



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**TRATAMENTO DE DEJETOS SUÍNOS VISANDO AO
REAPROVEITAMENTO DO EFLUENTE TRATADO, AVALIAÇÃO
DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E RECUPERAÇÃO DE NUTRIENTES**

Anderson Arezi

Lajeado, junho de 2020

Anderson Arezi

**TRATAMENTO DE DEJETOS DE SUÍNOS VISANDO AO
REAPROVEITAMENTO DO EFLUENTE TRATADO, AVALIAÇÃO DA
PRODUÇÃO DE BIOGÁS E RECUPERAÇÃO DE NUTRIENTES**

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Química, da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof.^a Ma. Camila Hasan

Lajeado, junho de 2020

RESUMO

A suinocultura é uma atividade pecuária de grande importância econômica, auxiliando no desenvolvimento do país por meio da geração de emprego e renda. Um dos principais impactos ambientais desta atividade, refere-se à elevada quantidade de dejetos suínos gerados e sua concentração em pequenas propriedades rurais em função do regime de confinamento animal predominantemente adotado neste processo produtivo. Este tipo de resíduo apresenta uma alta capacidade poluidora quando não tratado adequadamente. Nesse sentido, este trabalho visa avaliar a eficiência do tratamento de dejetos suínos por meio da digestão anaeróbia e de tratamento físico e químico, a fim de realizar uma avaliação sobre a possibilidade de reaproveitamento do efluente tratado como água de reuso, do lodo como biofertilizante e do biogás como fonte de energia. O estudo foi dividido em duas etapas: na primeira, realizou-se a caracterização do dejetos suíno, a avaliação da produção e da qualidade de biogás utilizando o dejetos como substrato e, por fim, o tratamento do digestato resultante do processo de digestão por coagulo-floculação. O ensaio de digestão anaeróbia ocorreu pelo período de 44 dias e, após, foram realizados os testes de coagulo-floculação para identificar a melhor dosagem de coagulante e polímero capaz de gerar um clarificado possível de ser reaproveitado. Na segunda etapa, uma nova amostra de dejetos suíno foi coletada e, após a sua caracterização inicial, aplicou-se a coagulo-floculação e somente o lodo sedimentado foi encaminhado ao processo de digestão anaeróbia. Os testes de coagulo-floculação não apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que não geraram um clarificado passível de reuso. Além disso, o coagulante adicionado interferiu de forma negativa na digestão anaeróbia do segundo ensaio. A digestão anaeróbia do dejetos suíno do primeiro e segundo ensaio gerou 1,55 e 5,43 L de biogás por kg de dejetos suíno respectivamente, com um percentual de metano de 67,71% para o primeiro ensaio e 40,63% no segundo, considerando a diferença na concentração dos sólidos totais existente entre o primeiro e segundo ensaio devido à ordem de aplicação da coagulo-floculação. Isso demonstra que os resultados da digestão anaeróbia também não foram satisfatórios, visto que os valores de biogás obtidos ficaram abaixo de outros encontrados na literatura.

Palavras-Chave: Digestão Anaeróbia. Biogás. Tratamentos Físicos e Químicos. Biofertilizante.

ABSTRACT

Pig farming is a livestock activity of great economic importance, helping the country's development through the generation of jobs and income. One of the main environmental impacts of this activity refers to the high amount of pig waste generated and its concentration in small rural properties due to the animal confinement regime predominantly adopted in this production process. This type of waste has a high polluting capacity when not properly treated. Due this, the aim of this work to evaluate the efficiency of the treatment of swine manure through anaerobic digestion and physical and chemical treatment, in order to carry out an evaluation on the possibility of reusing the effluent treated as reuse water, the sludge as biofertilizer and biogas as an energy source. This type of waste has a high polluting capacity when not properly treated. Due this, the aim of this work to evaluate the efficiency of the treatment of swine manure through anaerobic digestion and physical and chemical treatment, in order to carry out an evaluation on the possibility of reusing the effluent treated as reuse water, the sludge as biofertilizer and biogas as an energy source. The study was divided into two stages. The first one is about the characterization of swine manure was carried out, the evaluation of the production and quality of biogas using the manure as a substrate and, finally, the treatment of the digestate resulting from the anaerobic digestion process - flocculation. The anaerobic digestion test was carried out for a period of 44 days and, afterwards, clotting-flocculation tests were performed to identify the best dosage of coagulant and polymer capable of generating a clarified product that could be reused. In the second one, a new swine manure sample was collected and, after its initial characterization, coagulation-flocculation was applied and only the sedimented sludge was sent to the anaerobic digestion process. The coagulation-flocculation tests did not present satisfactory results, since they did not generate a clarified that could be reused. In addition, the added coagulant negatively interfered with the anaerobic digestion of the second trial. The anaerobic digestion of swine manure from the first and second trial generated 1.55 and 5.43 L of biogas per kg of pig manure respectively, with a methane percentage of 67.71% for the first trial and 40.63% in the second, considering the difference of the concentration of total solids between the first and second tests due to the order of application of the coagulo-flocculation. This analysis shows that the results of anaerobic digestion were also not satisfactory, since the biogas values obtained were below those found in the literature.

Keywords: Anaerobic Digestion. Biogas. Physical and Chemical Treatments. Biofertilizer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases metabólicas da digestão anaeróbia	25
Figura 2 – Mecanismo de coagulação	32
Figura 3 – Fluxograma do primeiro modelo de tratamento de efluente	38
Figura 4 – Fluxograma do segundo modelo de tratamento de efluente.....	38
Figura 5 – Localização da propriedade.....	39
Figura 6 – Fluxograma da primeira avaliação	42
Figura 7 – Fluxograma da segunda avaliação	42
Figura 8 – Dosagens utilizadas na primeira etapa de coagulo-floculação.....	43
Figura 9 – Dosagens utilizadas na segunda etapa de coagulo-floculação	43
Figura 10 – Teste de sedimentação do dejetos suíno bruto.....	56
Figura 11 – Teste de sedimentação no digestato	56
Figura 12 – Testes 1, 2, 3 e 4 de coagulo-floculação	59
Figura 13 – Teste de sedimentação do dejetos suíno bruto.....	68
Figura 14 – Teste de sedimentação do digestato	68
Figura 15 – Resultado da coagulo-floculação dos 4 primeiros testes.....	71
Figura 16 – Clarificado utilizado na realização das análises de caracterização	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dejeito suíno gerado por animal em relação à fase de criação	19
Tabela 2 – Característica do dejeito suíno quanto à quantidade produzida, umidade, DBO ₅ , sólidos totais e sólidos voláteis.....	19
Tabela 3 – Característica do dejeito suíno relacionado com o teor de sólidos totais	19
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos principais processos de tratamento de dejetos suínos	21
Tabela 5 – Comparação do biogás com 65% de CH ₄ com outras fontes energéticas	23
Tabela 6 – Principais reações químicas da digestão anaeróbia	25
Tabela 7 – Características do digestato proveniente de biorreatores.....	30
Tabela 8 – Características do efluente e sua aplicação de reuso	33
Tabela 9 – Parâmetros que a água de reuso deve atender para fins agrícolas e florestais.....	34
Tabela 10 – Padrões para lançamento de efluente tratado em corpo hídrico receptor	35
Tabela 11 – Parâmetros de DBO ₅ , DQO, Sólidos Solúveis Totais, Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal, Coliformes Termotolerantes, conforme a vazão de lançamento.....	35
Tabela 12 – Valores DQO e DBO ₅ do dejeito suíno e do digestato	54
Tabela 13 – Sólidos presente no dejeito bruto e no digestato.....	55
Tabela 14 – Concentração de nitrogênio e fósforo no dejeito suíno bruto e no digestato.....	57
Tabela 15 – Dosagens de PAC e polímero utilizadas no processo de coagulo-floculação	58
Tabela 16 – Valores de pH em cada fase do tratamento	64
Tabela 17 – Valores de DQO e DBO ₅ para o dejeito suíno em cada fase do tratamento aplicado	65
Tabela 18 – Sólidos presentes no dejeito suíno em cada fase do tratamento	67
Tabela 19 – Concentração de N e P no dejeito suíno em relação a fase de tratamento.....	69

Tabela 20 – Determinação da dosagem mínima de coagulante e pH ideal	70
Tabela 21 – Determinação de PAC e polímero utilizadas no processo de coagulo-floculação	71
Tabela 22 – Resultado da análise de pH, cor e turbidez dos clarificados.....	71
Tabela 23 – Comparativo entre os ensaios	73
Tabela 24 – Comparação do clarificado com a Resolução CONSEMA nº 355 e 419	74
Tabela 25 – Relação entre biogás e metano por volume de biorreator nos ensaios de digestão anaeróbia.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Acompanhamento da produção diária de biogás e metano	51
Gráfico 2 – Volume acumulado de biogás e metano.....	52
Gráfico 3 – Acompanhamento da produção diária de biogás e metano	61
Gráfico 4 – Volume acumulado de biogás e metano.....	62

LISTA DE BREVIATURAS

°C	Graus Celsius
µm	Micrômetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
kg	Quilograma
L	Litro
L/kg	Litro por quilograma
m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹	Metro cúbico por hectare por ano
m ³ /kg	Metro cúbico por quilograma
mg/mL	Miligramma por mililitro
MJ.Nm ⁻³	Megajoules por metro cúbico normalizado
mL	Mililitro
N	Normal
NMP/mL	Número Mais Provável por mililitro

NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
pH	Potencial Hidrogeniônico
SF	Sólidos Fixos
SS	Sólidos Sedimentáveis
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Tema	15
1.2	Problema	15
1.3	Hipótese	16
1.4	Objetivos	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Dejetos Suínos	17
2.1.1	Quantificação de Dejetos Suínos no Vale do Taquari	18
2.1.2	Caracterização dos Dejetos Suínos	18
2.1.3	Riscos Ambientais do Dejeito Suíno	20
2.1.4	Potencial de Uso e Reaproveitamento	20
2.2	Biogás	22
2.2.1	Digestão Anaeróbia	24
2.2.2	Fatores que Influenciam a Produção de Biogás	25
2.2.2.1	Temperatura	26
2.2.2.2	pH e Alcalinidade	26
2.2.2.3	Nutrientes	27
2.2.2.4	Concentração de Sólidos	27
2.2.2.5	Tempo de Detenção Hidráulica	28
2.2.2.6	Inibidores da Digestão Anaeróbia	28
2.3	Efluente do Biodigestor	29

2.3.1	Caracterização	29
2.3.2	Potencial de Reaproveitamento	30
2.3.2.1	Nitrogênio	31
2.3.2.2	Fósforo	31
2.3.3	Tratamentos Físicos e Químicos.....	31
2.3.3.1	Agentes Utilizados na Coagulação e Floculação	32
2.4	Características de Água Para Reuso.....	33
2.5	Aplicação do Sólido em Lavouras	35
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Estudo de Caso.....	39
3.2	Procedimentos Experimentais	39
3.2.1	Coleta das Amostras	40
3.2.2	Ensaio de Digestão Anaeróbia	40
3.2.3	Ensaio de <i>Jar Test</i> do Digestato	41
3.3	Análises Físico-Químicas	44
3.3.1	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	44
3.3.2	Sólidos Totais, Voláteis e Fixos.....	44
3.3.3	Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	46
3.3.4	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	46
3.3.5	Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK).....	47
3.3.6	Amônia.....	48
3.3.7	Sólidos Sedimentáveis	49
3.3.8	Turbidez	49
3.3.9	Cor	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Primeiro Ensaio de Digestão Anaeróbia.....	50
4.2	Análises Físicas e Químicas	53
4.2.1	Análise de pH e Amônia.....	53
4.2.2	DQO e DBO ₅	53
4.2.3	Análise de Sólidos	55
4.2.4	Sólidos Sedimentáveis	56
4.2.5	Nitrogênio e Fósforo	57

4.3	Coágulo-Floculação	58
4.4	Segundo Ensaio de Digestão Anaeróbia	60
4.5	Análises Físicas e Químicas	64
4.5.1	Amônia.....	64
4.5.2	Análise de pH	64
4.5.3	DQO e DBO₅	65
4.5.4	Análise de Sólidos	66
4.5.5	Sólidos Sedimentáveis	67
4.5.6	Nitrogênio e Fósforo	69
4.6	Coágulo-Floculação	70
4.7	Comparativo Entre os Dois Ensaios	72
5	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A suinocultura brasileira é uma atividade pecuária de grande importância para o país, especialmente na promoção de empregos, no impacto sobre a economia e por proporcionar alimentos de elevada capacidade nutricional. O Brasil vem crescendo neste segmento. Em 2006, foram produzidas 2,94 mil toneladas de carne suína e em 2017, esse valor chegou a 3,75 toneladas. Esse aumento na produção tornou o Brasil o quarto maior produtor de carne suína do mundo, atrás apenas de China, União Europeia e Estados Unidos (GERVÁSIO, 2017; ABPA, 2018).

Conforme a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2018), o Rio Grande do Sul é o terceiro estado com mais abates de suínos do Brasil, representando 19,53% do total em 2018. Dentro do estado, uma das regiões que se destaca pela produção suína é o Vale do Taquari, que possui uma economia voltada ao abate e a produção de derivados cárneos. Cidades como Arroio do Meio e Capitão destacam-se entre as maiores produtoras de suíno do Vale do Taquari (KONRAD et al., 2016).

Considerando a formação econômica da região, faz-se importante analisar esse nicho. No tocante ao modo de produção de suínos, pode-se dividi-lo em intensivo e extensivo. Enquanto que o modo intensivo se caracteriza pelo confinamento dos animais, com o intuito de aumentar o rendimento e diminuir o tempo de engorda, no sistema extensivo, a criação ocorre em ambiente aberto, com os animais soltos. Neste sistema não é possível ter um controle de engorda, aumentando assim o tempo de criação e, por consequência, diminuindo a produtividade. Ademais, a área de terra exigida para este sistema é maior do que no intensivo (FERNANDES, 2012).

O aumento da produção de suínos obtido pelo sistema intensivo proporciona um maior controle sobre o processo. Contudo, também causa problemas relacionados ao acúmulo dos dejetos dos animais em pequenas áreas de terras. Essa é uma preocupação ambiental, já que os dejetos suínos se caracterizam como uma fonte altamente poluidora quando não tratados adequadamente (PASINI et al., 2019).

É considerado dejetos suíno, fezes e urina dos animais, associados a restos de ração e água proveniente das lavagens dos espaços de criação. Do ponto de vista químico, este dejetos costuma ser rico em nitrogênio e fósforo, principalmente. Em menor escala, apresenta cálcio, magnésio, cobre, potássio e enxofre, nutrientes que, quando tratados, podem ser utilizados como biofertilizantes para lavoura (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015; PASSINI et al., 2019).

Uma das formas de tratamento do dejetos suíno é a utilização de esterqueiras, onde o efluente fica retido e ocorre a digestão anaeróbia para a estabilização dos compostos orgânicos presentes no dejetos. Após a estabilização, o dejetos é utilizado como fertilizante para corrigir os déficits de nutrientes dos solos e proporcionar melhor desenvolvimento das culturas plantadas (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015; SOUZA et al., 2016).

A digestão anaeróbia é considerada um tratamento interessante para o dejetos suíno. Nela, os microrganismos degradam a matéria orgânica para estabilizar o efluente e produzem como subproduto, o biogás, que pode ser reutilizado na própria localidade como uma energia renovável. Já o efluente estabilizado é utilizado como biofertilizante na lavoura (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

O efluente do biodigestor, chamado de digestato, pode ainda ser tratado através de métodos físicos e químicos para remoção de partículas em suspensão a partir da ação da gravidade. Nesse sistema, o lodo e os nutrientes sedimentam em um tanque de decantação e, posteriormente, podem ser aplicados no campo. A água pode ser reutilizada na própria localidade para fins não nobres, como limpeza dos chiqueiros e irrigação das lavouras, desde que obedeça aos critérios estabelecido na NBR 13969 que classifica água de reuso, conforme as suas características. (NBR 13969, 1997; RODRIGUES; TAFARREL, 2018).

O dejetos suíno é rico em material orgânico, nitrogênio, fósforo e potássio, portanto é uma excelente fonte para produção de biogás e biofertilizante. Atualmente, é obrigatório que se mantenha o dejetos armazenado em esterqueiras por um período de detenção suficiente para

a sua estabilização, em relação à diminuição da demanda química e biológica de oxigênio para posterior aplicação em solo. A digestão anaeróbia pode favorecer este processo em um período de tempo menor, diminuindo a DBO e a DQO, e promovendo a formação do biogás, que é uma fonte de energia renovável e que pode ser utilizado em propriedades rurais como uma fonte de energia térmica, por exemplo.

Além disso, tecnicamente, é possível tratar o digestato que sai do biodigestor, reduzindo o volume de lodo gerado para minimizar as áreas de aplicação e possibilitar o reuso do líquido tratado para usos não nobres dentro da propriedade, como a limpeza de pisos.

Neste contexto o presente trabalho tem como objetivo avaliar, em escala laboratorial, a eficiência do tratamento de dejetos suínos em reatores anaeróbios (biodigestores), seguido de processos químico e físico (por sedimentação). A intenção é de que o lodo sedimentado, contendo os nutrientes, possa ser disposto nas lavouras como fertilizante, enquanto que a água (clarificada) possa ser reutilizada para fins não nobres dentro da propriedade.

1.1 Tema

Tratar os dejetos suínos por meio da digestão anaeróbia, identificando a produção de biogás correspondente e, posteriormente, realizar o tratamento e deságue do digestato para diminuir seu volume e, conseqüentemente, a área de aplicação. O efluente líquido será submetido a processos simplificados de clarificação com o intuito de avaliar as possibilidades de seu reuso.

1.2 Problema

Além dos riscos ambientais, a gestão dos dejetos suínos é um grande problema para os produtores que adotam o sistema produtivo baseado no confinamento de animais, já que é necessário armazenar os resíduos em tanques por períodos de 50 a 60 dias de maturação para, após, dispor o material em lavouras como biofertilizante. Além disso, necessita-se de grandes extensões de área para aplicação dos dejetos suínos, atendendo às taxas de aplicação propostas pelo órgão de fiscalização ambiental, o que gera mão de obra e custo.

1.3 Hipótese

Acredita-se que, a partir dos tratamentos propostos, seja possível gerar biogás com o dejetos suíno ou com o lodo obtido deste substrato. Além disso, acredita-se também que seja possível reutilizar a água proveniente do tratamento e que a quantidade de efluente a ser disposto nas lavouras possa ser menor se o clarificado gerado a partir do tratamento físico e químico do dejetos tenha condições de ser reaproveitado como água de reuso na propriedade. Assim, busca-se atingir um efluente tratado com padrões passíveis de reuso.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do tratamento de dejetos suínos por meio da digestão anaeróbia e de tratamentos físico e químico, com vistas à possibilidade de reaproveitamento da parte sólida do efluente como biofertilizante, o biogás como fonte de energia e a água para usos não nobres, como lavagem das baias, dentro da propriedade.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o dejetos suíno pré e pós-digestão anaeróbia;
- Identificar a produção de biogás obtida a partir da digestão anaeróbia do dejetos suíno e comparar o desempenho do processo empregado antes e após processo de coagulação química;
- Avaliar o lodo e o clarificado obtido por meio do tratamento via coagulação-floculação, a partir de dosagens viáveis do ponto de vista prático e econômico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Dejetos Suínos

A suinocultura vem crescendo a cada ano no Brasil, trazendo inúmeros avanços sociais e econômicos, ao passo que também carrega consigo, um aumento da quantidade de resíduos gerados pela atividade, especialmente devido aos dejetos suínos, efluentes líquidos originários do processo de criação. Esse tipo de poluente é de alto risco, visto que possui alta concentração de matéria orgânica. Dessa forma, faz-se necessário realizar um manejo adequado para reduzir o impacto ambiental atrelado a este efluente (JÚNIOR; DAL POZZO; SANTOS, 2017).

Dejeto suíno é o nome dado à mistura de fezes, urina, ração e água proveniente da criação de suínos. Esse tipo de efluente possui características particulares e inúmeras variáveis que influenciam em sua composição, como o sexo dos animais, a idade e os constituintes da ração. Estão presentes no dejeto suíno inúmeros nutrientes, dentre os quais destacam-se o nitrogênio (N) e o fósforo (P), por sua maior quantidade. Além disso, ainda pode-se encontrar, potássio, cobre, zinco, cálcio, magnésio e elevada carga de microrganismos patogênicos (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015).

A fase de criação é a que mais interfere na quantidade de dejetos gerada por cabeça, sendo que a fase de engorda, que é quando o animal ganha peso para o abate, gera aproximadamente 7,0 L de dejetos por dia por cabeça. Nesta etapa, os animais variam seu peso de 25 a 100 kg (GOTARDO et al., 2017).

