodepuração dos cursos d'água: impactos deste estudo no setor produtivo. **Soc. Dev**, v. 8, n. 5, p. e3585750, 2019.
- REIS, R. F. **Sistema de remoção de água de lodo gerado em estação de tratamento de esgoto com duas fases: desaguamento inicial em leito de drenagem seguido de biossecagem**. 2017. 256 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, Campus São Carlos (UFSCAR), 2017.
- REIS, R. F.; CORDEIRO, J. S.; FONT, X.; ACHON, C. L. The biodrying process of sewage sludge: a review. **Drying Technology**, p. 1-14, 2019.
- SANTOS, B. S.; COSTA, P. F.; EYNG, E.; CÂMARA, C. D. Avaliação da Eficiência de Um Sistema de Tratamento por Wetland Construído Aplicado ao Efluente de um Frigorífico de Suínos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 37, n. 2, p. 13-22, 2016.
- SCHWINGEL, A. W.; ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; DA SILVA SUNADA, N.; CENTURION, S. R. Desempenho da co-digestão anaeróbia de dejetos suínos com inclusão de glicerina bruta. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 778-783, 2016.
- SILVA, A. G.; LEITE, V. D.; SILVA, M. M. P.; PRASAD, S.; FEITOSA, W. B. S. Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 371-379, 2008.
- SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina (UEL), 2012.
- SYLVESTRE, S. H. Z. **Desempenho de sistemas de reatores anaeróbios e aeróbio na remoção de coliformes e ovos de helmintos de águas residuárias de suinocultura**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FGAV-UNESP), 2013.
- TONIAZZO, F.; RODRIGUES, A. C.; ROSA, M. M.; DA ROS, C. O.; BECEGATO, V. A.; LAVNITCKI, L.; CANTONI, F. Avaliação da liberação de CO₂ em solo com adição de águas residuárias suínicas e impactos ambientais e sociais da suinocultura. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 253-274, 2018.
- TOWNSEND, D. E.; IRVING, R. L.; NAQUI, A. Comparison of the SimPlate coliform and Escherichia coli test with Petrifilm, three-tube MPN, and VRBA + MUG methods for enumerating coliforms and E. coli in food. **J Food Prot.**, v. 61, p. 444-449, 1998.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.