2.1.1 Quantificação de Dejetos Suínos no Vale do Taquari

O Vale do Taquari localiza-se na faixa central do Rio Grande do Sul e contempla 36 municípios. Os municípios de Arroio do Meio e Capitão concentram, juntos, aproximadamente 438 toneladas por ano de dejetos suínos. Além disso, estima-se que esta região gere 59,7 mil toneladas de biomassa no abate de suíno (KONRAD et al. 2016). O Vale do Taquari está entre os maiores produtores de suínos do estado do Rio Grande do Sul e, por consequência, é uma das regiões que mais gera dejetos suínos (HASAN et al., 2017). Segundo o IBGE, no ano de 2015, o Rio Grande do Sul possuía 5.948.537 cabeças de suínos. Considerando que cada animal na fase de engorda gera 7,0 L de rejeito por dia, em algum momento, a quantidade de efluente gerada por dia no estado poderia facilmente alcançar 41.639.759 L (IBGE, 2015; GOTARDO et al., 2017).

Tamanho produção se deveu ao aumento do número de suínos por meio das granjas de confinamento que possibilitam uma produção de suínos em escala industrial e, com isso, os dejetos acabaram se concentrando nas propriedades criadoras (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015). A quantidade de dejetos gerada por granja está diretamente relacionada com a quantidade de cabeças, manejo, fase de criação, equipamentos e com a quantidade de água utilizada, uma vez que, quanto maior o consumo de água, maior será o volume de dejetos suínos gerado (HASAN, 2016).

2.1.2 Caracterização dos Dejetos Suínos

Como já mencionado, o dejetos suíno varia conforme a idade do animal, peso, sexo, fase, característica da alimentação, tornando de extrema importância, conhecer os animais para que se possa realizar o tratamento correto de seus resíduos, o dimensionamento adequado de equipamentos e os corretos locais de estocagem (PINTO et al., 2014). Uma das formas de quantificar a média de dejetos gerados pelos suínos é dividindo-os pelas fases de sua criação. Assim, pode-se dividir os animais em cinco classes: engorda (25 a 100 kg), gestantes, porcas em lactação mais leitões, cachaço e creche (PASINI et al., 2019). A Tabela 1 apresenta as fases de criação e a quantidade média de dejetos suíno gerada por animal.

Tabela 1 – Dejeito suíno gerado por animal em relação à fase de criação

Fase	Esterco (kg.dia ⁻¹)	Dejetos Líquidos (L.dia ⁻¹)
Engorda	2,30	7,00
Gestantes	3,60	16,00
Porcas em lactação mais leitões	6,40	27,00
Cachaço	3,00	9,00
Creche	0,35	1,40

Fonte: Adaptado de Oliveira (1993).

Para a realização de um tratamento de dejeito suíno, é de suma importância caracterizá-lo quanto aos principais fatores de interferência (PINTO et al., 2014). A Tabela 2 apresenta as principais características do dejeito suíno.

Tabela 2 – Característica do dejeito suíno quanto à quantidade produzida, umidade, DBO₅, sólidos totais e sólidos voláteis

Variável	Unidade de Medida (kg/dia/100 kg)
Quantidade produzida	6,7
Conteúdo de umidade	75 - 85%
DBO ₅	0,20 - 0,25
Sólido totais	0,50 - 0,97
Sólidos voláteis	0,35 - 0,80

Fonte: Oliveira (1993).

Os dejetos suínos são fontes favoráveis à produção de biogás, pois apresentam uma alta carga orgânica, que pode ser verificada a partir da análise de sólidos voláteis (SV). Os SV representam a porção do dejeito (matéria orgânica) assimilável pelos microrganismos e consequentemente a parcela responsável pela geração de biogás. No caso dos suínos, os SV representam 70 a 75% dos sólidos totais (ST). A quantidade de ST encontrada no dejeito suíno varia conforme a fase de criação e o manejo (KUNZ; OLIVEIRA, 2006). A Tabela 3 apresenta as diferentes faixas de concentração em relação aos ST e correlaciona com a carga de DBO₅.

Tabela 3 – Característica do dejeito suíno relacionado com o teor de sólidos totais

Grau de Diluição	Sólidos Totais (%)	DBO (mg/L)
Concentrado	5-6	40.000
Semiconcentrado	4-5	33.000
Semidiluído	3-4	27.000
Diluído	2-3	21.000
Muito diluído	<2	15.000

Fonte: Oliveira (1993).

2.1.3 Riscos Ambientais do Dejeto Suíno

Quando se utiliza confinamento como forma de criação de suínos, acaba-se por concentrar grandes quantidades de dejetos altamente poluidores, capazes de gerar danos ao meio ambiente. O alto risco de poluição deve-se à grande concentração de microrganismos patogênicos, além da alta carga orgânica que, quando lançados em corpos d'água, sem o devido tratamento, acabam poluindo o meio, podendo implicar em impactos aos organismos aquáticos e aos usos preponderantes definidos ao corpo d'água receptor (DE CARVALHO; MELO; SOTO, 2015).

Segundo Pinto et al. (2014), a falta de tratamentos eficientes dos dejetos suínos o torna a maior fonte poluidora das regiões onde estão instalados os criadores. Isso ocorre porque o potencial poluidor é cerca de 260 vezes maior que o do esgoto doméstico. A principal forma de tratamento atual são as lagoas de estabilização, que não minimizam a geração de gases poluentes. Além disso, o reaproveitamento do dejeto como fonte de adubo gera o risco do acúmulo de micro e macronutrientes, contaminando o solo e afetando o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Os gases liberados na decomposição dos dejetos, dependendo de sua concentração, podem ser tóxicos aos seres humanos, além de provocarem desconforto devido ao mau cheiro. Os principais compostos liberados são amônia (NH_4), metano (CH_4), sulfeto de hidrogênio (H_2S), óxido nitroso (N_2O) e dióxido de carbono (CO_2) que, se não controlados, contribuem para o aquecimento global e para a formação de chuvas ácidas (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015).

2.1.4 Potencial de Uso e Reaproveitamento

Se bem gerenciado, o dejeto suíno pode ser reutilizado visando o reaproveitamento dos nutrientes e a destinação final do resíduo, minimizando impactos no meio ambiente. Para isso deve-se realizar o tratamento do dejeto para reduzir seu potencial poluidor (GOTARDO et al., 2017).

Uma das formas de reutilização dos dejetos suínos de modo sustentável, atualmente, é a que converge para a recuperação energética do resíduo (*Waste to Energy*), por meio da digestão anaeróbia, promovendo a geração de biogás e a utilização do digestato como biofertilizante. O que determina qual a forma de reaproveitamento são as características do resíduo, a quantidade e o potencial de investimento. Sendo que, para qualquer forma de reaproveitamento, é necessário realizar algum tratamento, seja ele simples ou complexo (SOUZA et al., 2016).

Entre os principais métodos de tratamento de dejetos suínos, destacam-se o físico e o biológico. O tratamento físico constitui-se da separação da parte líquida e da parte sólida através de decantação, peneiramento e centrifugação. Já o tratamento biológico é realizado pelos microrganismos que realizam fermentações aeróbia ou anaeróbia gerando biogás, neste caso, eliminando fontes patogênicas e diminuindo a carga orgânica do material (PINTO et al., 2014).

Cardoso, Oyamada e Silva (2015) define seis formas de tratamento do dejetos suíno, sendo elas: lagoas de decantação, esterqueira, bioesterqueira, biodigestor, compostagem e cama sobreposta ou biológica. O Tabela 4 apresenta as vantagens e desvantagens destes processos.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos principais processos de tratamento de dejetos suínos

PROCESSO DE TRATAMENTO	VANTAGENS	DESvantagens
LAGOAS DE DECANTAÇÃO	Baixo custo de implementação, manutenção e operação. Possui eficiente remoção de DBO e patógenos.	Causa mau cheiro devido a lagoa anaeróbica. Necessita de manutenção constante para evitar o crescimento da vegetação.
ESTERQUEIRA	Promove um fertilizante de melhor qualidade, sua construção e operação é fácil e com baixo custo.	Ocorre a concentração dos dejetos, necessitando de maiores áreas de aplicação. Possui um custo elevado de armazenamento, transporte e distribuição.
BIOESTERQUEIRA	Remove a carga orgânica e promove o aumento da qualidade do fertilizante	Possui um custo de implementação 20% maior que de uma esterqueira.
BIODIGESTOR	Gera biogás que serve como combustível e biofertilizante para ser utilizado como adubo. Diminui o poder poluente com menor tempo de retenção hidráulica. O dejetos ganha valor agregado devido a fertirrigação.	A fermentação é lenta, necessitando um tempo de detenção elevado para os sólidos. Além disso, precisa-se realizar a homogeneização para melhorar a eficiência.

PROCESSO DE TRATAMENTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
COMPOSTAGEM	Promove maior capacidade de infiltração da água no solo, reduz a erosão, melhorando a saúde do solo. Impede o crescimento de plantas indesejadas. Auxilia na proliferação das minhocas, insetos e microrganismos. Diminui a ocorrência de doenças nas plantas. Controla a temperatura e acidez do solo. Reduz a quantidade de lixo enviado a aterros sanitários. Reaproveitamento dos resíduos como adubo.	Pode ocorrer a compactação do material obstruindo a passagem de oxigênio, o que gera mau cheiro. Deve ser disposto em pilhas médias a grandes para manter a temperatura ideal do processo. Pode atrair bichos e gerar uma paisagem desagradável se não for bem cuidado. Exige monitoramento para obter um produto de qualidade.
CAMA SOBREPOSTA OU BIOLÓGICA	Baixa mão de obra para limpeza, reduz o stress animal. Custo de implantação baixo, pode ser realizado com diversos tipos de materiais. Redução à quase zero de água no dejetos. Aproveitamento como adubo. Maior produtividade.	Aumenta o consumo de água. Precisa de ventilação para expulsar o vapor de água. Maior cuidado para não haver infecções por microbactérias. Deve haver material disponível para ser usado como cama.

Fonte: Adaptado Cardoso, Oyamada e Silva (2015) com base em Perdomo (1996); Diesel, Miranda e Perdomo (2002); e Pitz, Passamai e Pereira (2009).

Atualmente o método mais utilizado no tratamento do dejetos suíno são as lagoas de decantação, devido seu baixo custo de implementação. Elas são responsáveis por diminuir a carga orgânica, permitindo sua posterior aplicação como biofertilizante. Outra forma de tratamento que vem ganhando destaque é a biodigestão, que apesar de possuir um custo de implementação mais elevado, quando comparada às esterqueiras, proporciona, além do biofertilizante, a possibilidade de geração de energia através do aproveitamento do biogás, fazendo com que o alto investimento inicial retorne com o passar do tempo (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015).

2.2 Biogás

O biogás é o resultado da degradação anaeróbia de matéria orgânica. Esta decomposição é um processo natural, promovido por microrganismos detritívoros que atacam material de origem vegetal e/ou animal. Desta forma, o biogás é considerado um recurso natural, uma vez que faz parte do ciclo do carbono (BLEY JR., 2015).

Com a necessidade de reduzir os impactos ambientais gerados pelos efluentes industrial, sanitário e da criação de animais, faz-se necessária a aplicação de técnicas mais eficientes, a fim de alcançar os parâmetros fixados pela legislação. Com isso, ocorre o aumento nos investimentos. Desta forma, a digestão anaeróbia torna-se uma opção viável para o tratamento da matéria orgânica, pois gera como subproduto o biogás, que pode ser reaproveitado como fonte de energia, amenizando assim os gastos de implantação e manutenção do sistema (KLEEREBEZEM et al., 2015).

O biogás é composto por aproximadamente 59% de gás metano (CH_4), 40% de gás carbônico (CO_2) e 1% de gases-traço, entre eles o gás sulfídrico (H_2S). O gás sulfídrico pode ser um problema quando o biogás é queimado em caldeiras, pois é altamente corrosivo, em função disso, métodos de purificação do biogás devem ser aplicados. O metano presente no biogás possui poder calorífico de $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, e o biogás com 60% de metano de $21,5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, o que representa aproximadamente 70% do poder calorífico do gás natural (BLEY JR.,2015; ROSA et al.,2016).

Segundo Oliver et al. (2008), o metano é o componente com maior importância tendo em vista seu poder calorífico. Sendo assim a concentração de CH_4 no biogás é quem determina seu potencial energético. A Tabela 5, mostra um comparativo entre o biogás com 65% de metano e demais combustíveis.

Tabela 5 – Comparação do biogás com 65% de CH_4 com outras fontes energéticas

Fonte	Biogás (m^3)	Gasolina (L)	Óleo Diesel (L)	Madeira (kg)	Eletricidade (kWh)
Equivalência	1	0,61	0,55 – 0,61	1,54 – 3,57	1,25 – 1,43

Fonte: Adaptado de Oliver et al. (2008) e Oliveira (2011).

Atualmente pouco do metano gerado em estações de tratamento é reutilizado como fonte energética. Na maioria das vezes, ele é simplesmente queimado para reduzir seu potencial poluidor, sendo que o CH_4 é 21 vezes mais poluidor que o CO_2 quando liberada para atmosfera. Desta forma, existe um amplo ambiente para desenvolvimento de técnicas de purificação do biogás para sua melhor utilização (HASAN et al., 2017).

2.2.1 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia, realizada de forma controlada em biodigestores, é uma técnica que vem sendo utilizada cada vez mais para tratamento de matérias orgânicas, a fim de diminuir seu potencial poluidor. A técnica consiste na degradação da matéria orgânica pela ação de microrganismos em ambiente isento de oxigênio, que produz biogás rico em metano (KLEEREBEZEM et al., 2015; STOCKMANN et al., 2016).

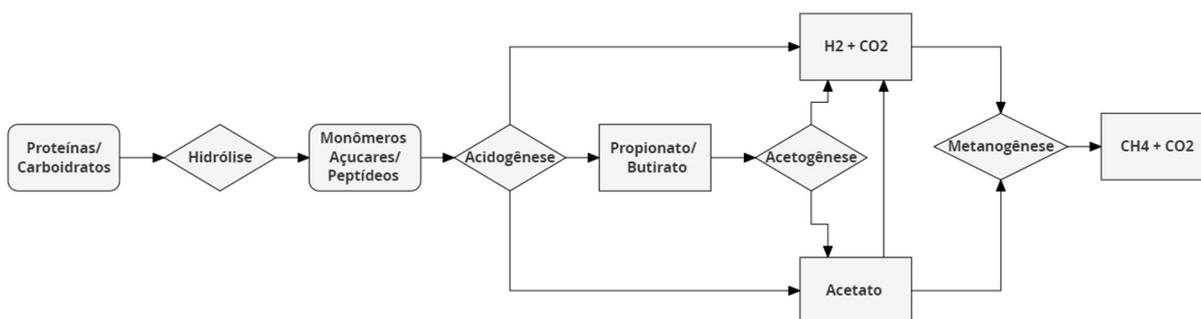
O processo de digestão anaeróbia envolve diferentes grupos de microrganismos, que se desenvolvem em simbiose para transformar a matéria orgânica em biogás. Cada grupo apresenta funções específicas, que são desenvolvidas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada fase é responsável pela degradação de um tipo de substância específica (GUERI et al., 2018; ANTES; BORTOLO; KUNZ, 2019).

A hidrólise é responsável por degradar polissacarídeos, proteínas, lipídios e substâncias de alto peso molecular, transformando-os em monômeros, através das enzimas produzidas pelos microrganismos. A etapa de hidrólise pode definir a velocidade da digestão anaeróbia quando a matéria orgânica possui compostos complexos que necessitam ser hidrolisados para posterior digestão. Dependendo do substrato o processo pode levar horas (carboidratos) ou dias (lipídios) (ANTES; BORTOLO; KUNZ, 2019).

As fases de acidogênese e acetogênese se complementam, uma vez que a primeira é responsável pela degradação da matéria orgânica de cadeia curta em ácidos, álcoois e acetonas, onde os rendimentos obtidos nessas fases dependem do tipo de microrganismos utilizado, pH e temperatura do processo. Já a segunda, converte os produtos gerados na acidogênese em substrato para a produção de metano, principalmente hidrogênio, acetato e gás carbônico (DA SILVA; DE BORTOLI, 2018; PRADO 2018).

Na etapa da metanogênese, os microrganismos transformam o acetato e o hidrogênio em metano. Nesse momento, os agentes de transformação são estritamente anaeróbios, sendo fundamental para um bom processo que todo o oxigênio tenha sido consumido em etapas anteriores para que este não iniba a formação de metano (GUERI et al., 2018). A Figura 1 apresenta o funcionamento das rotas metabólicas.

Figura 1 – Fases metabólicas da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Konrad et al. (2018).

A Tabela 6 apresenta as principais reações químicas que ocorrem em cada fase da digestão anaeróbia.

Tabela 6 – Principais reações químicas da digestão anaeróbia

Fase	Reações
Hidrólise	$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow n C_6H_{12}O_6$
Acidogênica	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow C_4H_8O_2 + 2CO_2 + 2H_2$
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_3H_6O_3$
	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
Acetogênica	$C_4H_8O_2 + 2H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + 2H_2$
	$2C_4H_8O_2 + 2H_2O + CO_2 \rightarrow 4C_2H_4O_2 + CH_4$
	$2C_4H_8O_2 + 4H_2O \rightarrow 4C_2H_4O_2 + 4H_2$
Metanogênese	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
	$C_2H_4O_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$
	$C_2H_4O_2 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + 2CO_2$
	$4H_2 + CO_2 \rightarrow C_2H_4O_2 + 2H_2O$

Fonte: Adaptado de Da Silva e De Bortoli (2018).

2.2.2 Fatores que Influenciam a Produção de Biogás

Durante o processo de digestão anaeróbia, existem diversos microrganismos em ação simultânea, sendo necessário considerar que o produto metabólico gerado por uns, torna-se o substrato de outros. Dessa forma, é de suma importância que alguns parâmetros sejam controlados por apresentarem maior interferência nas reações e, por consequência, influenciarem no rendimento de metano no biogás. A etapa mais sensível do processo é a metanogênese, que é a etapa onde forma-se o metano (HASAN, 2016).

2.2.2.1 Temperatura

Segundo Antes, Bortolo e Kunz (2019), a temperatura possui grande influência sobre os microrganismos, pois afeta no seu desenvolvimento, sendo que estes são classificados conforme a sua temperatura ótima de crescimento. Onde os psicrófilos apresentam como temperatura ótima, temperaturas na faixa de 15 °C, já os mesófilos necessitam de temperaturas mais elevadas (37 °C), enquanto que os termófilos atuam em temperaturas na faixa de 60 °C. O aumento de temperatura pode trazer benefícios para a digestão anaeróbia, como eliminação de patógenos, maior solubilidade de compostos orgânicos, porém traz malefícios como maior dissociação de amônia, que é um inibidor microbiológico.

A temperatura tem alta influência sobre o rendimento de metano na produção de biogás, pois é um dos fatores que afetam a ação enzimática. Existem temperaturas mínimas, ótimas e máximas, sendo que o melhor rendimento se dá em temperatura ótima, quando este parâmetro varia para o mínimo, o rendimento diminui assim como a qualidade do biogás, já se a temperatura for muito alta pode ocorrer a desnaturação enzimática, ocasionando a parada da produção. Sendo adotada como melhor temperatura para a produção de biogás de 35 à 37 °C (GUERI et al., 2018).

2.2.2.2 pH e Alcalinidade

O pH é um dos fatores que interferem na estabilidade da digestão anaeróbia, pois quando não controlado pode exercer ação inibidora sobre os microrganismos. A faixa ideal de pH para a produção de biogás com elevado teor de metano é de 6,5 a 7,8. Essa é a melhor faixa visto que os microrganismos acidogênicos são os mais resistentes a pH abaixo de 6 e os metanogênicos necessitam de pH neutro, na faixa de 7 a 8. As principais interferências no pH ocorrem quando se acumulam ácidos graxos voláteis no meio (formados na etapa de acidogênese), fazendo com que o meio fique ácido. Isso pode acontecer quando se adiciona uma carga orgânica excessiva no sistema. O meio alcalino, por outro lado, ocorre quando existe a alimentação do sistema com grandes cargas de proteínas que se hidrolisam liberando amônia o que eleva o pH (AKUNNA, 2018).

Segundo Debiase et al. (2018), a alta alcalinidade na digestão anaeróbia é uma característica positiva, uma vez que, isso não significa pH elevado mas sim que existe uma alta concentração de radicais alcalinos capazes de neutralizar os ácidos formados durante o processo. Essa característica faz com que o sistema permaneça tamponado evitando assim grandes variações de pH.

2.2.2.3 Nutrientes

Os nutrientes são essenciais na digestão anaeróbia por propiciarem o desenvolvimento dos microrganismos, permitindo a metabolização da matéria orgânica. Podem-se citar como principais nutrientes o carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), assim como os minerais enxofre (S), magnésio (Mg), cálcio (Ca), ferro (Fe) e potássio (K). As principais fontes de nutriente são provenientes da hidrólise de carboidratos, lipídios e proteínas. Para um bom desempenho dos microrganismos e um bom rendimento na produção de biogás é necessário que os nutrientes estejam em equilíbrio (GUERI et al., 2018).

Segundo Akunna (2018), pode-se considerar carbono e nitrogênio como macronutrientes por apresentarem maior relevância na digestão anaeróbia. Fósforo e enxofre são considerados micronutrientes. A proporção ideal entre estes compostos químicos varia de acordo com a fase de digestão, sendo que para a hidrólise e acidogênese a melhor relação C/N/P/S é de 500/15/5/3 respectivamente, já na fase de metanogênese a melhor proporção é 600/15/5/3 respectivamente.

2.2.2.4 Concentração de Sólidos

Os sólidos totais (ST) representam a quantidade de sólidos presentes no resíduo. Estes ainda podem ser divididos em sólidos voláteis (SV), que se caracterizam por corresponder à fração orgânica do resíduo responsável pela geração do biogás, e sólidos fixos (SF), que correspondem aos compostos inorgânicos. Desta forma, quanto maiores os níveis de SV presentes no resíduo, mais indicado serão os processos biológicos de tratamento, como a digestão anaeróbia. Além disso, o SV é o parâmetro utilizado para calcular o rendimento da

produção de biogás sendo considerada a conversão da massa de SV em biogás (LEITE; POVINELLI, 1999; MAAMRI; AMRANI, 2014).

Conforme Viriato et al. (2015), outro parâmetro de grande influência no rendimento da produção de biogás é a granulometria dos sólidos, já que ela afeta diretamente a fase de hidrólise. Quanto menor o tamanho das partículas, maior será a superfície disponível para que ocorram as reações, otimizando assim, a primeira fase do processo de produção de biogás.

2.2.2.5 Tempo de Detenção Hidráulica

O tempo de detenção hidráulica (TDH) corresponde ao tempo em que o resíduo permanece dentro do reator. Este fator varia conforme as características dos dejetos, uma vez que representa o tempo necessário para que a matéria orgânica seja digerida (HASAN, 2016; AKUNNA, 2018). Este parâmetro é de suma importância para garantir a eficiência do biorreator, pois se o TDH for muito elevado, existe um desperdício energético. Caso seja muito curto, os microrganismos podem não conseguir degradar toda a matéria orgânica disponível. Além disso, é necessário cuidar o tempo de reprodução microbiana, pois o TDH deve ser maior que este para não ocasionar a diminuição da colônia de microrganismos no biodigestor (FNR, 2010).

O TDH varia conforme o método de tratamento utilizado para estabilização do rejeito. Para dejetos suíno tratados a partir de lagoas de estabilização, o TDH total é de aproximadamente 105 dias, sendo 45 para a lagoa aeróbia, 35 para a lagoa facultativa e 25 para a segunda lagoa facultativa. Se o tratamento utilizado for a compostagem o TDH fica entorno de 90 dias para o sistema tradicional, podendo ser reduzido com a adição de componentes químicos e/ou biológicos. Já para o sistema anaeróbio o TDH varia de 20 a 30 dias (CAMPOS et al., 2016; ARAUJO, 2017; HERMES, 2019).

2.2.2.6 Inibidores da Digestão Anaeróbia

A inibição microbiológica de sistemas de tratamento anaeróbio pode ocorrer com a entrada de agentes contaminantes que prejudicam o desenvolvimento das bactérias, levando a

um desequilíbrio na população e até mesmo à sua inativação, reduzindo assim a produção de biogás (HASAN, 2016).

Existem diversos inibidores para o processo de digestão anaeróbia, relacionados com a substância e sua concentração no meio. Além dos fatores de temperatura, pH e nutrientes, os principais agentes inibidores são nitratos, cianetos, fenóis, metais pesados, sódio, potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio amoniacal e oxigênio (GUERI et al., 2018).

A relação entre carbono (C) e nitrogênio (N) pode inibir o desenvolvimento microbiano. Valores de C/N elevados afetam o crescimento dos microrganismos, já para valores baixos, pode ocorrer a maior produção de amônia (NH₃) que é tóxica às bactérias (AKUNNA, 2018). A faixa de relação C/N considerada ideal para a digestão anaeróbia é de 20/1 (GUERI et al., 2018).

Outro inibidor da digestão anaeróbia são os antibióticos que podem estar presentes nos dejetos suínos, e que promovem a morte dos microrganismos. Estes aparecem devido a tratamentos realizados no animal (suíno) para combater infecções ou devido a aditivos que são adicionados nas rações para melhorar o crescimento. Entre os principais antibióticos utilizados como aditivos pode-se citar a penicilina, cefalosporina, quinolonas, sulfa-trimetropim, macrolídeos, entre outros (STEINMETZ, 2016; RODRIGUES, 2019).

2.3 Efluente do Biodigestor

Os dejetos suínos tratados em biodigestor promovem a estabilização da biomassa e a produção de metano na forma de biogás. Após a digestão anaeróbia, o efluente estabilizado que sai do biodigestor é chamado de digestato, este possui nutrientes que favorecem o seu uso como biofertilizante nas lavouras (SCHISSI, 2015).

2.3.1 Caracterização

O digestato oriundo do processo de digestão anaeróbia de dejetos suínos é, normalmente, rico em Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), nutrientes requisitados no desenvolvimento das plantas e culturas agrícolas sob análise da demanda do solo. O efluente do biodigestor

possui uma carga de N, P e K, muito elevada e, por vezes, inviabiliza a distribuição no solo. Para estes casos, existem os tratamentos que visam remover N e P, evitando contaminações de solo e da água. A Tabela 7 apresenta as características do digestato provenientes de biorreatores (NICOLOSO et al., 2019).

Tabela 7 – Características do digestato proveniente do de biorreatores

Tipo de granja	Animais alojados		Biofertilizante				
	Número	Categoria	ST g.L ⁻¹	N mg.L ⁻¹	N-NH ₄ mg.L ⁻¹	P ₂ O ₅ mg.L ⁻¹	K ₂ O mg.L ⁻¹
UPL	280	Matrizes	2,3	550	508	71	384
UPL	400	Matrizes	14,8	2.008	1.527	850	576
UPL	300	Matrizes	9,9	1.718	1.401	370	715
UPL	150	Matrizes	3,1	862	783	86	515
UCT	250	Suínos	38,5	4.089	2.568	1.670	1.257
UCT	750	Suínos	4,2	987	954	31	919
UCT	1000	Suínos	27,0	2.232	1.301	940	934
UCT	260	Suínos	3,6	771	731	41	909
CC	150	Matrizes	1,7	125	94	29	447
UC	1500	Leitões	19,4	2.376	1.843	352	1.438

UPL: Unidade produtora de leitões; UCT: Unidade de crescimento e terminação; CC: ciclo completo; UC: unidade de creche

Fonte: Nicoloso et al. (2019).

Apesar de os dejetos suínos apresentarem características similares dentro das fases de criação, é possível notar que, dependendo do manejo, do tipo de biodigestor, controle da quantidade de água utilizada e o tempo de armazenamento do digestato, variam as concentrações de N, N-NH₄, P₂O₅, K₂O do efluente (NICOLOSO et al., 2019).

2.3.2 Potencial de Reaproveitamento

A principal forma, e mais econômica, de realizar o reaproveitamento do digestato é a aplicação em solo como forma de adubação. No entanto, devido às altas cargas de N e P, estes podem ocasionar problemas como eutrofização das águas, influenciando na dinâmica de oxigênio dissolvido e no acúmulo de nutrientes no solo. Por isso, umas das formas de evitar este problema é realizar o tratamento para remoção das cargas e dos excessos de N e P, para posterior utilização (ANTES; BORTOLO; KUNZ, 2019).

2.3.2.1 Nitrogênio

Na agricultura, o nitrogênio (N) é um nutriente determinante para o metabolismo das plantas e, por consequência, influencia no rendimento da produção, por isso usam-se fertilizantes para corrigir a deficiência do solo (BATISTA et al., 2018). Conforme Seidel et al. (2010), um método de fertilização é a utilização de dejetos suínos para suprir a necessidade de nitrogênio, onde o dejetos suíno pode substituir a adubação química com ureia no cultivo de milho, sem interferir no rendimento da produção.

2.3.2.2 Fósforo

O fósforo (P) é um macro nutriente necessário para praticamente todas as espécies, sejam vegetais ou animais. É um composto vital para garantir a produção de alimentos. Com isso, é de suma importância conseguir reutilizar o P, presente nos dejetos suínos para evitar a mineração, tornando assim os processos produtivos mais sustentáveis (PENG et al., 2018).

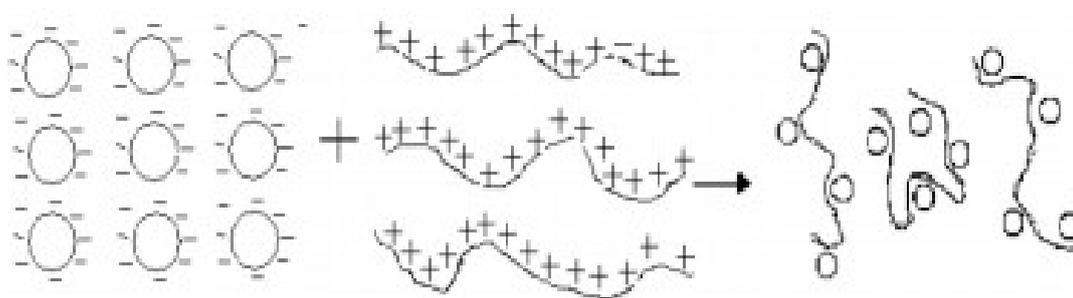
2.3.3 Tratamentos Físicos e Químicos

Os métodos utilizados para tratar efluentes podem ser classificados em físico, químico e biológico. O método físico remove as impurezas, levando em consideração a viscosidade, tamanho de partícula, densidade. Já o químico, depende das propriedades químicas do efluente e de produtos adicionados. E o método biológico, realiza o tratamento através da ação dos microrganismos, que realizam as reações bioquímicas para remover os contaminantes (AMARAL; SANTOS, 2018).

No método químico, é possível se utilizar de coagulação e floculação para a remoção de sólidos coloidais e dissolvidos, através da adição de um coagulante que desestabiliza as cargas das moléculas permitindo que estas precipitem e se aglomerem. Na sequência, é adicionado o agente de floculação responsável por agrupar os coágulos em flocos de maior tamanho, estes crescem e decantam pela ação da gravidade (RODRIGUES; TAFARREL, 2018).

No efluente a ser tratado, podemos ter partículas muito pequenas com tamanhos de 0,001 a 100 μm , que não sedimentam pela ação da gravidade, fazendo necessária a coagulação destas partículas para que se aglomerem em flocos maiores e mais densos e então sejam removidas. Ao adicionar um agente coagulante, orgânico ou inorgânico, tem-se por objetivo desestabilizar as cargas presentes no efluente e gerar hidróxidos com carga positiva que irão se unir aos colóides que possuem carga negativa. Nessa fase é necessária forte agitação para realizar a mistura. O mecanismo de coagulação é apresentado na Figura 2 (LIMA, 2018).

Figura 2 – Mecanismo de coagulação



Fonte: Lima (2018).

Após a coagulação, é necessário realizar a floculação dos aglomerados que precipitaram. São utilizados polímeros de cadeias longas, responsáveis por unir os coágulos, formando os flocos. Nesta etapa, a velocidade de agitação deve ser moderada, a fim de propiciar a formação de novos flocos e não desestabilizar os já existentes (JÚNIOR; ABREU, 2018; LIMA, 2018).

A coagulo-floculação é uma técnica utilizada no tratamento de esgotos com a finalidade de remover matéria orgânica, fósforo, e sólido do efluente. Além disso, esse tratamento quando aplicado na fase inicial do tratamento reduz os volumes de efluentes das etapas seguintes facilitando assim o tratamento do efluente em ETE com restrições de áreas (VIEIRA, 2017).

2.3.3.1 Agentes Utilizados na Coagulação e Floculação

Os coagulantes podem ser de origem inorgânica, sendo os mais utilizados o sulfato de alumínio, policloreto de alumínio, sulfato ferroso e cloreto férrico. No entanto, com a crescente necessidade de substituição dos produtos químicos por naturais, outros coagulantes acabaram sendo estudados e desenvolvidos, como no caso dos taninos, quitosanas entre outros. A

dosagem, e o tipo de coagulante a ser utilizado, deve ser determinada por testes em bancadas levando em consideração o melhor custo benefício (JÚNIOR; ABREU, 2018).

Os floculantes, também conhecidos como polieletrólitos, podem ser classificados quanto a sua natureza em mineral ou orgânico, em relação a sua origem em natural ou sintético e conforme a sua carga elétrica em não iônico, catiônico e aniônico. Assim como o coagulante, para determinar qual é o melhor e qual a dosagem ideal deve-se realizar testes no efluente e definir em relação ao melhor custo benefício (LIMA, 2018).

2.4 Características de Água Para Reuso

A água para reuso é classificada pela NBR 13969 de 1997 em quatro classes, sendo que seu nível de tratamento e aplicação varia para cada classe. As características do efluente e sua possibilidade de reuso são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características do efluente e sua aplicação de reuso

Classe	Características	Reuso possível
1	Turbidez inferior a cinco Coliforme fecal inferior a 200 NPM/100 mL Sólidos dissolvidos totais inferior a 200 mg/L pH entre 6,0 e 8,0 Cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L	Lavagem de carro e demais usos que necessitam contato direto com o usuário. Classificam-se aqui também os chafarizes.
2	Turbidez inferior a cinco Coliforme fecal inferior a 500 NPM/100 mL Cloro residual superior 0,5 mg/L	Lavagem de piso, calçadas, irrigação de jardins, manutenção de lagos.
3	Turbidez inferior a 10 Coliforme fecal inferior a 500 NPM/100 mL	Reuso nas descargas dos vasos sanitários.
4	Coliforme fecal inferior a 5000 NPM/100 mL Oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L As aplicações devem ser cessadas pelo menos 10 dias antes da colheita	Irrigação ou escoamento superficial em pomares, cereais pastagens para gado.

Fonte: NBR 13969 (1997).

Em 2020, o Conselho Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul (CONSEMA) publicou a Resolução 419/2020, estabelecendo critérios para a utilização não potável de água de reuso proveniente de efluentes líquido tratados para fins agrícolas, florestais, urbanos ou industriais. No que diz respeito ao reaproveitamento de efluentes tratados para fins agrícolas ou florestais, esta resolução define os parâmetros e padrões máximos para a água de reuso, que podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros que a água de reuso deve atender para fins agrícolas e florestais

PARÂMETROS	PADRÃO DE QUALIDADE
pH	Entre 6 e 9
Alumínio	5 mg/L
Arsênio	0,1 mg/L
Bário	5 mg/L
Boro	0,5 mg/L
Cádmio	0,01 mg/L
Chumbo	0,5 mg/L
Cianeto	0,2 mg/L
Cloreto	106,5 mg/L
Cobalto	0,05 mg/L
Cobre	0,2 mg/L
Cromo total	0,5 mg/L
Cromo hexavalente	0,1 mg/L
Ferro	5 mg/L
Fluoreto	10 mg/L
Manganês	0,2 mg/L
Mercúrio	0,01 mg/L
Molibdênio	0,5 mg/L
Níquel	0,2 mg/L
Selênio	0,02 mg/L
Sulfeto	1 mg/L
Vanádio	0,1 mg/L
Zinco	2 mg/L
Óleos e Graxas: mineral	10 mg/L
Óleos e graxas: vegetal ou animal	30 mg/L
Fenóis totais	0,1 mg/L
Coliformes Termotolerantes	104 NMP/100 mL
Ovos de helmintos	1 Ovo/L

Fonte: Resolução CONSEMA nº 419 (2020).

Além disso, o solo deve ser avaliado antes da primeira aplicação nos seguintes parâmetros: pH, fósforo, alumínio, magnésio, condutividade elétrica, percentual de sódio trocável, matéria orgânica, cálcio, potássio, entre outros. A taxa de aplicação será calculada com base na concentração de nitrogênio total, potássio e fósforo presentes na água. Devendo ser levadas em consideração as recomendações de adubação para cada cultura constantes no “Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina”. Além disso, é proibida a aplicação da água de reuso para irrigação de frutos, raízes, tubérculos

e hortaliças que permanecem em contato direto com o solo ou com a água de reuso e que são consumidas cruas.

Para lançamento de efluentes industriais tratados em corpo hídrico receptor, no estado do Rio Grande do Sul, os parâmetros devem atender a resolução CONSEMA nº 355 de 2017, onde são definidos os valores máximos permitidos. As Tabelas 10 e 11 apresentam alguns parâmetros que devem ser atendidos.

Tabela 10 – Padrões para lançamento de efluente tratado em corpo hídrico receptor

Parâmetro	Padrão de Emissão
Temperatura	≤ 40°C
Sulfeto	0,2 mg/L
Sólidos Sedimentáveis	≤ 1,0 mL/L em teste de 1 hora em Cone Imhoff
pH	6,0 a 9,0
Óleos e graxas vegetal ou animal	≤ 30 mg/L
Odor	Livre de odor desagradável
Materiais flutuantes	Ausente
Ferro total	10 mg/L
Cor	Não deve conferir mudança de coloração ao corpo hídrico receptor

Fonte: Resolução CONSEMA nº 355 (2017).

Tabela 11 – Parâmetros de DBO₅, DQO, Sólidos Solúveis Totais, Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal, Coliformes Termotolerantes, conforme a vazão de lançamento

Faixa de vazão do efluente (m ³ /d)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Fósforo Total		Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Coliformes Termotolerantes	
				mg/L	Eficiência		NMP/100mL	Eficiência
Q < 100	120	330	140	4	75%	20	10 ⁵	95%
100 ≤ Q < 500	110	330	125	3	75%	20	10 ⁴	95%
500 ≤ Q < 1000	80	300	100	3	75%	20	10 ⁴	95%
1000 ≤ Q < 3000	70	260	80	2	75%	20	10 ⁴	95%
3000 ≤ Q < 7000	60	200	70	2	75%	20	10 ⁴	95%
7000 ≤ Q < 10000	50	180	60	2	75%	20	10 ⁴	95%
10000 ≤ Q	40	150	50	1	75%	20	10 ³	99%

Fonte: Resolução CONSEMA nº 355 (2017).

2.5 Aplicação do Sólido em Lavouras

Hoje, no Brasil, o principal destino para os dejetos suínos, pós-maturação em esterqueira e tanques de armazenamento, é a aplicação em solo como forma de adubação. Contudo, são necessárias análises dos solos, uma vez que o excesso de nutrientes também é prejudicial. Com a utilização controlada dos resíduos da suinocultura é possível reduzir a utilização de fertilizantes químicos, ampliando a sustentabilidade das condutas na área agrícola (VIVAN,

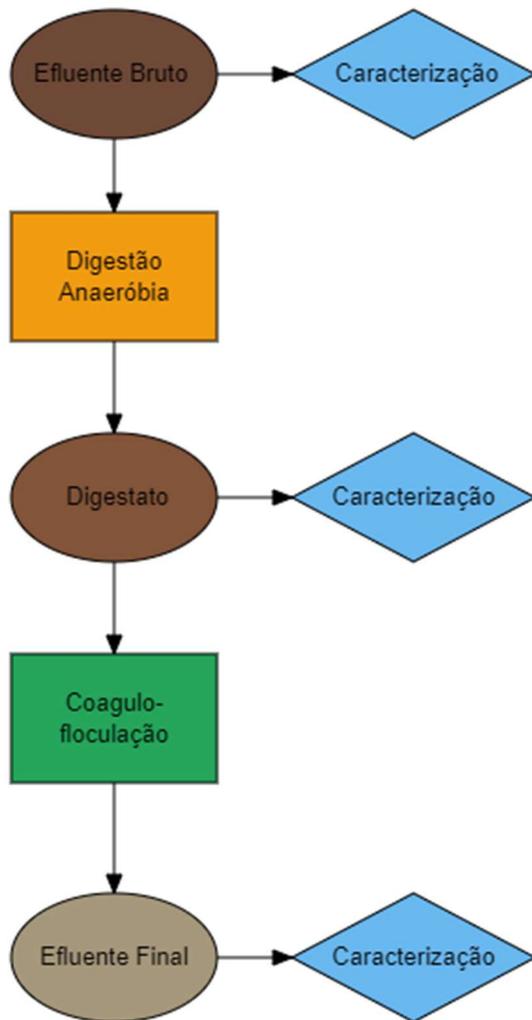
2012). Segundo Nicoloso et al. (2019) a utilização do digestato como fertilizante para lavouras, reduz os custos com implementação e tratamento do resíduo oriundo do biodigestor. A quantidade de dejetos a ser disposta no solo varia com a demanda de nutrientes do próprio solo e da cultura a ser plantada. Dartora, Perdomo e Tumelero (1998) indica para a cultura do milho $60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ de dejetos suínos, para Oliveira (1993) o ideal seria $45 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para esta cultura.

3 METODOLOGIA

A digestão anaeróbia do dejetos suíno é uma alternativa interessante para a realização do tratamento, pois gera, como subproduto, o biogás, que possui valor agregado. Porém, para avaliar se a rota metabólica é viável, é necessário conhecer as características do resíduo utilizado na produção de biogás e a sua biodegradabilidade. Além disso, esses são parâmetros fundamentais para o dimensionamento de biorreatores (STEINMETZ et al., 2014).

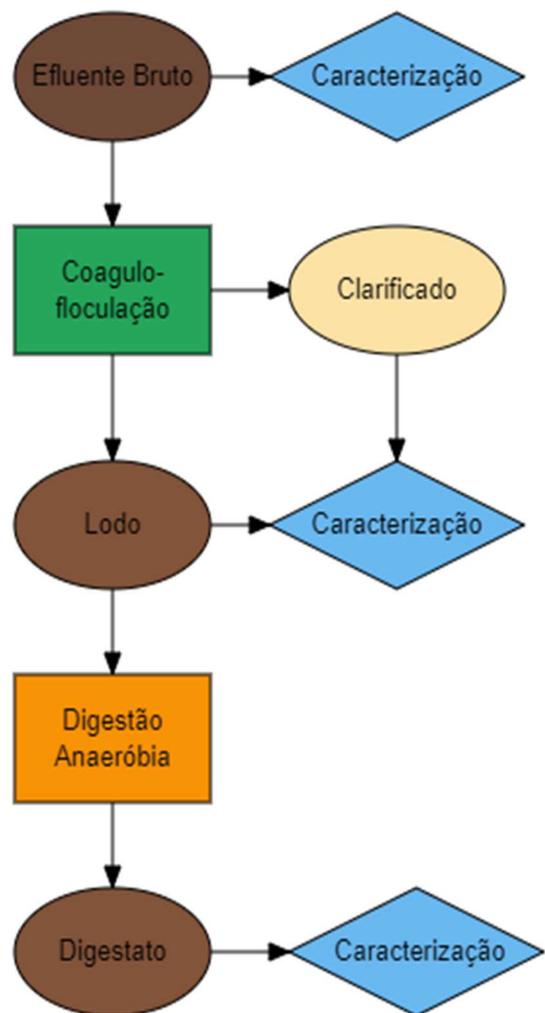
Neste sentido, para avaliar as características do dejetos suíno, foram realizadas as análises de pH, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos sedimentáveis (SS), nitrogênio (N), Amônia (NH_3), fósforo (P), alumínio (Al) coliformes fecais, turbidez e cor. As análises foram realizadas no Laboratório de Biorreatores da Univates, com exceção da análise de P, Al, coliformes fecais que foram realizadas em laboratório terceirizado. A avaliação do efluente através das análises ocorreu em três momentos distintos, no efluente bruto, após a digestão anaeróbia e após tratamentos físicos e químicos. A amônia foi avaliada no efluente bruto e no lodo do tratamento de coagulo-floculação, por se caracterizar como um inibidor da digestão anaeróbia. As análises de Al, coliformes fecais, turbidez e cor foram realizadas apenas no clarificado, pois são parâmetros necessários para classificar a água de reuso. As Figuras 3 e 4 apresentam os fluxogramas dos dois modelos de tratamento avaliados neste trabalho, com as indicações dos momentos onde foram realizadas as caracterizações do dejetos/efluente.

Figura 3 – Fluxograma do primeiro modelo de tratamento de efluente



Fonte: Do Autor (2020).

Figura 4 – Fluxograma do segundo modelo de tratamento de efluente



Fonte: Do Autor (2020).

Em ambos os casos, foram realizadas três amostragens a fim de obter dados suficientes para a formação das conclusões do trabalho. A primeira amostragem é importante para caracterizar o efluente a ser tratado. A segunda amostragem informa a eficiência do primeiro processo e é fundamental para medir a eficiência do segundo processo de tratamento. Já a terceira amostra caracteriza o efluente final permitindo a comparação dos parâmetros com a legislação e, desta forma, possibilitando um parecer final sobre a eficiência do tratamento como um todo.

3.1 Estudo de Caso

O presente trabalho foi um estudo de caso de uma propriedade rural que produz suínos para abate, localizada na estrada Passo do Corvo, bairro São Caetano, em Arroio do Meio, Rio Grande do Sul. Atualmente, a capacidade de engorda é de 3.000 cabeças, porém existe a perspectiva de crescimento para 10.000 animais e, com isso, uma demanda pela melhora do tratamento do efluente para reaproveitá-lo da melhor forma possível sem gerar prejuízos ao meio ambiente. Atualmente, são gerados na propriedade 24 metros cúbicos de dejetos suínos (efluente) por dia os quais são estabilizados em esterqueira e posteriormente aplicado em solo como biofertilizante. A Figura 5 apresenta a localização da propriedade.

Figura 5 – Localização da propriedade



Fonte: Google Maps (2019).

3.2 Procedimentos Experimentais

A presente pesquisa foi realizada em escala laboratorial, no Laboratório de Saneamento Ambiental, vinculado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UNIVATES.

3.2.1 Coleta das Amostras

A coleta do material para análise é considerada uma etapa delicada, pois é necessário que as amostras possuam uma alta representatividade do todo para evitar resultados equivocados. Além disso, deve-se utilizar embalagens limpas para armazenamento, as quais devem ser ambientadas através da lavagem com amostra por três vezes. Para o transporte, as amostras de dejetos suíno não devem ficar expostas ao sol e quando o tempo entre o local de coleta e o laboratório for superior a 4 horas, estas deverão ser refrigeradas (KUNZ; PALHARES; 2004).

A amostra foi coletada na entrada do sistema de tratamento implantado na propriedade rural e foi armazenada em embalagens plásticas. Como o tempo de transporte até o laboratório não excedeu 4 horas, não foi necessário refrigerá-las.

3.2.2 Ensaio de Digestão Anaeróbia

O ensaio de digestão anaeróbia foi realizado em reatores de vidro, com capacidade de 5 L, 2 L e 1 L em regime de batelada. Neste tipo de processo a alimentação do reator ocorre exclusivamente no início da operação, posteriormente o reator foi fechado hermeticamente, impedindo a entrada de oxigênio. Ele foi aberto novamente no final quando não havia mais produção de biogás para a retirada da matéria orgânica decomposta, chamada também de digestato (NETO et al., 2010). Como critério de encerramento do experimento foi considerada a indicação da norma VDI 4630 (2006), em que se considera encerrado o experimento quando o percentual de biogás acumulado das triplicatas apresentar valor menor que 1% do volume total acumulado.

A temperatura de digestão anaeróbia foi mantida na faixa mesofílica de 35 °C. A quantidade de metano centesimal presente no biogás foi medida a partir do sensor Advanced Gasmittler, produzido pela empresa PRONOVA Analysentechnik GmbH & Co, que indica a quantidade de metano presente na mistura gasosa. As análises foram realizadas nas segundas-feiras, quartas-feiras e sextas-feiras. Nos dias intermediários, foi considerada a média dos valores lidos.

3.2.3 Ensaio de *Jar Test* do Digestato

Após a digestão anaeróbia, o digestato passou por uma decantação em cone Imhoff para a separação dos sólidos sedimentáveis por um período de 60 minutos. Após, o sobrenadante foi tratado por coagulo-floculação para a eliminação de sólidos suspensos.

Para a realização do teste de coagulo-floculação, foi utilizado o equipamento *Jar Test*, que é composto por jarros com pás responsável pela mistura do coagulante e do floculante na solução. No teste de bancada, foi utilizado um equipamento *Jar Test* da marca Policontrol modelo FlocControl com 6 jarros e capacidade de 1 L cada. O teste de coagulo-floculação em bancada é importante para avaliar a melhor dosagem de coagulante e floculante possibilitando assim a aplicação da dosagem ideal de produto afim de obter o melhor rendimento com o menor custo.

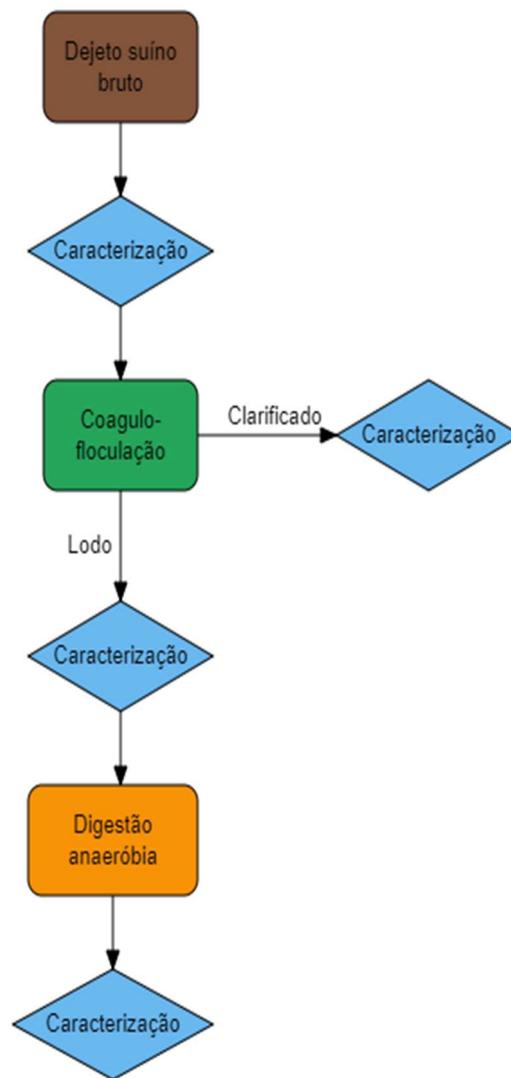
O teste de coagulo-floculação foi realizado em dois momentos distintos. O primeiro teste foi aplicado no dejetto suíno após a digestão anaeróbia, com a finalidade de concentrar os sólidos no lodo e gerar um clarificado. Essa primeira etapa também possibilitou avaliar e testar os coagulantes e suas dosagens. Na segunda etapa, o dejetto suíno bruto foi submetido ao teste de coagulo-floculação, utilizando-se os ensaios da primeira etapa como norteadores para as dosagens aplicadas no dejetto bruto. As Figuras 6 e 7 apresentam os fluxogramas do primeiro e segundo teste respectivamente.

Figura 6 – Fluxograma da primeira avaliação



Fonte: Do Autor (2020).

Figura 7 – Fluxograma da segunda avaliação



Fonte: Do Autor (2020).

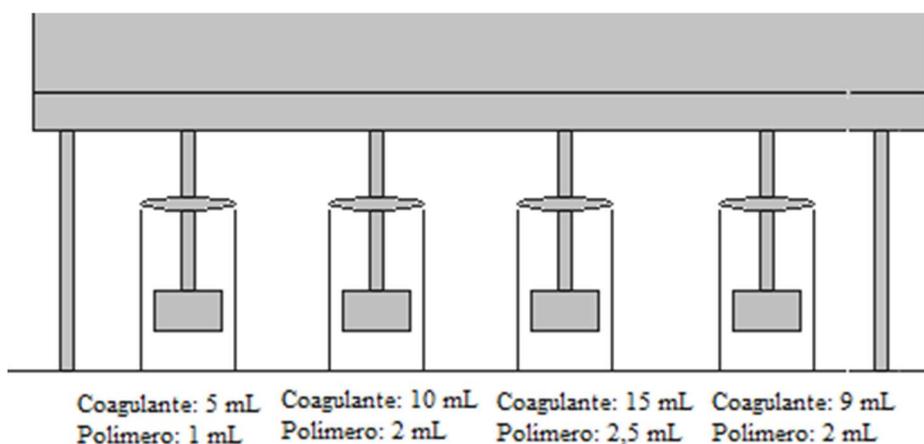
O procedimento de *Jar Test* foi utilizado para a avaliação da melhor dosagem de coagulante e polímero necessária para sedimentar os sólidos presentes no dejeto suíno de forma a proporcionar um clarificado e um lodo de boa qualidade. Para o procedimento de escolha de melhor dosagem, foram aplicados 3 procedimentos. O primeiro foi utilizado para identificar a dosagem mínima necessária para a formação dos flocos. No segundo procedimento, foi replicado a dosagem mínima, variando os pH iniciais do dejeto em 7,5; 8,0 e 8,5 para avaliar qual pH apresenta melhor desempenho na sedimentação do dejeto suíno. Estipulou-se o pH máximo a ser testado em 8,5, para evitar grandes gastos com produtos alcalinizantes, o que inviabilizaria economicamente o estudo. No terceiro procedimento, foi utilizado o pH com

melhor desempenho, aplicando-se dosagens de coagulante de 2, 3 e 4 vezes superior a dosagem mínima.

Para a dosagem de polímero, foi adotado 1 mL por litro para o procedimento de escolha da dosagem mínima. No terceiro procedimento, adotaram-se valores de 1,5, 2 e 2,5 vezes maior que a dosagem mínima.

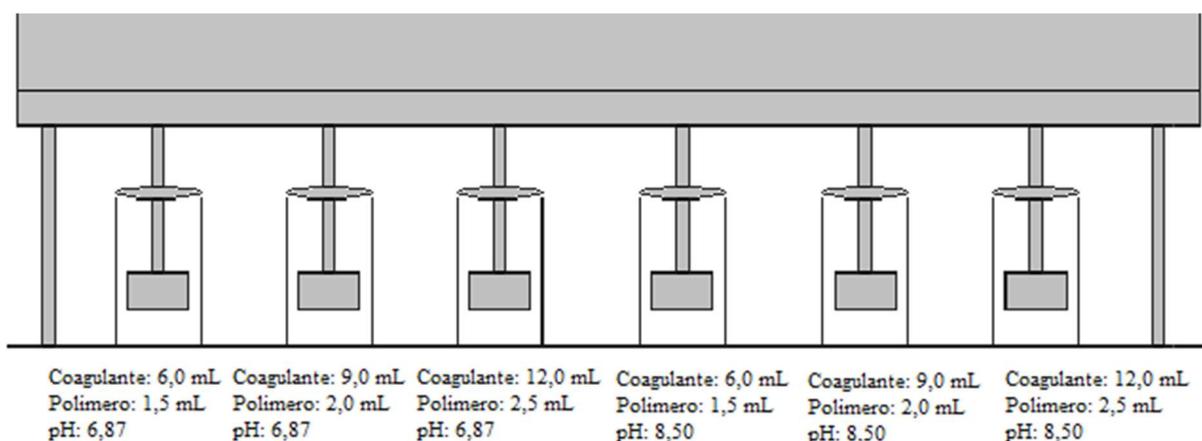
Para a realização do teste foi utilizado uma agitação turbulenta com rotação de 150 rpm por 2 minutos para mistura do coagulante e posteriormente uma agitação com rotação de 50 rpm por 15 minutos para a mistura do polímero. Avaliou-se a sedimentação após 30 minutos e 24 horas, a escolha da melhor dosagem foi feita avaliando a cor, turbidez, sedimentabilidade do lodo e menor consumo de coagulante. As dosagens utilizadas na primeira e na segunda etapa estão ilustradas nas Figuras 8 e 9 respectivamente.

Figura 8 – Dosagens utilizadas na primeira etapa de coagulo-floculação



Fonte: Do Autor (2020).

Figura 9 – Dosagens utilizadas na segunda etapa de coagulo-floculação



Fonte: Do Autor (2020).

3.3 Análises Físico-Químicas

As análises físico-químicas foram utilizadas para caracterizar o efluente e acompanhar os processos de tratamento, avaliando a capacidade de estabilização do dejetos suíno a partir da produção de biogás seguido de sedimentação.

As análises de pH, Sólidos Totais, Sólidos Voláteis, Sólidos Fixos, DQO, DBO₅ e amônia são fundamentais para avaliar o processo de biodigestão. Já para o processo de sedimentação, é importante conhecer a concentração de sólidos sedimentáveis, sólidos totais e pH. E para caracterizar o efluente final e classificá-lo conforme a NBR 13696 de 1997 e a resolução CONSEMA nº 419 de 2020, é necessário conhecer a turbidez, cor, quantidade de coliformes fecais e alumínio. Além disso, as análises de nitrogênio e fósforo indicam a eficiência do tratamento e caracterizam o efluente final quanto ao seu potencial de reaproveitamento para aplicação em cultivos agrícolas.

3.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para a avaliação do pH foi utilizado um pHmetro, marca INSTRUTHERM, modelo Ph-2000. Este equipamento possui uma faixa de leitura de zero a catorze, onde zero representa a acidez máxima, sete representa a neutralidade e catorze representa a alcalinidade máxima. Além disso, o equipamento mede a temperatura da amostra (INSTRUTHERM, 2019).

3.3.2 Sólidos Totais, Voláteis e Fixos

Os valores de sólidos são uma característica importante para o dimensionamento e operação de estações de tratamento de efluentes. A análise de sólidos totais foi realizada com o auxílio de uma estufa de secagem da marca SP LABOR, modelo SP-400.

A análise de sólidos totais ocorreu a partir do método gravimétrico 2540-B (APHA, 2012). Para a realização da análise foram utilizados cadinhos de porcelana calcinados e pesados. Colocou-se a amostra no cadinho até a mesma preencher aproximadamente 50% do volume do cadinho e pesou-se novamente. Em seguida a amostra foi colocada na estufa de secagem com

temperatura de 104 °C por um período 24 horas para que a água presente na amostra evapore. Após o tempo e secagem as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente em um dessecador de vidro hermeticamente fechado. Por fim pesou-se novamente o cadinho contendo a amostra seca. A partir da Equação 1 foi possível calcular o percentual de sólidos presentes na amostra.

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{(A-B)}{C-B} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A = Peso pós estufa

B = Peso da capsula

C = Peso da capsula com amostra

As análises de sólidos voláteis e fixos foram realizadas a partir dos métodos gravimétricos 2540-D (APHA, 2012), processadas em um forno do tipo mufla da marca SP LABOR modelo SP-1200 com temperatura de 550 °C por 4 horas. Para esta análise, foi utilizado o material seco obtido no procedimento anterior. As Equações 2 e 3 foram utilizadas para calcular os valores de sólidos voláteis e sólidos fixos respectivamente.

$$\text{Sólidos Voláteis (\%)} = \frac{(A-D)}{(A-B)} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

A = Peso pós estufa

B = Peso da capsula

D = Peso pós mufla

$$\text{Sólidos Fixos (\%)} = \frac{(D-B)}{(A-B)} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

A = Peso pós estufa

B = Peso da capsula

D = Peso pós mufla

3.3.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise de DQO indica a quantidade de oxigênio necessária para degradar quimicamente a matéria orgânica presente na amostra. Este parâmetro é utilizado para avaliar o índice de contaminação dos efluentes relativo à presença de matéria orgânica (BADO; PERCIO; LINDINO, 2013).

A análise foi realizada a partir do Método Titulométrico de Refluxo Fechado 5220C do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Esta análise consiste na digestão da amostra por 2 horas em bloco digestor com sistema fechado. Ela ocorre com solução padrão de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em um meio fortemente ácido (H_2SO_4/Ag_2SO_4). Após a digestão, foi realizado a titulometria com sulfato ferroso amoniacal (FAS). A partir dos valores obtidos na titulação, utilizou-se a Equação 4 para obter o valor de DQO.

$$DQO \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(BD-A) \times Mfas \times 8000}{VA} \quad (4)$$

Onde:

BD = Volume de FAS utilizado na titulação do Branco digerido (mL)

A = Volume de FAS utilizado na titulação da Amostra (mL)

Mfas = Molaridade do FAS

VA: Volume de amostra digerida (mL)

3.3.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A análise de DBO indica a parcela de matéria orgânica biodegradável presente na amostra, por meio do oxigênio consumido pelos microrganismos durante a respiração. Esta análise deve ser realizada em temperatura controlada por um período de tempo determinado. Desta forma, a DBO_5 , significa que as amostras permaneceram incubadas por 5 dias a 20 °C (VALENTE; PADILHA; SILVA, 1997).

Na determinação da DBO_5 foi utilizado o aparelho Oxitop, marca WTW modelo Oxitop IS6. A medida foi realizada através da variação da pressão em um sistema fechado, que

monitora o oxigênio consumido pelos microrganismos durante a degradação da matéria orgânica, na faixa de leitura específica que varia de 0 a 4000 mg/L (WTW, 2008).

Para realizar a análise foi necessário diluir o efluente em frasco volumétrico de 22,5 mL, devido à alta taxa de matéria orgânica presente na amostra. Após, a amostra diluída foi acondicionada na garrafa de oxitop, onde foi adicionado uma gota de inibidor de nitrificação para evitar a ocorrência de processos químicos (FUNK; WOCHNIK, 2011). Para que o gás carbônico (CO₂) gerado na decomposição da matéria orgânica não interfira no resultado, foi colocado 2 pastilhas de hidróxido de sódio (NaOH) para reagir com o CO₂ (SANTOS; SALES; DUARTE, 2003).

As garrafas ficaram em uma incubadora a 20 °C por 5 dias. Após verificou-se o valor no visor do equipamento, este valor foi multiplicado por 100 e pelo número de diluições feitas, para obter-se o valor final de DBO₅ em mg/L.

3.3.5 Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)

Nitrogênio total significa a soma do nitrogênio orgânico mais os íons amônio. Foi utilizado o Método 4500 N C Semi-Micro-Kjeldahl publicado no *Standard Methods for Water and Wastewater Examination* (APHA, 2012). Este método utiliza a digestão ácida associada a alta temperatura para decompor a matéria orgânica. Foi adicionado à amostra ácido sulfúrico, sulfato de cobre como catalisador e ocorreu o aquecimento até 385 °C para acelerar as reações oxidativas (NOGUEIRA; SOUZA, 2005).

Para a realização da análise foi utilizado um tubo de proteína onde foi colocado 25 mL de amostra já diluída, mais 50 mL da solução de digestão composta por sulfato de potássio, sulfato de cobre e ácido sulfúrico concentrado. Na sequência, a mistura foi aquecida em um bloco digestor à 150 °C até que ocorresse a redução de 30 mL do volume inicial, posteriormente aumentou-se a temperatura até 385 °C e manteve-se por mais duas horas aproximadamente, quando a amostra apresentou cor esverdeada.

Após a digestão e com as amostras já resfriadas, foi realizada a destilação. Para isso, adicionou-se 50 mL de hidróxido de sódio à 40% com tiosulfato de sódio no destilador. Para a coleta do destilado, foi acoplado no destilador um erlenmeyer com 50 mL de ácido bórico à 2% e quatro gotas de indicador misto. Com a destilação, a cor inicial roxa do líquido presente

no erlenmeyer passou a tomar tonalidade esverdeada indicando a presença de nitrogênio. Em seguida, foi realizada a titulação do destilado com ácido sulfúrico 0,02N até retomar a cor roxa inicial. A Equação 5 apresenta o cálculo utilizado para determinação de nitrogênio total.

$$NTK (mg/L) = \frac{(A-B) \times 280 \times F}{V_a} \quad (5)$$

Onde:

A: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação da Amostra (mL)

B: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação do Branco (mL)

F: fator de correção da normalidade do ácido

Va: volume de amostra utilizado na análise

3.3.6 Amônia

Foi determinada a concentração de amônia no efluente bruto, pois em elevadas concentrações, ela atua como inibidora da digestão anaeróbia, tornando-se um parâmetro fundamental de avaliação. Para determinação de amônia, foi utilizado o método titulométrico 4500 NH₃ C, publicado no *Standard Methods for Water and Wastewater Examination* (APHA, 2012).

Para a realização do experimento, foram necessários 100mL de amostra diluída, o qual foi adicionado 25 mL de solução tampão de borato. Ajustou-se o pH para 9,5 com auxílio de NaOH 0,1N/6N e H₂SO₄ 0,02N. Após, foi realizada a destilação da amostra até a obtenção de 100 mL. O destilado foi coletado em um erlenmeyer contendo 50 mL de solução indicadora de ácido bórico como solução absorvente. Na sequência titulou-se o destilado com H₂SO₄ 0,02N padronizado até a amostra apresentar uma coloração empalidecida de alfazema. A Equação 6 apresenta o cálculo realizado para a determinação da amônia.

$$NH_3 - N (mg/L) = \frac{(A-B) \times 280 \times F}{V_a} \quad (6)$$

Onde:

A: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação da Amostra (mL)

B: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação do Branco (mL)

F: fator de correção da normalidade do ácido

Va: volume de amostra utilizado na análise

3.3.7 Sólidos Sedimentáveis

Para avaliar a quantidade de sólidos sedimentáveis presentes no efluente, foi realizado o ensaio de sedimentação com o auxílio de cones Imhoff, onde avaliou-se a quantidade de sólidos que sedimentaram no período de 60 minutos. Conforme a NBR 10561 (1988), o procedimento para determinação de sólidos sedimentáveis consiste em colocar 1 litro de amostra previamente homogeneizada no cone Imhoff e aguardar por 45 minutos. Após, realizou-se a raspagem das laterais do cone com o auxílio de um bastão para remover as partículas aderidas a parede. Aguardou-se por mais 15 minutos para realização da leitura de sólidos sedimentáveis expressa em mililitro de sólidos por litro de dejetos suíno.

3.3.8 Turbidez

A turbidez representa a quantidade de partículas em suspensão na amostra através da quantidade de luz que é espalhada ou absorvida. A técnica consiste em emitir um feixe de luz na amostra e medir a quantidade que consegue atravessá-la. A unidade de medida da turbidez é NTU (unidade nefelométrica) (PARRON; MUNIZ; PERREIRA, 2011). Para análise de turbidez, foi utilizado o turbidímetro da marca DIGIMED modelo DM-TU. Este equipamento possui uma faixa de leitura que varia de 0 a 1000 NTU com uma precisão de 0,03 NTU. (DIGIMED, 2019).

3.3.9 Cor

A cor é a radiação da energia luminosa captada pelo nervo ótico. A variação no comprimento de onda desta radiação gera diferentes percepções de cores (LÚCIDO; BILA, 2020). A cor dos efluentes pode estar relacionada com a decomposição da matéria orgânica, pela presença de metais como ferro e manganês (VAZ et al., 2010). Para análise da cor, utilizou-se o colorímetro da marca DIGIMED modelo DM-COR. Este equipamento possui uma faixa de leitura que varia de 0 a 500 PtCo (DIGIMED, 2019).

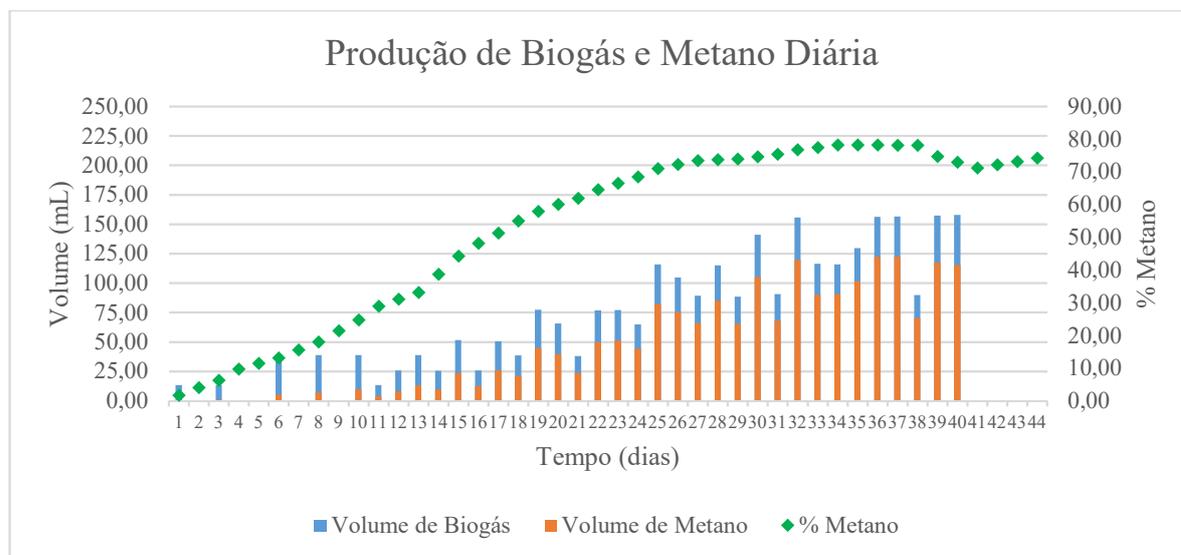
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados no laboratório. Cabe salientar que os valores aqui mostrados são as médias das triplicatas testadas.

4.1 Primeiro Ensaio de Digestão Anaeróbia

Os testes de digestão anaeróbia foram realizados em dois momentos distintos para avaliar qual seria a melhor condição de geração aplicável em escala real. O primeiro ensaio foi realizado no mês de novembro e dezembro de 2019 com o dejetos suíno bruto, sendo a digestão anaeróbia o primeiro tratamento aplicado. Neste ensaio, utilizando reatores de 2 L preenchidos com 1,8 kg de dejetos suíno, obteve-se uma produção média de biogás de 2,8 L com um percentual médio de metano de 67,71%. O processo de digestão em regime de batelada foi avaliado por um período de experimentação de 44 dias, os dados diários de produção são apresentados pelos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 – Acompanhamento da produção diária de biogás e metano

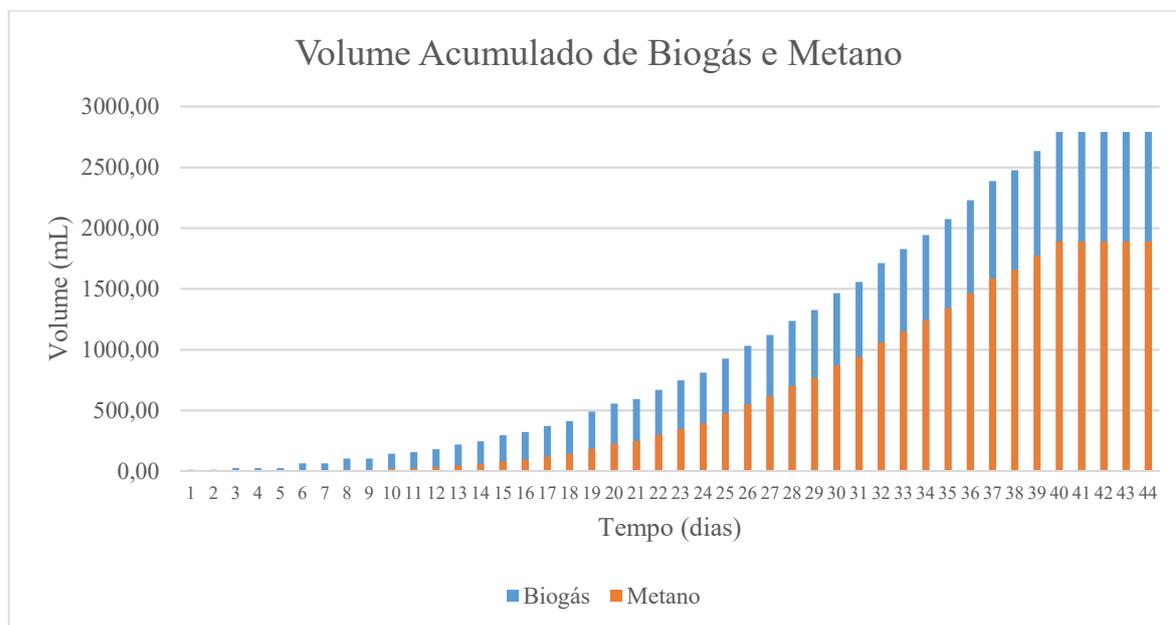


Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise do Gráfico 1, é possível perceber três fases distintas de produção de biogás e metano. A primeira fase, conhecida como *lag*, compreendeu os 9 primeiros dias de incubação. Neste período os microrganismos estão em processo de adaptação, além disso, existe oxigênio presente e o mesmo deve ser expulso para iniciar a produção de biogás com teores de metano característicos. Essa fase também é influenciada diretamente pela presença de amônia que, em elevadas concentrações, atua como um inibidor da digestão anaeróbia. Neste primeiro ensaio, a concentração de amônia identificada para o dejetos suíno foi de 2.435,92 mg/L. Chernicharo (1997) indica que para valores de amônia entre 1.500 e 3.000 mg/L pode ocorrer a inibição da digestão anaeróbia, justificando assim a demora até o “*start*” do processo ocorrer efetivamente.

Após a instabilidade inicial, a produção entrou na sua fase crescente com aumento de biogás e percentual de metano, essa fase se estendeu por 30 dias. A terceira etapa que seria a de redução e parada de produção, foi marcada por uma cessão abrupta na produção de biogás. As causas para este tipo de encerramento estão relacionadas com fatores de inibição como amônia, desequilíbrio de nutrientes ou pelo término da matéria orgânica biodegradável.

Gráfico 2 – Volume acumulado de biogás e metano



Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise do Gráfico 2, é possível visualizar a produção de biogás e metano acumulada durante o período de digestão anaeróbia. Desta forma, percebe-se que o aumento de biogás e metano foram constantes e diretamente ligados, visto que, conforme ocorria o aumento na produção de biogás, também ocorria o aumento no percentual de metano.

A produção de biogás pode ser vinculada à quantidade de sólidos voláteis (SV) presentes no efluente, visto que estes se relacionam com a parcela de matéria orgânica presente no meio. Deste modo, a avaliação da eficiência da produção de biogás pode ser dada em litros de biogás por quilograma de SV adicionadas ao reator no início do processo. A digestão anaeróbia produziu 1,55 L/kg de dejetos suínos, sendo que cada kg de dejetos continha 7,53 gramas de SV. Com isso a produção de biogás em relação ao SV foi de 206 L de biogás/kg de SV.

Ao realizar a comparação com a literatura, percebe-se que a quantidade de biogás produzida é baixa tendo em vista que Gomes e Raiher (2013) indicam que para dejetos suínos a produção é de 0,45 m³/kg de SV, ou seja, mais do que o dobro (450 L/kg de SV) do resultado obtido.

No entanto, Konrad et al. (2018) utilizando dejetos suínos da fase de terminação oriundos de uma Cooperativa do Vale do Taquari obtiveram 287,5 L de biogás/kg de SV. Considerando que a quantidade de biogás varia com a composição do dejetos e as características locais de produção, pode-se afirmar que o comparativo com Konrad et al. (2018) mostra-se mais próximo

da realidade estudada, uma vez que ambos os testes foram realizados em dejetos suínos na fase de terminação e os mesmos foram coletados no Vale do Taquari.

4.2 Análises Físicas e Químicas

As análises físicas e químicas realizadas foram fundamentais para caracterizar o dejetos suínos brutos e, posteriormente, serviram de comparativo para avaliação da digestão anaeróbia. As análises foram realizadas em triplicata, apresentando aqui, os valores médios obtidos.

4.2.1 Análise de pH e Amônia

As análises de pH foram realizadas no dejetos suínos brutos e no digestato, e os valores obtidos foram $7,84 \pm 0,013$ e $7,76 \pm 0,018$, respectivamente. Tendo em vista a pouca variação inicial e final do potencial de hidrogênio medido, e considerando a faixa ideal para a digestão anaeróbia entre 6,0 e 8,0, pode-se afirmar que o processo ocorreu dentro da faixa ideal de pH (CHERNICHARO, 1997).

A análise de amônia foi realizada somente no dejetos brutos, pois é um indicador de inibição da digestão anaeróbia. O resultado obtido foi de $2.435,92 \pm 16,59$ mg/L. Segundo Chernicharo (1997) valores acima de 3.000 mg/L, são tóxicos aos microrganismos da digestão anaeróbia, para valores entre 1.500 e 3.000 mg/L a amônia se torna inibidora se o pH for maior que 7,6. Desta forma, possivelmente a amônia tenha causado um efeito inibidor no início da digestão. Justificando assim a demora no início da produção de biogás até que o processo atingisse volumes diários crescentes. Além disso, pode estar associada aos baixos rendimentos finais obtidos, que se diferiram de alguns valores apontados em literatura para a produção de biogás que pode ser obtida a partir de dejetos suínos.

4.2.2 DQO e DBO₅

Os parâmetros de DQO e DBO₅ são fundamentais para a caracterização do dejetos suínos, já que são estes valores que indicam a quantidade de matéria orgânica total e a parcela de matéria orgânica biodegradável, disponível de forma mais acessível aos microrganismos. Além

disso, a relação DQO/DBO₅ é um indicativo importante na escolha do método de tratamento a ser aplicado (VON SPERLING, 1996). Segundo Tchobanoglous e Burton. (1991), o tratamento biológico é eficiente para efluentes que apresentem relação DQO/DBO₅ de 1 a 3. Os valores de DQO e DBO₅ inicial e final, assim como a relação entre eles, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores DQO e DBO₅ do dejetto suíno e do digestato

Substrato	Inicial			Final		
	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Relação DQO/DBO	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Relação DQO/DBO
Dejeto suíno	16.935,67 ± 623,78	9.666,67 ± 444,44	1,75	11.064,27 ± 438,73	3.666,67 ± 444,44	3,02

Fonte: Do Autor (2020).

A partir dos valores obtidos, é possível afirmar que o dejetto suíno avaliado configurou-se como uma amostra biodegradável e que a digestão anaeróbia é uma técnica eficaz na oxidação da matéria orgânica biodegradável, uma vez que, com o processo aplicado, constatou-se uma redução de 35% na DQO e 62% na DBO₅, parâmetro que representa a fração biodegradável da matéria orgânica presente no dejetto suíno e, portanto, a que pode ser mais facilmente consumida pelos microrganismos. Ainda assim, o percentual de remoção de DBO₅ esteve abaixo do que é esperado em processos de digestão anaeróbia.

Em estudos realizados com dejetto suíno, percebe-se que percentual de remoção obtido no presente estudo foi baixo. Glanpracha e Annachhatre (2016) obteve uma redução de 62% para DQO. Trevisan e Monteggia, (2009) obtiveram variações de 60 a 69% para redução de DQO utilizando reatores sequencias em batelada. A baixa produção de biogás, e a pouca redução da DQO indicam que ainda havia matéria orgânica no dejetto disponível para ser biodegradada, o que reforça a hipótese de uma inibição do processo de digestão que pode estar relacionada a alguma substância presente no dejetto ou a alguma carência por parte dos microrganismos que não conseguiram degradar a matéria orgânica. Para definir o real motivo do baixo rendimento, seriam necessárias mais avaliações, variando as concentrações do dejetto, pH e nutrientes, para poder alcançar rendimentos mais satisfatórios.

Uma das principais causas de deficiência na produção de biogás está diretamente ligada a relação C/N, com valores ideais entre 20 e 30. Quando a razão é elevada, ocorre a diminuição do crescimento microbiano, e quando esta razão é baixa, pode ocorrer a inibição da digestão anaeróbia pela toxicidade da amônia (AKUNNA, 2018). Neste sentido, considerando o valor

elevado da concentração de amônia no dejetos suíno avaliado, acredita-se que é possível ter havido um desequilíbrio na relação C/N, mas considerando que a concentração de carbono não foi quantificada, não é possível atestar esta hipótese.

4.2.3 Análise de Sólidos

A análise de sólidos é de suma importância para a identificação da fase biodegradável do dejetos suíno. Os sólidos totais (ST), são compostos pelos sólidos voláteis (SV), que é a parte orgânica do dejetos e pelos sólidos fixos (SF), que é a parcela inorgânica. Desta forma, conhecendo o ST e SV, é possível avaliar se a digestão anaeróbia é viável como tratamento, além disso, a produção de biogás é baseada em relação a massa de SV presentes no dejetos (OLIVEIRA, 2005). A Tabela 13 apresenta os valores de sólidos no dejetos bruto e no digestato.

Tabela 13 – Sólidos presente no dejetos bruto e no digestato

Amostra	ST		SV		SF	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
	%	%	%	%	%	%
1	1,44	1,32	0,75	0,62	0,69	0,70

Fonte: Do Autor (2020).

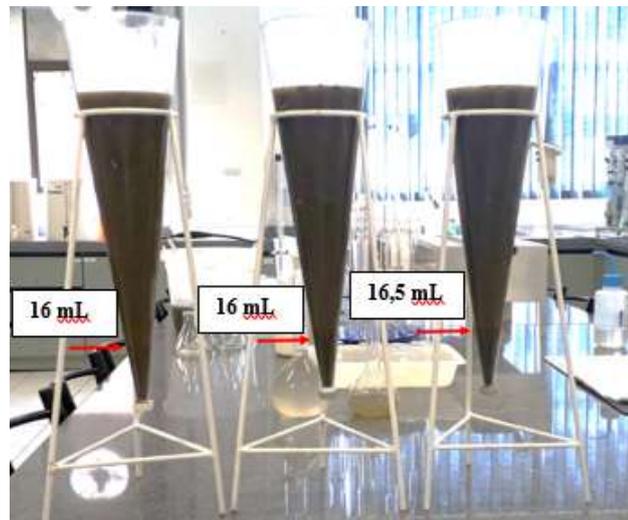
A digestão anaeróbia relaciona-se com a conversão dos sólidos voláteis em biogás, visto que os sólidos fixos são constituintes inorgânicos que não sofrem alterações durante o processo. Isso pode ser visto na Tabela 13, onde o SV da entrada e saída diminuiu 0,13%. Em relação ao aumento dos SF em 0,01%, essa variação é causada por pequenos desvios de pesagens e arredondamentos durante as análises.

Analisando os dados, verifica-se a baixa redução de SV da digestão anaeróbia o que, por consequência, explica o baixo rendimento na geração de biogás obtido. Conforme Chernicharo (1997), isto pode estar relacionado com limitações cinéticas das reações que compõem as etapas acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas, que podem ser provocadas pelo não atendimento de condições requeridas pelo processo, como nutrientes, relação C/N, ou pelo acúmulo de ácidos orgânicos como acetato, propionato e butirato que causam desequilíbrio nos processos anaeróbios.

4.2.4 Sólidos Sedimentáveis

Os sólidos sedimentáveis foram avaliados com o intuito de verificar a parcela de sólidos capaz de se sedimentar antes e após o processo de digestão anaeróbia identificando a necessidade ou não de inclusão de uma etapa específica para isso em escala real. As Figuras 10 e 11 apresentam os valores das triplicatas no dejetto suíno bruto e no digestato.

Figura 10 – Teste de sedimentação do dejetto suíno bruto



Fonte: Do Autor (2020).

Figura 11 – Teste de sedimentação no digestato



Fonte: Do Autor (2020).

O dejetto suíno bruto continha $16,17 \pm 0,22$ mL de sólidos por litro de dejetto suíno e, após a digestão anaeróbia, o valor ficou em $10,5 \pm 0,33$ mL de sólidos por litro de dejetto suíno. Conforme os valores obtidos no experimento, pode-se concluir que a digestão anaeróbia

diminui a quantidade de sólidos sedimentáveis. No entanto, essa informação não estaria coerente, visto que durante a digestão o número de microrganismos presentes aumenta significativamente e, após o seu encerramento, estes ficam no meio, aumentando a quantidade de sólidos sedimentáveis. Desta forma, acredita-se que estes valores estejam equivocados, sendo que no momento da retirada do digestato dos biorreatores, percebeu-se que uma parcela destes permaneceu incrustada na parede dos reatores, o que possivelmente, gerou um falso negativo no resultado dos sólidos sedimentáveis.

4.2.5 Nitrogênio e Fósforo

As análises de nitrogênio (N) e fósforo (P) foram realizadas para avaliar a capacidade de reutilização do digestato como biofertilizante. Para isso, foram quantificadas as concentrações destes nutrientes na entrada e saída do biodigestor para verificar se a digestão anaeróbia interferiria significativamente nas concentrações. A Tabela 14 apresenta a concentração de N e P no dejetado suíno bruto e no digestato.

Tabela 14 – Concentração de nitrogênio e fósforo no dejetado suíno bruto e no digestato

Nutrientes	Bruto		Digestato	
	Valor (mg/L)	Desvio Padrão (mg/L)	Valor (mg/L)	Desvio Padrão (mg/L)
Nitrogênio	2.915,83	7,93	2.886,83	25,53
Fósforo	125,3	-	117,6	-

Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise da Tabela 14, é possível perceber a baixa variação de ambos os nutrientes. Esses resultados já eram esperados, visto que a digestão anaeróbia não visa a remoção de N e P, sendo que a pequena diferença entre a entrada e saída do reator pode estar relacionada ao consumo destes elementos pelos microrganismos para o seu desenvolvimento. Os principais nutrientes inorgânicos necessários para a digestão anaeróbia são N e P, e as concentrações necessárias se baseiam na composição química dos microrganismos. Normalmente, a relação destes elementos está relacionada com a quantidade de DQO presente no dejetado. A relação ideal entre DQO:N:P é 1000:5:1 (CHERNICHARO, 1997).

Tendo em vista a melhor relação entre DQO:N:P, e comparando com a proporção presente no dejetado de 77:23:1, percebe-se que a relação está desequilibrada, pois para a quantidade de DQO presente no dejetado, os valores de N e P estão elevados, existindo assim, a

possibilidade de inibição da digestão anaeróbia devido ao excesso destes nutrientes, justificando o rendimento abaixo do esperado na quantidade de biogás gerada.

4.3 Coágulo-Floculação

Os testes de coágulo-floculação foram realizados no digestato com o intuito de concentrar a parte sólida em forma de lodo, gerando, assim, um clarificado que pudesse ser reutilizado.

Após a digestão anaeróbia, o digestato passou por um processo de sedimentação em cone Imhoff para a retirada dos sólidos sedimentáveis. Essa operação reduz o consumo de produto químico na operação de coágulo-floculação. No final do processo, o lodo proveniente do cone e o lodo gerado na coágulo-floculação, foram unidos, o que representa aquilo que também seria feito na prática para reaproveitamento destes materiais como biofertilizante. A coágulo-floculação foi realizada com a adição de policloreto de alumínio (PAC) e polímero aniônico. As dosagens testadas estão apresentadas na Tabela 15.

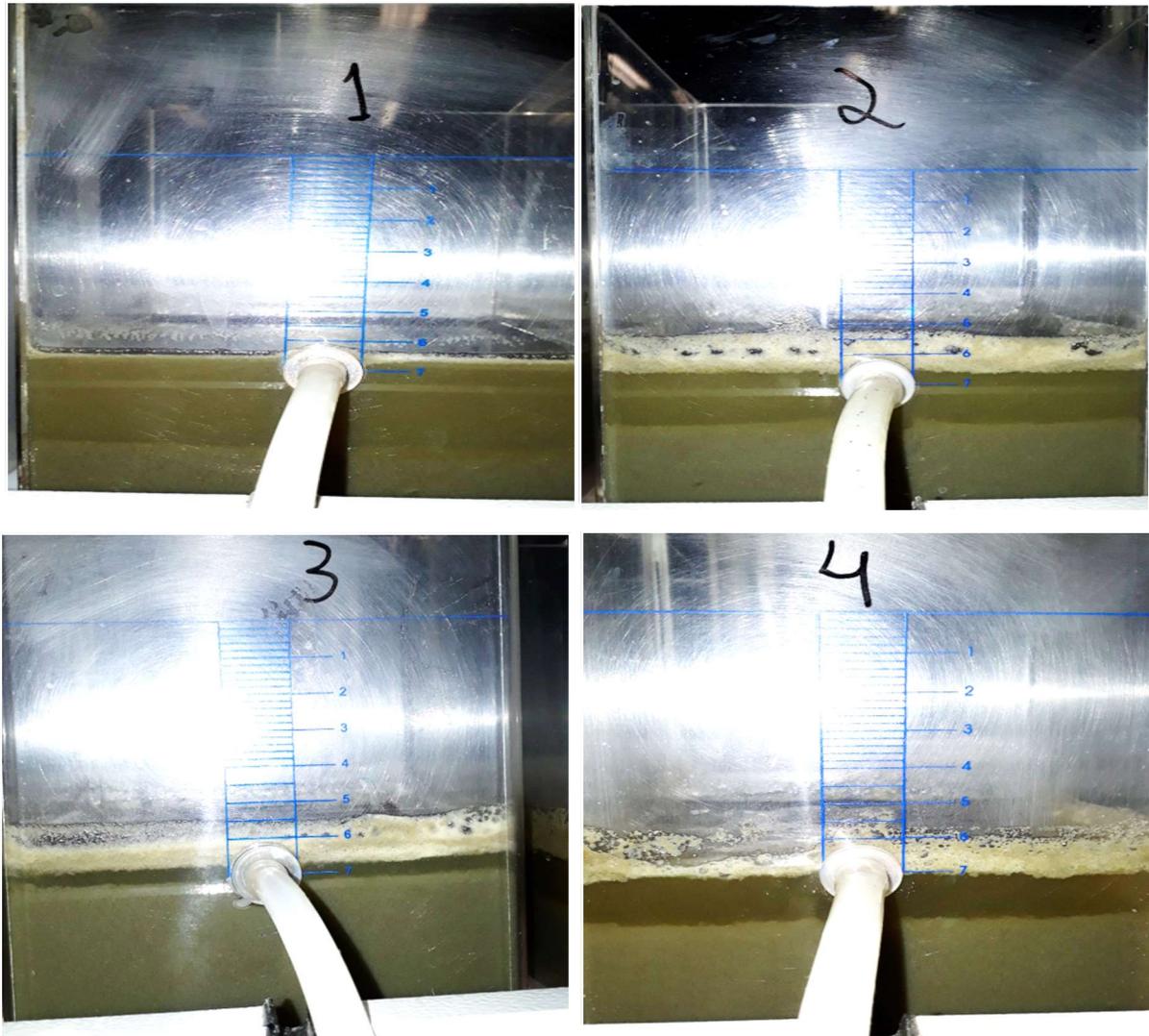
Tabela 15 – Dosagens de PAC e polímero utilizadas no processo de coágulo-floculação

Testes	PAC (mL)	Polímero (mL)
1	5	1
2	10	2
3	15	2,5
4	9	2

Fonte: Do Autor (2020).

A partir da aplicação destas dosagens obteve-se os resultados expostos na Figura 12.

Figura 12 – Testes 1, 2, 3 e 4 de coagulo-floculação



Fonte: Do Autor (2020).

Os testes foram realizados na sequência do exposto na Figura 12. No teste 1, percebe-se uma formação de lodo, sem a obtenção de um clarificado de boa qualidade. Com isso, aumentaram-se as doses, gerando assim os testes 2 e 3, que apresentaram uma maior formação de lodo devido ao aumento das quantidades de produtos químicos adicionados, no entanto, ainda assim não foi possível obter um clarificado com características de reuso.

A partir da análise dos três primeiros testes, foi possível perceber que com o aumento dos produtos químicos, a parcela de clarificado diminuiu, se tornando assim inviável continuar acrescentando dosagens maiores, visto que seria necessário maior volume de produto químico para uma menor porção de clarificado a ser reaproveitado. Por isso, tendo em vista que o melhor resultado foi obtido na dosagem 2, realizou-se o quarto teste com dosagem próxima, para verificar alguma possível melhora. O resultado deste teste seguiu a tendência dos demais,

gerando uma quantidade de lodo proporcional à dose de produto químico adicionado, porém sem gerar um clarificado de qualidade.

Ao avaliar os quatro testes, percebe-se que a adição dos produtos químicos gerou a separação dos sólidos, mas em nenhum dos testes foi possível obter um clarificado límpido que pudesse ser caracterizado e classificado para reuso. Percebe-se, ainda, que a fase sobrenadante melhora com o aumento das dosagens, mas em contrapartida, essa fase se torna menor a cada aumento. Portanto, seria inviável utilizar altas dosagens de produtos químicos para gerar baixa quantidade de clarificado, ainda mais se fossem considerados os custos envolvidos.

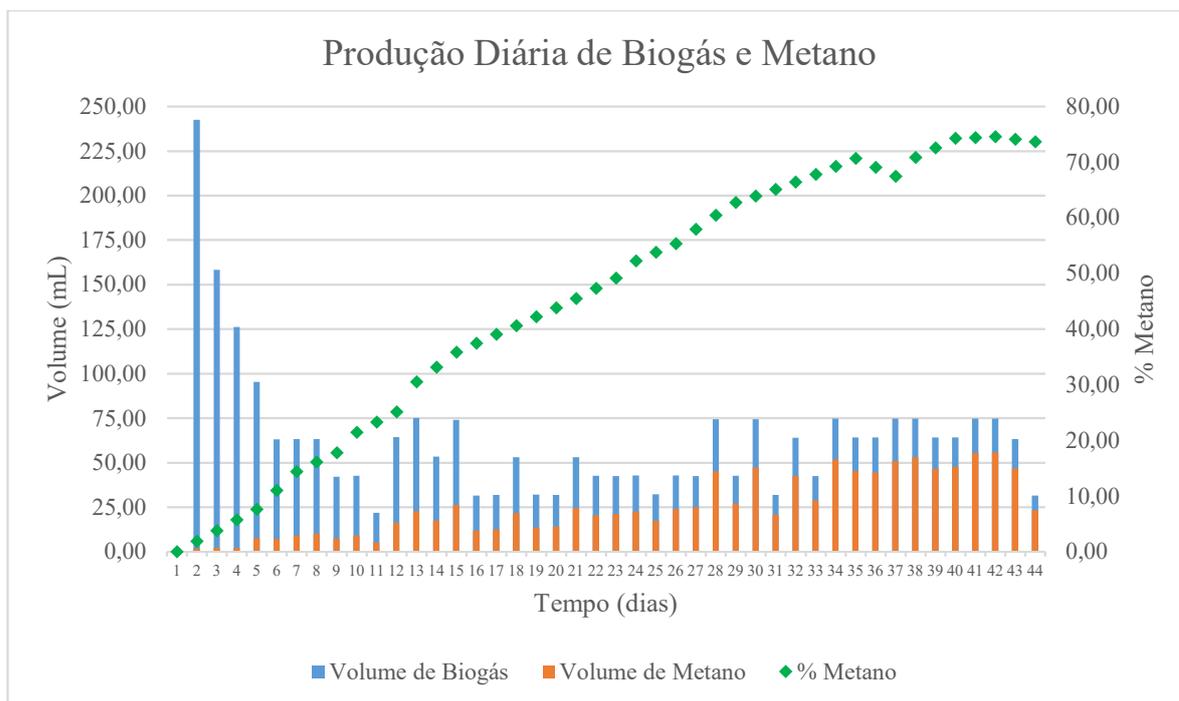
Sendo assim, no primeiro ensaio de coagulo-floculação os resultados apresentados não foram satisfatórios em relação ao objetivo proposto, pois consumiram altas quantidades de produtos químicos e não geraram um clarificado passível de reuso dentro da propriedade. Além disso, a única aplicação para este clarificado seria a disposição em solo. Desta forma não é viável realizar um tratamento que necessita adição de produtos químicos e mão de obra e que não altera a destinação final do efluente.

4.4 Segundo Ensaio de Digestão Anaeróbia

O segundo ensaio de digestão anaeróbia foi realizado nos meses de fevereiro e março de 2020, utilizando como substrato, o lodo do dejetos suíno proveniente do cone Imhoff (utilizado em um primeiro momento para sedimentação de sólidos suspensos sedimentáveis) e o lodo obtido no processo de coagulo-floculação a partir da amostra do cone.

Neste ensaio, utilizou-se reatores de 1 L preenchidos com 0,5 kg de substrato, obtendo-se uma produção média de biogás de 2,7 L com um percentual médio de metano de 40,63%. O processo de digestão em regime de batelada foi avaliado por um período de experimentação de 44 dias, os dados diários de produção são apresentados pelos Gráficos 3 e 4.

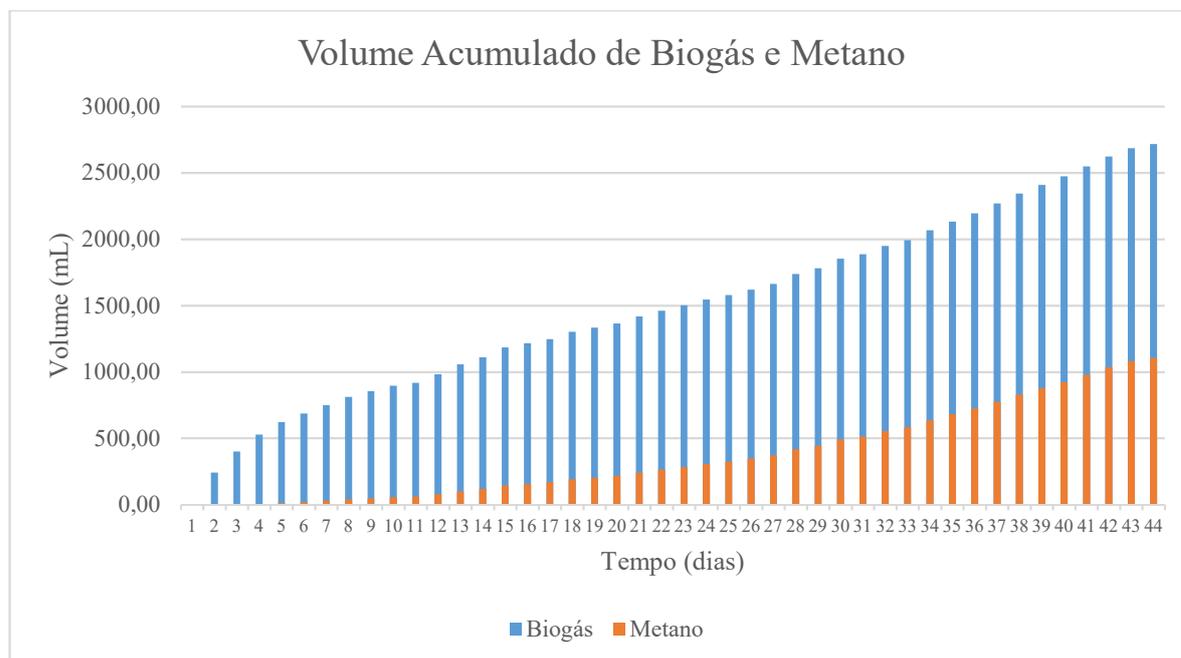
Gráfico 3 – Acompanhamento da produção diária de biogás e metano



Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise do Gráfico 3, é possível perceber que o desenvolvimento da produção de biogás e metano do segundo experimento foi diferente do ocorrido no primeiro teste. Neste caso, a máxima produção de biogás ocorreu no segundo dia. Durante os dias 3 e 5, o volume de biogás produzido apresentou redução quando comparado ao segunda dia, porém ainda assim manteve-se acima da média. A partir do sexto dia, a produção tornou-se mais constante, tendo pequenas variações até o encerramento do ensaio, dado o atendimento do critério definido com base na representatividade do volume diário produzido, em relação ao volume acumulado.

Gráfico 4 – Volume acumulado de biogás e metano



Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise do Gráfico 4, é possível visualizar a produção de biogás e metano acumulada durante o período de digestão anaeróbia. Desta forma, percebe-se que o aumento de biogás e metano foram constantes e diretamente ligados, visto que, conforme ocorria o aumento na produção de biogás, também ocorria o aumento no percentual de metano. A produção de biogás pode ser vinculada à quantidade de sólidos voláteis (SV) presentes no efluente, visto que estes se relacionam com a parcela de matéria orgânica presente no meio. A digestão anaeróbia produziu 5,43 L de biogás por kg de dejetos suíno, sendo que cada kg de dejetos continha 22,93 gramas de sólidos voláteis. Com isso, a produção de biogás em relação ao SV foi de 237 L de biogás/ kg de SV.

Quando comparados os valores brutos de produção de biogás obtida nos dois experimentos, percebe-se que a quantidade de biogás gerada em relação à quantidade de dejetos incubado apresentou um aumento no segundo experimento, o que era esperado, visto que esse aumento está relacionado com a maior concentração de matéria orgânica presente no meio. Enquanto que no primeiro experimento o dejetos suíno incubado continha 1,44% de sólidos totais, no segundo experimento estes estavam mais concentrados (3,46%) devido à remoção de uma parcela de clarificado (água) promovida pela coagulo-floculação, portanto já era esperado que o volume final de biogás produzido fosse maior do que o apresentado no primeiro ensaio. No entanto, quando comparamos os valores de biogás gerados em relação à quantidade de SV

presentes, percebe-se que os valores entre os experimentos ficaram muito próximos, o que também poderia ser esperado visto que, nos dois experimentos foi utilizado o mesmo substrato (dejeito suíno), proveniente do mesmo local, apenas com data de coleta diferente, e em concentração de sólidos diferente em função do ensaio de coagulo-floculação.

Desta forma, apesar de o segundo experimento ter produzido um pouco mais de biogás por grama SV em relação ao primeiro experimento, o valor ainda foi abaixo que o verificado de 287,5 L de biogás/ kg de SV para Konrad et al. (2018) e 450 L de biogás/ kg de SV para Gomes e Raiher (2013). Quando se compara o percentual de metano presente no biogás do primeiro com o segundo ensaio, nota-se uma redução significativa de 67,71% para 40,63%. Essa redução pode ter ocorrido devido à presença do alumínio agregado ao dejeito em função do coagulante utilizado - policloreto de alumínio (PAC). O lodo digerido apresentou uma concentração de Al de 1.140,4 mg/L.

Kim e Chung (2015) testaram os efeitos dos coagulantes inorgânicos sobre a digestão anaeróbia e obtiveram como resultados que quanto maior a concentração de alumínio (Al) no meio, menor é a produção de biogás e metano. Sendo que concentrações de 46 mg/L de Al reduzem 10% a capacidade de fermentação acidogênica e para concentrações acima de 232 mg/L ocorre a inibição da fermentação microbiana. Santos, Van Vlierberghe e Campos (2019) afirmam que concentrações de 346 mg/L de Al reduzem em 60% na atividade metanogênica, justificando assim a baixa geração de metano.

Desta forma, percebe-se que o coagulante a base de alumínio pode não ser a melhor alternativa dentre as opções de coagulantes existentes. Kim e Chung (2015) testaram além de PAC, cloreto férrico, coagulantes orgânicos e polímeros, sendo que em todos os casos obtiveram baixa produção de ácidos graxos voláteis na fase acidogênica devido a redução do contato entre as bactérias e o substrato.

Outro fator que auxiliou na redução do percentual médio de metano do segundo experimento foi a alta produção de biogás registrada nos primeiros dias de incubação. Sabe-se que os primeiros dias são os mais críticos, pois existe oxigênio no meio e o processo de digestão anaeróbia ainda está se estabilizando. O que corrobora com essa hipótese é o fato que, durante a digestão terem sido alcançados percentuais de metano acima dos 70%, ou seja, depois que o sistema se autorregulou ocorreu uma produção de biogás significativa com um percentual de metano que possibilitaria a reutilização energética.

4.5 Análises Físicas e Químicas

As análises físicas e químicas realizadas foram fundamentais para caracterizar o dejetos suíno bruto, e, posteriormente, serviram de comparativo para avaliação dos ensaios de coagulação-floculação e digestão anaeróbia. As análises foram realizadas em triplicata, sendo apresentado aqui os valores médios obtidos.

4.5.1 Amônia

A análise de amônia foi realizada somente no lodo concentrado que foi incubado, pois é um indicador de inibição da digestão anaeróbia. O resultado obtido foi de $1.512,48 \pm 47,10$ mg/L. Segundo Chernicharo (1997), valores acima de 3.000 mg/L, são tóxicos aos microrganismos da digestão anaeróbia, para valores entre 1.500 e 3.000 mg/L a amônia se torna inibidora se o pH for maior que 7,6. Desta forma, a amônia teve menor interferência na digestão anaeróbia quando comparado com o primeiro teste, justificando assim as altas produções de biogás nos primeiros dias.

4.5.2 Análise de pH

As análises de pH foram realizadas no dejetos suíno bruto, no clarificado, no lodo e no digestato. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores de pH em cada fase do tratamento

Fase	Valor de pH	Desvio Padrão
Dejeto Bruto	6,72	0,02
Clarificado	6,41	0,01
Lodo	6,62	0,03
Digestato	7,85	0,009

Fonte: Do Autor (2020).

Para facilitar a digestão anaeróbia, antes do ensaio, o pH do lodo foi aumentado até 7,02 com auxílio de bicarbonato de sódio. Tendo em vista a pouca variação inicial e final do potencial de hidrogênio medido, e considerando a faixa ideal para a digestão anaeróbia entre 6,0 e 8,0, pode-se afirmar que o processo ocorreu dentro da faixa ideal de pH

(CHERNICHARO, 1997). Além disso, é possível concluir que o sistema se manteve tamponado e que os ácidos graxos voláteis gerados foram consumidos pelas etapas posteriores para conversão em metano.

4.5.3 DQO e DBO₅

Os parâmetros de DQO e DBO₅ são importantes para a caracterização do dejetos suíno e para classificá-lo quanto a sua biodegradabilidade. Desta forma, os valores de DQO e DBO₅ para cada fase do tratamento, assim como a relação entre eles, são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores de DQO e DBO₅ para o dejetos suíno em cada fase do tratamento aplicado

Dejetos Suíno	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Relação DQO/DBO
Bruto	21.133,49 ± 562,06	14.666,67 ± 444,44	1,44
Clarificado	11.872,52 ± 1.551,96	8.333,33 ± 444,44	-
Lodo	36.692,84	13.333,33 ± 4.444,44	1,42
Digestato	24.000,00	8.333,33 ± 444,44	-

Fonte: Do Autor (2020).

A relação de lodo e clarificado será apresentada na seção subsequente, porém cabe informar aqui que esta relação é de 30% de clarificado, para 70% de lodo, por isso que a soma simples dos valores de DQO e DBO₅ não correspondem aos valores do efluente bruto.

A partir da análise dos valores da Tabela 17, é possível perceber que os desvios padrão ficaram elevados. Isso se deve principalmente ao fator de diluições, que tiveram valores diferentes para cada fase de análise. Enquanto que para o efluente bruto e clarificado utilizou-se diluições de 100 vezes para DQO e 10 vezes para DBO₅, para o lodo utilizou-se 1000 vezes para DQO e 100 vezes para DBO₅ e para o digestato utilizou-se 1000 vezes para DQO e 10 vezes para DBO₅.

Foram aplicadas diferentes diluições entre as etapas, devido que, após a coagulo-floculação houve a concentração de matéria orgânica no lodo, desta forma, foi necessário aumentar o fator de diluição utilizado no lodo e no digestato, para conseguir realizar as análises, da mesma forma que este mesmo fator foi diminuído para o clarificado.

A partir dos valores obtidos, é possível afirmar que o dejetos suíno é biodegradável e, portanto, a digestão anaeróbia pode ser uma alternativa eficaz na oxidação da matéria orgânica

biodegradável, sendo que com o processo aplicado constatou-se uma redução de apenas 37,5% na DBO₅ e de 34,6% na DQO.

Considerando a queda no percentual de remoção de DBO₅, comparando o segundo ensaio com o primeiro, fica mais evidente a influência da coagulo-floculação com a adição do coagulante a base de alumínio, pois se verificou uma queda no desempenho da digestão anaeróbia.

A baixa produção de biogás, e a pequena redução da DQO e DBO₅ indicam que ainda havia matéria orgânica no dejetos disponível para ser biodegradada, o que reforça a hipótese de uma inibição do processo de digestão. O fato de pouca matéria orgânica ter sido consumida está relacionado principalmente pela inibição que pode ter sido causada pelo alumínio que se apresentou em altas concentrações, devido a adição do policloreto de alumínio como coagulante. Ou ainda, pelos mesmos motivos apresentados como hipótese no primeiro ensaio, visto que a relação DQO:N neste segundo experimento foi de 18:1, não sendo assim a melhor proporção para a digestão anaeróbia.

Vieira (2017) realizou a digestão anaeróbia de esgoto doméstico com as seguintes concentrações de Al: 173, 346, 519 e 692 mg/L. Quando comparados ao teste sem Al, obteve redução da DQO de 42,4 %, 37,1 %, 39,2 % e 39,6 %, respectivamente. Corrobora, assim com os resultados obtidos no presente trabalho, onde a concentração de alumínio interfere negativamente na digestão anaeróbia. Além disso, pode-se concluir que a concentração de Al é inversamente proporcional a redução da DQO no efluente.

4.5.4 Análise de Sólidos

A análise de sólidos é de suma importância para a identificação da fase biodegradável do dejetos suíno. Os sólidos totais (ST), são compostos pelos sólidos voláteis (SV), que é a parte orgânica do dejetos e pelos sólidos fixos (SF), que é a parcela inorgânica. Desta forma, conhecendo o ST e SV é possível avaliar se a digestão anaeróbia é viável como tratamento, além disso, a produção de biogás é baseada em relação a massa de SV presentes no dejetos (OLIVEIRA, 2005). A Tabela 18 apresenta os valores de sólidos presentes no dejetos suíno em cada fase do tratamento.

Tabela 18 – Sólidos presentes no dejetos suíno em cada fase do tratamento

Amostra	ST %	SV %	SF %
Bruto	1,70	1,07	0,63
Clarificado	1,67	0,94	0,73
Lodo	3,46	2,30	1,17
Digestato	3,17	1,60	1,57

Fonte: Do Autor (2020).

A partir da avaliação da Tabela 18, é possível verificar como cada etapa de tratamento influencia na remoção dos sólidos presentes no dejetos suíno. Quando se compara o bruto com o clarificado e o lodo, é possível avaliar o tratamento de coagulo-floculação, quando comparados os valores do lodo com o digestato, é possível avaliar a digestão anaeróbia.

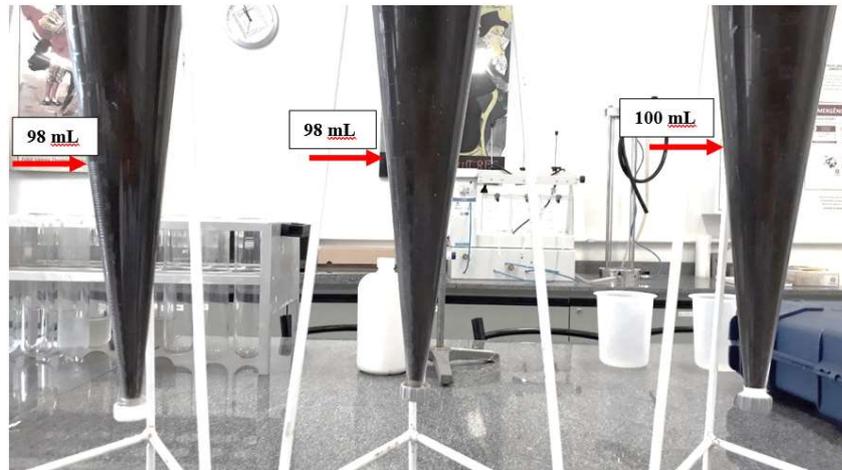
A coagulo-floculação não apresentou eficiência na remoção de sólidos totais, uma vez que, ocorreu apenas 0,03% de redução do efluente bruto para o clarificado. Em relação ao lodo, o acréscimo significativo se deu pela adição de 99,33 mL de lodo proveniente do cone imhoff. O aumento do SF no clarificado é decorrente da adição do PAC, visto que, este é um elemento inorgânico. Já a digestão anaeróbia apresentou uma diminuição do ST de 0,29%, relacionado principalmente pela conversão dos sólidos voláteis em biogás, visto que os sólidos fixos são constituintes inorgânicos que não sofrem alterações durante o processo. O aumento verificado nos sólidos fixos no digestato pode estar relacionado com a possibilidade de desvios de análises.

Analisando os dados o que mais chama a atenção é o pouco consumo de SV da digestão anaeróbia o que por consequência explica o baixo rendimento na geração de biogás, conforme Vieira (2017), essa redução está relacionada com a presença do Al, visto que em seus experimentos, foram observados redução no consumo de SV a partir do acréscimo de Al.

4.5.5 Sólidos Sedimentáveis

Os sólidos sedimentáveis foram avaliados com o intuito de verificar a parcela de sólidos capaz de sedimentar antes e após o processo de digestão anaeróbia, identificando a necessidade ou não de inclusão de uma etapa específica para isso em escala real. As Figuras 13 e 14 apresentam os valores das análises no efluente bruto e no digestato obtido após o ensaio de digestão anaeróbia do lodo.

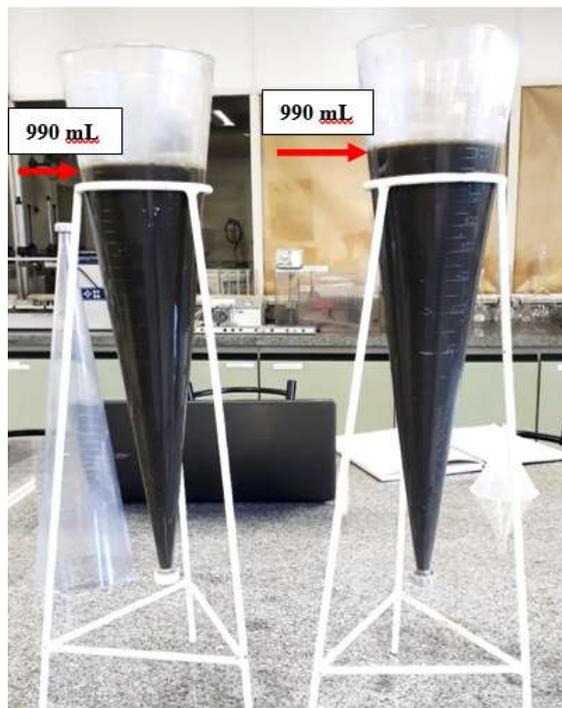
Figura 13 – Teste de sedimentação do dejetos suíno bruto



Fonte: Do Autor (2020).

Devido à falta de digestato, o teste de sedimentação foi realizado em duplicata.

Figura 14 – Teste de sedimentação do digestato



Fonte: Do Autor (2020).

O dejetos suíno bruto continha $99,33 \pm 0,89$ ml de sólidos por litro de dejetos suíno. O sobrenadante do cone imhoff foi enviado para a coagulo-floculação, onde ocorreu a geração de 30% de clarificado. Os 70% de lodo proveniente deste processo foram agregados com os sólidos sedimentáveis do cone (SS) e enviados para a digestão anaeróbia. A análise de SS no digestato apresentou 990 mL de sólido por litro de dejetos suíno, este valor é coerente visto que apenas

lodo concentrado foi enviado à digestão. Além disso, tendo em vista que durante o processo a tendência é de aumentar a quantidade de lodo devido a reprodução dos microrganismos.

4.5.6 Nitrogênio e Fósforo

As análises de nitrogênio (N) e fósforo (P) foram realizadas para avaliar a capacidade de reutilização do digestato como biofertilizante. Para isso, foram quantificadas as concentrações destes nutrientes na entrada e saída do biodigestor para verificar se a digestão anaeróbia interferiria significativamente nas concentrações. A Tabela 19 apresenta a concentração de N e P presentes no dejetos suíno em cada fase de tratamento.

Tabela 19 – Concentração de N e P no dejetos suíno em relação a fase de tratamento

Dejeto Suíno	Nitrogênio		Fósforo
	Valor (mg/L)	DP (mg/L)	Valor (mg/L)
Bruto	1.848,09	73,36	33,6
Clarificado	1.513,78	18,96	1,2
Lodo	2.058,17	5,58	-
Digestato	2.593,63	1.059,76	37,3

Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise da Tabela 19, é possível avaliar a coagulo-floculação e a digestão anaeróbia. Na coagulo-floculação percebe-se uma redução de 18% para o nitrogênio e de 96,4% para o fósforo. Schoenhals, Sena e José (2006) obteve uma redução de 16,19% na redução de nitrogênio no tratamento de efluentes de abatedouros de frango utilizando PAC como coagulante e de 99,93% na redução de fósforo. Isso corrobora com os resultados obtidos no presente trabalho, o qual mostra que a coagulo-floculação é bastante eficaz na remoção de P.

Quando se avalia a concentração de N e P antes e após a digestão anaeróbia, percebe-se incoerência em ambos os valores, pois estes acabam aumentando. Teoricamente, a única influência que a digestão pode provocar nestes nutrientes é um baixo consumo deles para o desenvolvimento dos microrganismos.

O fato de haver este aumento deve estar relacionado com desvios ocorridos durante as análises, possuindo, provavelmente, como principais causas, a diluição e a coleta da amostra para realização da técnica. Como o lodo e o digestato possuem uma alta concentração de sólidos, a tendência é que haja sedimentação destas partes sólidas mais rapidamente, portanto,

entre uma coleta e outra pode ocorrer desvios significativos. Outro fator que leva a crer que estas análises sofreram desvios analíticos é o alto valor de desvio padrão, mostrando que as amostras apresentaram bastante variância entre elas.

4.6 Coagulo-Floculação

Os testes de coagulo-floculação foram realizados no efluente bruto, com o intuito de concentrar a parte sólida no lodo, diminuindo o volume a ser digerido e gerando um clarificado que pudesse ser reutilizado.

O dejetos suíno bruto passou por um processo de sedimentação em cone Imhoff para a retirada dos sólidos suspensos sedimentáveis. Essa operação reduz o consumo de produto químico na operação de coagulo-floculação. Ao final do processo, o lodo proveniente do cone e o obtido na coagulo-floculação, foram unidos para realizar a digestão anaeróbia.

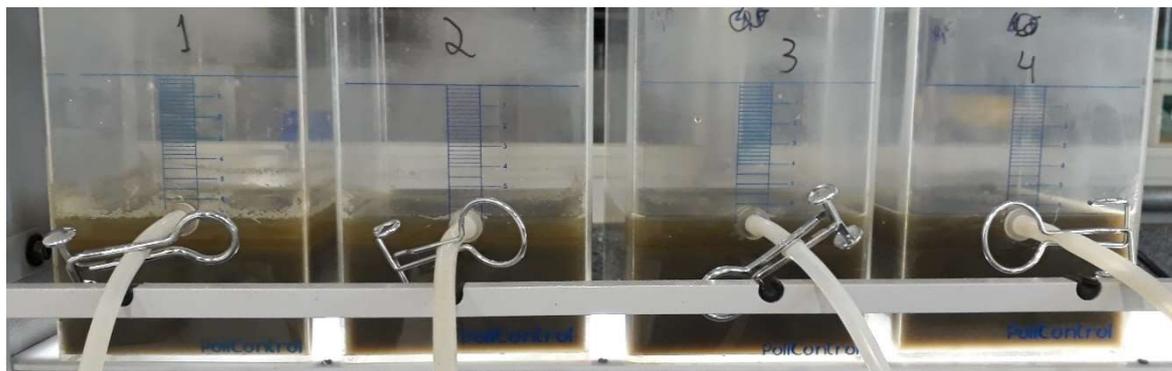
Para a determinação da dosagem mínima de coagulante, utilizou-se o dejetos suíno bruto com pH de 6,87, adicionou-se PAC até a formação de flocos que se deu com 3 mL de coagulante. Após, aplicou-se essa mesma dosagem em pH de 7,5, 8,0 e 8,5, conforme metodologia. A Tabela 20 apresenta a determinação da dosagem mínima de coagulante e pH ideal. A Figura 15 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 20 – Determinação da dosagem mínima de coagulante e pH ideal

Testes	pH	PAC (mL)
1	6,87	3
2	7,50	3
3	8,00	3
4	8,50	3

Fonte: Do Autor (2020).

Figura 15 – Resultado da coagulo-floculação dos 4 primeiros testes



Fonte: Do Autor (2020).

A partir dos testes de dosagem mínima e pH ideal, foram escolhidos os pH de 6,87 e 8,50 para reprodução dos ensaios com a variação de coagulante e polímero, conforme descrito na metodologia. As dosagens testadas estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Determinação de PAC e polímero utilizadas no processo de coagulo-floculação

Testes	pH	PAC (mL)	Polímero (mL)
1	6,87	6	1,5
2	6,87	9	2,0
3	6,87	12	2,5
4	8,50	6	1,5
5	8,50	9	2,0
6	8,50	12	2,5

Fonte: Do Autor (2020).

Após o lodo sedimentar, foi coletada uma amostra de cada cuba e realizado a análise de cor e turbidez para avaliação dos clarificados, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultado da análise de pH, cor e turbidez dos clarificados

Testes	pH	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)
1	6,36	1.530,00	174,33
2	5,83	326,67	95,87
3	5,40	332,67	110,67
4	7,33	2.736,67	882,67
5	7,09	439,00	314,33
6	6,06	273,67	75,83

Fonte: Do Autor (2020).

A partir da avaliação da cor e da turbidez, observou-se que o teste 6 foi o que apresentou o melhor clarificado. Logo, realizaram-se mais dois testes, repetindo as melhores dosagens para obter clarificado suficiente para a realização das análises. O clarificado obtido na réplica

apresentou valores de 263 PtCo e 68,85 NTU para cor e turbidez respectivamente. O clarificado é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Clarificado utilizado na realização das análises de caracterização



Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise dos ensaios de *Jar Test*, é possível perceber que a coagulo-floculação gerou duas fases distintas: uma de clarificado, que representa 30% do volume, e uma de lodo, que representa 70% do volume. Além disso, o pH é de suma importância na realização da coagulo-floculação com PAC, uma vez que os resultados variaram significativamente em faixas de pH diferentes.

Em relação à qualidade do clarificado obtido, comparando-o com a NBR e resolução que estabelecem padrões para reuso de efluentes tratados, foram percebidas características que restringem sua reutilização apenas para irrigação. Ou seja, na prática, não haveria uma vantagem em relação ao tratamento adicional implementado, pois o líquido somente poderia ser reutilizado da mesma forma que o dejetos suíno estabilizado já é reaproveitado na propriedade. Desta forma, torna-se inviável o uso do tratamento de coagulo-floculação no dejetos suíno, já que seria necessária a aplicação de produtos químicos que gerariam custos e não proporcionariam um reuso diferenciado.

4.7 Comparativo Entre os Dois Ensaio

Nesta seção, realiza-se um comparativo entre os resultados dos dois ensaios. Os valores obtidos nas análises de ambos os testes são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Comparativo entre os ensaios

Parâmetros	1º Ensaio		2º Ensaio			
	Bruto	Digestato	Bruto	Clarificado	Lodo	Digestato
Ph	7,84	7,76	6,72	6,41	6,62	7,85
Amônia (mg/L)	2.435,92	-	-	-	1.512,48	-
Biogás (L/kg SV)	206,00	-	-	-	237,00	-
Biogás (L/kg dejetos suíno)	1,55	-	-	-	5,43	-
Metano (%)	67,71	-	-	-	40,63	-
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	16,17	10,50	99,33	-	-	990,00
ST (%)	1,44	1,32	1,70	1,67	3,46	3,17
SV (%)	0,75	0,62	1,07	0,94	2,30	1,60
SF (%)	0,69	0,70	0,63	0,73	1,17	1,57
DQO (mg/L)	16.935,67	11.064,27	21.133,49	11.872,52	36.692,84	24.000,00
DBO ₅ (mg/L)	9.666,67	3.666,67	14.666,67	8.333,33	13.333,33	8.333,33
Nitrogênio (mg/L)	2.915,83	2.886,83	1.848,09	1.513,78	2.058,17	2.593,63
Fósforo (mg/L)	125,30	117,60	33,60	1,20	-	37,30
Alumínio (mg/L)	-	-	-	6,90	-	1.140,40
Cor (PtCo)	-	-	-	273,67	-	-
Turbidez (NTU)	-	-	-	75,83	-	-
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	-	-	-	4,5x10 ²	-	>1,8x10 ⁰

Fonte: Do Autor (2020).

Ao realizar-se a comparação entre o dejetos suíno coletado para o primeiro e o segundo ensaio, percebeu-se que o dejetos utilizado no segundo ensaio é mais concentrado em relação à SS, DQO e DBO₅. Por isso, já era esperado que o segundo experimento gerasse maior volume final de biogás.

O biogás produzido no primeiro ensaio, apesar de ter alcançado um percentual médio de metano de 67,71%, gerou um volume de biogás de apenas 1,55 L/kg de dejetos suíno. Esse baixo volume produzido torna praticamente inviável o reaproveitamento energético, se avaliadas as condicionantes econômicas.

Já o segundo ensaio gerou aproximadamente 3,5 vezes mais biogás, mas o percentual médio de metano foi de apenas 40,63%. No entanto, esse percentual médio foi reduzido devido às grandes variações na produção de biogás que ocorreram nos primeiros dias de incubação do experimento. Após essa fase de ambientação do sistema, percebe-se que o percentual de metano diário atingiu valores acima dos 70% de metano.

A digestão anaeróbia mostrou não interferir significativamente nos nutrientes N e P, permitindo assim a reutilização do digestato como fonte de nutrientes para lavouras. Cabe

salientar que essa técnica é permitida, porém exige análises de solo para identificar a deficiência e então calcular a quantidade de dejetos a ser aplicado por área de terra. O tratamento a partir da digestão anaeróbia se mostra eficiente na diminuição da carga orgânica do dejetos suíno, diminuindo assim sua capacidade poluidora.

O tratamento de coagulo-floculação foi empregado no segundo ensaio com a intenção de concentrar a parte sólida do dejetos suíno, reduzindo assim o volume de efluente a ser digerido no processo de digestão anaeróbia, pensando na aplicação prática do processo em escala real, além de obter um clarificado passível de reuso. Para isso utilizou-se coagulante PAC e polímero aniônico. A partir deste tratamento, obteve-se duas fases distintas, uma de lodo, que representa 70% do volume, e outra de clarificado, que representa 30% do volume. O lodo foi enviado para a digestão anaeróbia e o clarificado foi caracterizado para avaliar sua melhor forma de reaproveitamento. A Tabela 24 apresenta o comparativo entre os valores obtidos para o clarificado e o que é solicitado pelas normas do CONSEMA.

Tabela 24 – Comparação do clarificado com a Resolução CONSEMA n° 355 e 419

Parâmetros	Clarificado	Resolução 419	Consema 355
Ph	6,41	6 a 9	6 a 9
DQO (mg/L)	2.671,59	-	330
DBO ₅ (mg/L)	8.333,33	-	120
Nitrogênio (mg/L)	1.513,78	-	20
Fósforo (mg/L)	1,20	-	4
Alumínio (mg/L)	6,90	5	-
Cor (PtCo)	273,67	-	Não deve alterar a cor do corpo hídrico receptor
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	4,5x10 ²	-	
Coliformes termo tolerantes (NMP/100mL)		10 ⁴	10 ⁵

Fonte: Do Autor (2020).

Ao realizar a comparação entre o clarificado e a Resolução CONSEMA n° 355, percebe-se que o clarificado não poderia ser lançado em corpo hídrico receptor, pois não atende aos parâmetros de DQO, DBO e N exigidos pela legislação. Quando comparado com a Resolução CONSEMA n° 419, demonstra que a quantidade de alumínio presente no clarificado está acima da permitida pela legislação para lançamento do clarificado diretamente em solo, com fins agrícolas.

Desta forma, a utilização do PAC como coagulante, além de interferir negativamente na digestão anaeróbia, dificulta a disposição do clarificado e do lodo em solo devido a elevada quantidade de alumínio presente neles.

A aplicação da coagulo-floculação reduziu em 30% a quantidade de dejetos suíno enviada para a digestão anaeróbia, permitindo, na prática, gerar uma redução dos biorreatores. Além disso, foi possível aumentar o rendimento de metano por metro cúbico de biorreator. A Tabela 25 apresenta a relação entre o primeiro e o segundo ensaio correlacionando a produção de biogás e metano por volume de biorreator.

Tabela 25 – Relação entre biogás e metano por volume de biorreator nos ensaios de digestão anaeróbia

Parâmetros	1º Ensaio	2º Ensaio
Biogás (m ³ biogás/m ³ dejetos suíno)	1,55	5,43
Metano (%)	67,71	40,63
Metano (m ³ metano/m ³ dejetos suíno)	1,05	2,21
Tamanho reator (m ³)	1	1

Fonte: Do Autor (2020).

A partir da análise da Tabela 25, é possível perceber que o volume de metano produzido por metro cúbico de reator foi de 2,1 vezes maior no segundo ensaio, aumentando assim o rendimento do biorreator.

5 CONCLUSÃO

A digestão anaeróbia do dejetos suíno não apresentou resultados satisfatórios para a produção de biogás e metano, ficando abaixo dos valores indicados na literatura. No primeiro ensaio com o efluente bruto, alcançou-se um percentual de metano ideal, porém o volume de biogás produzido foi baixo. Já no segundo ensaio, obteve-se um volume de biogás maior, porém ainda abaixo do indicado pela literatura, e o percentual de metano geral reduziu significativamente devido às grandes variações iniciais e da adição de coagulante PAC. Portanto, a digestão anaeróbia é eficaz na redução da matéria orgânica presente no dejetos suíno, mas os baixos volumes de biogás e metano produzidos poderiam dificultar o seu reaproveitamento energético.

Os testes de coagulo-floculação com coagulante PAC, não se mostraram eficazes na geração de um clarificado que pudesse mudar a forma de reaproveitado atual. O lodo e o clarificado, provenientes desse tratamento, apresentaram valores de alumínio acima do permitido pela legislação para disposição em solo. Além disso, os resultados obtidos levam a crer que o alumínio introduzido no dejetos, interferiu negativamente na digestão anaeróbia do lodo.

Comparando o segundo experimento ao primeiro, a principal vantagem na aplicação da coagulo-floculação, foi a possibilidade de reduzir em 30% o volume do biodigestor, pensando na aplicação em escala real, além de concentrar a parte biodegradável no lodo. Desta forma, verificou-se um aumento no volume de biogás produzido por massa de SV e por metro cúbico de reator.

Como sugestão para próximos trabalhos seria o teste de coagulantes naturais, como tanino, para evitar o problema com resíduos químicos no digestato final. Além disso, o tratamento da coagulo-floculação deverá ser testado após a digestão anaeróbia a fim de evitar inibições.

REFERÊNCIAS

- AKUNNA, J. C. **Anaerobic Waste-wastewater Treatment and Biogas Plants: A Practical Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- AMARAL, L. O; SANTOS, A. S. A. Proposta de tratamento e controle de efluentes de uma indústria alimentícia. **Revista Científico**, v. 18, n. 38, p. 11-24, 2018.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington: Water Environment Federation, 2012.
- ANTES, F. G.; BORTOLO, M.; KUNZ, A. **Tratamento do digestato: remoção de fósforo**. Brasília: Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017, 42 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Tanques sépticos– Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos–Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL – ABPA. **Relatório Anual 2018**. São Paulo: ABPA, 2019.
- BADO, C.; PERCIO, J. E.; LINDINO, C. A. A demanda química de oxigênio: questionamentos. **Revista Analytica**, n. 63, p. 44-51, 2013.
- BATISTA, V. V.; ADAMI, P. F.; FERREIRA, M. L.; GIACOMEL, C. L; SILVA, J. S.; OLIGII, K, F. Ácidos Húmicos/Fúlvicos E Nitrogênio Na Produtividade Da Cultura Do Milho. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 3, p. 257-267, 2018.
- BLEY JR, C. **Biogás: a energia invisível**. 2. ed. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu - ITAIPU Binacional, 2015.
- CAMPOS, A.; SOUZA, C. V.; SOUSA, F. A.; SILVA, E. Tratamento De Dejetos Líquidos De Suínos Por Meio De Lagoas De Estabilização Visando Uso Agrícola. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 13, n. 1, 2016.

CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C.; DA SILVA, C. M. Produção, tratamento e uso dos dejetos suínos no Brasil. **Desenvolvimento em Questão**, v. 13, n. 32, p. 127-145, 2015.

CHERNICHARO, C.A. de L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Politécnica, 246 p. 1997.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – CONSEMA. **Resolução nº 355, dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CONSEMA, 2017.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – CONSEMA. **Resolução nº 419, estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul**. Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CONSEMA, 2020.

DA SILVA, M. I.; DE BORTOLI, A. L. Modelagem e simulação do processo de formação do biogás. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2018.

DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. Manejo de dejetos de suínos. **Boletim Informativo de Pesquisa e Extensão**, v. 7, n. 11, p. 1-32, 1998.

DE CARVALHO, B. V.; MELO, E. P.; SOTO, F. R. M. Avaliação de sistemas de gestão ambiental em granjas de suínos. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 1, p. 164-171, 2015.

DEBIASE, L. R.; MALINOWSKY, C.; RESTREPO, J. J. B.; BONATTO, I. da C.; CASTILHOS JUNIOR, A. B. de. Avaliação dos parâmetros: ph, acidez e alcalinidade durante a fase acidogênica da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos. In: CONGRESSO SUL AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 1. 2018. **Anais...** Gramado, 2018. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2018/XII-024.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

DIGIMED. **Turbidímetro**. 2019. Disponível em: <https://www.digimed.ind.br/br/produtos/turbidimetros/turbidimetro_portatil_de_campo_e_la_boratorio/dm-tu>. Acesso em 03 nov. 2019.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE - FNR. **Guia Prático do Biogás**. 5. ed. Gülzow: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, 2010.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás da suinocultura**. 2012, 211 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012

GABRIEL, M.; WASTOWSKI, A. D ; ROSA, G. M da ; ZENI, C ; BENSO, M. R. . Redução no consumo de água e reuso da água de esterqueira através do uso de coagulantes orgânicos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 4., 2014, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Fiema Brasil, 2014. v. 4.

- GERVÁSIO, E. W. **Carne suína: fatores determinantes para o consumo**. 2017, 39 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Especialização em Agronegócio, Universidade Federal do Paraná, 2017.
- GLANPRACHA, N.; ANNACHHATRE, A. P. Anaerobic co-digestion of cassava pulp and pig manure. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 112-121, 2016.
- GOMES, T. M. da S.; REIHER, A. P. Viabilidade econômica da produção de biogás de dejetos suínos: um estudo de caso. **Revista Ciências Administrativas ou Journal of Administrative Sciences**, v. 19, n. 2, p. 776-815, 2014.
- GOTARDO, R.; PINHEIR, A.; AGUIDA, L. M.; KAYFMANN, V. Evolução e magnitude das concentrações de cátions, ânions e carbono no dejetos líquido de suínos em fase de terminação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 3, p. 849-871, 2017.
- GUERI, M. D.; DE SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2018.
- GUERI, M. V. D.; DE SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O.; SCHIRMER, W. N.; BURATTO, W. G.; RIBEIRO, C. B.; BESINELLA, G. B. Digestão anaeróbia de resíduos alimentares utilizando ensaios bmp. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 08-16, 2018.
- HASAN, C. **Análise da sinergia de resíduos agroindustriais submetidos à biodigestão anaeróbia visando geração de biogás para aproveitamento energético**. 2016, 99 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2016.
- HASAN, C.; MARDER, M.; FEITOSA, A. K.; MACHADO, C. A.; GONÇALVES, T. E.; FELDKIRCHER, T.; KONRAD, O. Análise da sinergia de resíduos agroindustriais submetidos a biodigestão anaeróbia visando biogás para aproveitamento energético. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 3, p. 190-199, 2017.
- HERMES, L. M. **Avaliação da degradabilidade de dejetos de suínos em compostagem convencional e acelerada**. 2019, 67 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Produção da Pecuária Municipal – 2015. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2015_v43_br.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- INSTRUTHERM. **Phmetro**. 2019. Disponível em: <<https://www.instrutherm.net.br/laboratorio/medidor-de-ph-mod-ph-2000.html>>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- JÚNIOR, E. S.; DAL POZZO, D. M.; SANTOS, R. F. Tratamento de dejetos gerados em suinoculturas através do biodigestor. **Acta Iguazu**, v. 6, n. 5, p. 247-252, 2017.
- JÚNIOR, L.; ABREU, F. O. M. S. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, 2018.

KIM, J.; CHUNG, J. Inhibitory effects of inorganic and organic coagulants on acidogenic fermentation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 3, p. 572-577, 2015.

KLEEREBEZEM, R.; JOOSSE, B.; ROZENDAL, R.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Anaerobic digestion without biogas? **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, n. 4, p. 787-801, 2015.

KONRAD, O. (Org.) **Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano**. Lajeado: Editora da Univates, 2016.

KONRAD, O.; HASAN, C.; HICKMANN, E. V.; MARDER, M.; GUERINI FILHO, M.; SILVA, M. C. de A. **Boletim técnico: Produção de biogás a partir de biomassas residuais provenientes do setor agroindustrial**. Lajeado: Editora Univates, 2018.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. de. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 3, p. 28-35, 2006.

KUNZ, A.; PALHARES, J. C. P. **A importância do correto procedimento de amostragem para avaliação das características dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA – CNPSA, 2004.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 229-232, 1999.

LIMA, T. L. O. de. **Caracterização do efluente de uma indústria de suco e avaliação de métodos de tratamento com adsorção, coagulação e floculação**. 2018, 50 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

LUCIDO, G. L. A.; BILA, D. M. Legislação ambiental brasileira para avaliação de cor em efluentes industriais. Disponível em: < <https://iwra.org/member/congress/resource/PAP00-6071.pdf> >. Acesso em: 20 jul. 2020.

MAAMRI, S.; AMRANI, M. Biogas production from waste activated sludge using cattle dung inoculums: Effect of total solid contents and kinetics study. **Energy Procedia**, v. 50, p. 352–359, 2014.

MÁXIMO, V. A. **Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados do aterro sanitário da região metropolitana de Florianópolis**. 2007, 187 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NETO, E. D. D.; ALVARENGA, L. H.; COSTA, L. de M.; NASCIMENTO, P. H.; SILVEIRA, R. Z.; LEITE, L. H. de M. Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontínua. **Revista eletrônica E-xacta**, v. 3, n. 2. 2010.

NICOLOSO, R. S.; BARROS, E. C.; WUANDEN, C. R.; PIGOSSO, A. Uso do digestato como fertilizante. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. (Org.) **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 94-121.

NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Vegetal, Nutrição Animal e Alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 313.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA/ CNPSA, 1993.

OLIVEIRA, P. A. V. Uso de resíduos de suínos para produção de biogás. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Canoas, RS, 2005. p. 32-40.

OLIVEIRA, S. V. Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2608-2618, 2011.

OLIVER, A.P.M.; NETO, A.A.S.; QUADROS, D.G.; VALLADARES, R.E. Training manual on biodigestion. **USAID, Winrokinternational Brasil e Energia e desenvolvimento**, 2008.

PARRON, L. M.; MUNIZ, H. D. F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Brasília: Embrapa Florestas-Documents, 2011.

PASINI, F.; PASSINI, A. F. C.; PIOVEZAN, A. A.; CORREA e SILVA, D.; MACHADO, G. A. Viabilidade de implantação de um biodigestor em uma granja de suínos. **Holos Environment**, v. 19, n. 1, p. 60-69, 2019.

PENG, L.; DAI, H.; WU, Y.; PENG, Y.; LU, X. A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes. **Chemosphere**, v. 197, p. 768–781, 2018.

PINTO, L.; CABRAL, A. C.; SCHNEIDER, L. T.; FRIGO, K. D. A.; FRIGO, J. P.; FRIGO, E. P. Levantamento de dados sobre os dejetos suínos e suas características. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 3, 2014.

PRADO, L. D. **Biogás: um estudo de caso sobre o acompanhamento de sua implantação, retorno de investimento e ponto de eficiência para a produção**. 2018, 22 f. Monografia (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Centro Universitário e Maringá, Maringá, 2018.

RODRIGUES, M. V. D. **Presença de enterococcus spp resistentes a antimicrobianos advindos dos dejetos de suinocultura brutos e tratados**. 2019, 63 f. Monografia (Graduação) – Curso de Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

RODRIGUES, M.B.; TAFFAREL, S.R. Avaliação e Tratamento Físico-Químico em Efluentes de Fluido de Corte Oriundo de Indústria Metalmeccânica. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 11., 2018, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUC-RS, 2018. p. 1-11.

ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G. C. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores

UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 315-328, 2016.

SANTOS, E. O.; SALES, P. R.; DUARTE, M. M. B. Estudo Comparativo Entre as Técnicas de Diluição e Manométrica na Quantificação da Demanda Bioquímica de Oxigênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Florianópolis. **Anais...** Santa Catarina: ABES, 2003.

SANTOS, Felipe R. A. dos; VAN VLIERBERGHE, C.; CAMPOS, G. F. Avaliação de digestor anaeróbio para otimização operacional e viabilização da utilização do biogás na geração de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais...** Natal: Centro de Convenções de Natal, 2019.

SCHISSI, C. D. **Inativação de patógenos entéricos em digestato Suinícola utilizando adenovírus humano como modelo**. 2015, 80 f. Monografia (Graduação) Curso de Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SCHOENHALS, M.; SENA, R. F.; JOSÉ, H. J. Avaliação da eficiência do processo de coagulação/flotação aplicado como tratamento primário de efluentes de abatedouro de frangos. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 3, n.2, p. 5-24, 2006.

SEIDEL, E. P.; GONÇALVES JUNIOR, A. C.; VANIN, J. P.; STREY, L.; SCHWANTES, D.; NACKE, H. Aplicação de dejetos de suínos na cultura do milho cultivado em sistema de plantio direto. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 2, p. 113-117, 2010.

SOUZA, G. E.; GOSMANN, H. A.; BELLI FILHO, P.; MOHEDANO, R. A.; CASARIN, M. A.; BENEDET, L. Gestão de recursos naturais: sustentabilidade em propriedade produtora de suínos. **Mix Sustentável**, v. 2, n. 2, p. 10-19, 2016.

STEINMETZ, R. L. R. **Avaliação do Efeito de Drogas Veterinárias na Produção Específica de Biogás de Substratos Agropecuários**. 2016, 168 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; AMARAL, A. C. do; MOTA, S.C.A. **Avaliação da produção de biogás de resíduos de incubatório de ovos**. Bento Gonçalves: Anais do 4º Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental na Agropecuária, 2014.

STOCKMANN, A. J.; CAETANO, M. O.; GOMES, L. P. **Análise de ciclo de vida da destinação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos: co-digestão anaeróbia, digestão anaeróbia e aterros sanitários**. João Pessoa: Anais do Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 2016.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 3. ed. New York: McGraw-Hill College, 1991.

TREVISAN, V.; MONTEGGIA, L. O. Produção de biogás a partir de efluente da suinocultura utilizando digestão anaeróbia em dois estágios. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE ANIMAIS, 1., 2009, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: EMBRAPA, 2009. p. 264-268.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu-SP. **Eclética Química Journal**, v. 22, n. 1, 1997.

VAZ, L. G. L.; KLEN, M., R. F.; VEIT, M. T.; SILVA, E. A.; BARBIERO, T. A.; BERGAMASCO, R. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclética Química**, v. 35, n. 4, p. 45-54, 2010.

VIEIRA, G. C. **Inibição e toxicidade no processo de digestão anaeróbia dos lodos gerados na ETE Brasília Sul: estudo em escala laboratorial**. 2017, 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

VIRIATO, C. L.; LEITE, V. D.; SOUSA, J. T.; LOPES, W. S.; OLIVEIRA, E. G.; GUIMARÃES, H. S. Influência Da Granulometria E Da Concentração De Sólidos Totais Na Codigestão Anaeróbia De Resíduos Orgânicos. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 17, n. 1, p. 6-15, 2015.

VIVAN, M. L. **Estabelecimento do processo de nitrificação/desnitrificação para o pós-tratamento de digestatos da suinocultura**. 2012, 114 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE WERKSTÄTTEN GMBH - WTW. **Manometrische BSB-Meßgeräte**. Germany: WTW, 2008. p. 23.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09